

Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 174

bast

Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

von

Bernd Dudenhöfer
Philipp Rückert

ASPHALTA
Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 174

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 Kommunikation.

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 Kommunikation.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 07.0288
Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Fachbetreuung
Oliver Ripke

Referat
Asphaltbauweisen

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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 978-3-95606-669-6

Bergisch Gladbach, Februar 2022

Kurzfassung – Abstract

Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Bei den abzugsrelevanten Merkmalen - Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt - liegt die Bestimmung der Raumdichte am Ausbaustück oder Marshallprobekörper entsprechend den nationalen Prüfvorschriften zugrunde. Zur Bestimmung der Raumdichte ist bei offenporigen Asphalten das Ausmessverfahren (Verfahren D) anzuwenden und bei allen anderen Walzasphalten das Tauchwägewerfahren mit Ledertuch (Verfahren B). Nur bei lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten soll zur Erfahrungssammlung neben dem Verfahren B auch das Verfahren D angewandt werden.

Aus den Erfahrungen mit den Prüfverfahren ist bekannt, dass mit zunehmendem Hohlraumgehalt die Raumdichte an Prüfkörpern mit den standardisierten Verfahren nicht präzise genug erfasst werden kann. Um ein geeignetes Verfahren für primär semiporöse und sekundär offenporige Asphaltdeckschichten zu finden wurden insgesamt 7 zum Teil standardisierte Prüfmethoden zur Bestimmung der Raumdichte an drei Mischgutarten durchgeführt. Dabei wurden die Geometrien und Herstellungsverfahren der Prüfkörper variiert.

Alle gesammelten Daten der Untersuchungen (Raumdichte und Streuung) wurden hinsichtlich der Einflüsse aus den geometrischen Kennwerten (Prüfkörperhöhe und -durchmesser), Prüfkörpermasse und charakterisierenden Kennwerten wie den Hohlraumgehalt, den Textureigenschaften, der effektiven Fläche der Textur und Körnungsspezifischen Kennwerten analysiert.

Es konnten deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren nachgewiesen werden. Hinsichtlich der Eignung für semiporöse und offenporige Asphalte konnte ein Verfahren zur Umhüllung von Prüfkörpern mit einem Vakuumbbeutel empfohlen werden, welches in Einklang mit der europäischen Norm steht. Alternativ ist eine Bestimmung des Volumens über eine Laserabtastung der Probekörper zu empfehlen. Diese technisch hochwertige Methodik lässt eine sichere Abgrenzung zwischen der Textur eines Prüfkörpers und den zur Raumdichte zugehörigen Volumen zu.

Determination of bulk density on asphalts with a high void content

For the fume cupboard relevant characteristics - degree of compaction and void content - the determination of the bulk density at the lining or Marshall test specimen is based on the national test specifications. For the determination of the bulk density, the measuring method (Method D) is to be used for open-pored asphalts and the immersion weighing method with leather cloth (Method B) for all other rolled asphalts. When the noise-optimized asphalt wearing courses are tested, method D will be used in addition to method B to gather experience

It is known from experience with the test methods that with increasing void content, the bulk density of test specimens cannot be measured precisely and accurately enough with the standardized methods. In order to find a suitable method for primarily semi-porous and secondarily open-pored asphalt wearing courses, a total of 7 partly standardized test methods for determining the bulk density on three types of mix were carried out. In the process geometries and production methods of the test specimens were varied.

All collected data of the investigations (bulk density and variation) were analyzed with regard to the influences from the geometrical parameters (specimen height and diameter), specimen mass and characterizing parameters such as void content, texture properties, effective area of the texture and grain-specific parameters.

Significant differences between the methods could be detected (or proven). Regarding to the suitability for semi-porous and open-pored asphalts, a method for wrapping test specimens

with a vacuum bag could be recommended, which is congruent with the European standard. Alternatively, a determination of the volume by laser scanning of the test specimens is recommended. This technically sophisticated method allows a reliable distinction to be made between the texture of a test specimen and the volumes associated with the bulk density.

Summary

Determination of bulk density on asphalts with a high void content

1 Introduction and problem definition

According to the regulations for road construction valid in Germany, asphalt wearing courses have to meet different void content requirements depending on the desired usage properties. Whereas conventional wearing courses are intended to ensure the durability of the pavement by low void contents, by preventing water ingress into the structure and by counteracting oxidative ageing of the bitumen, acoustically effective wearing courses achieve maximum sound level reduction through high voids accessible from the outside. Furthermore, the void content and the degree of compaction are used as contract-relevant deduction criteria for asphalt pavement layers. While the degree of compaction has usually been limited to a minimum level in the interests of durability, the requirements for voids are designed for specific mixes. The range of void content of the nationally standardized asphalt mix types/grades extends from 0 % to 30 % by volume.

Both characteristics - degree of compaction and void content - are based on the determination of the density of the space on the lining or Marshall test specimen in accordance with national test regulations. Depending on the type of mix, this must be carried out in accordance with the correspondingly regulated procedures. For open-pored asphalts, the measuring method (Method D) shall be used and for all other rolled asphalts the immersion weighing method with leather cloth (Method B). When the noise-optimized asphalt wearing courses are tested, method D will be used in addition to method B to gather experience. It is known from experience with the test methods that with increasing void content, the density of test specimens cannot be measured precisely enough with the standardized methods. Especially when the void content accessible from the outside is used as a criterion for assessing the acoustic effectiveness of a road surface layer, a precise and technically comprehensible method must be available.

The research project is intended to recommend a new or at least improved test method based on the findings of previously applied methods. The method should make it possible to determine the volume of asphalt samples with a high void density with improved precision. The method is intended to improve quality assurance.

2 Concept of the study

The investigations were conducted on three types of mix, which cover the entire range of practical application with regard to void content. A conventional asphalt mix of stone mastic asphalt was selected for the lower range of the void content spectrum, an asphalt mix for low noise stone mastic asphalt for the middle range of the void content spectrum and an asphalt mix for open pore asphalt wearing courses with a void content at the upper limit of the spectrum. The asphalt mix for all mix types was produced on an industrial scale and taken from real construction sites. Furthermore, lining samples were included in the investigations. The investigation concept is summarized in the following table (Tab. 2-1).

Method B (determination of bulk density by immersion weighing with a leather cloth), Method D (measuring method) and the method according to TP A Part 82 (determination of bulk density after water absorption in a vacuum) are regulated nationally and are used in practice.

Mix types	SMA 8 S / SMA 8 LA / PA 8						
Origin	Test specimen produced in the laboratory						Expansion samples
Layer Thickness [mm]	25			50			35
Diameter [mm]	100	150	225	100	150	225	150
TP Asphalt-Teil 6 - Method D, measuring	1-4	1-20	1-4	1-4	1-20	1-4	1-20
ASTM D6752 / D6752 M - coated test samples (vacuum bag)	1-4	1-20	1-4	1-4	1-20	1-4	1-20
TP Asphalt-Teil 6 - Method B, leather cloth	1-4	1-20	1-4	1-4	1-20	1-4	1-20
TP Asphalt-Teil 82 - Water absorption in vacuum	1-4	1-4	1-4	1-4	1-20	1-4	°
DIN EN 12697 - 6 - coated test samples (wax)	°	5-8	°	°	5-8	°	°
Volume determination via Laser scanning method	°	9-12	°	°	9-12	°	1-4
Space density determination using gamma radiation	°	13-16	°	°	13-16	°	5-8

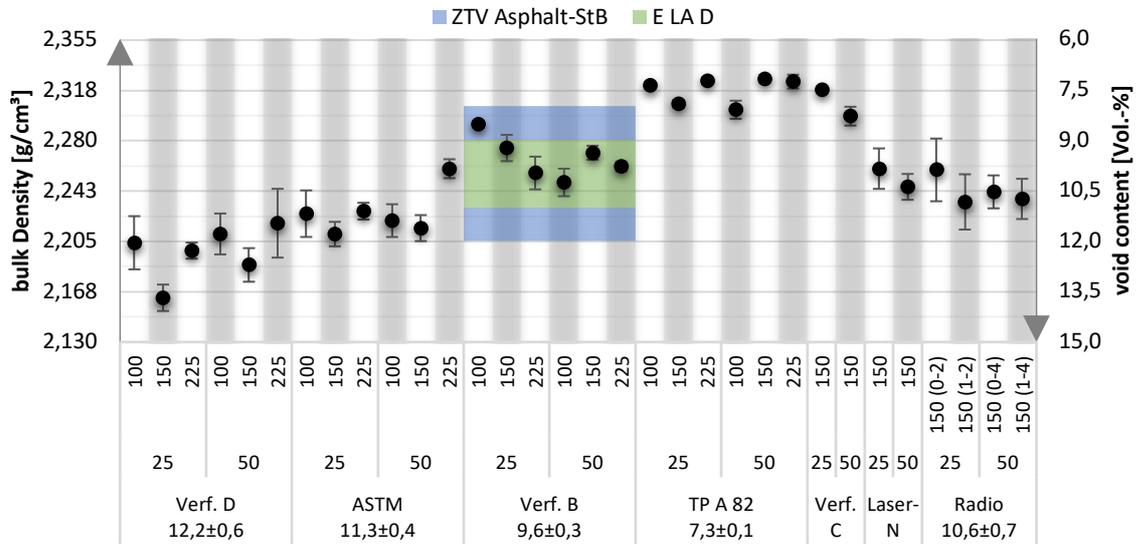
Tab. 2-1: Examination concept on the test specimens (° - was not performed)

The procedures for coating the test pieces are not clearly regulated. The method with a wax coating is also used in areas of soil-physical tests for the determination of bulk density in cohesive soils. Wrapping with a vacuum bag is regulated in an ASTM. Here the test specimen is placed in a vacuum bag and the air is evacuated so that the bag hugs test specimen and its texture.

The laser scanning method uses the latest measurement technology and evaluation algorithms to record the volume of a test specimen by scanning. The determination of density by means of gamma radiation is comparable to the radioisotope probes for density monitoring during installation. This procedure was carried out in a Bast test stand.

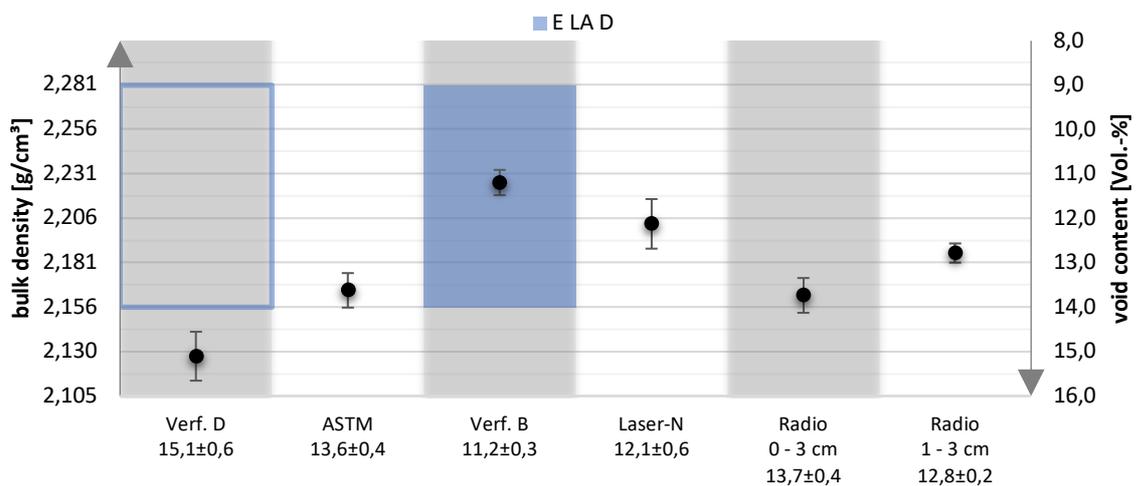
3 Test results

In the following, only the results of the test specimens made of SMA 8 LA are presented. As that type of mix / semi-porous asphalt surface layer should be considered the main focus.



Pic. 3-1: Summary of the results of the bulk density investigations on the mix type Low-noise stone mastic asphalt SMA LA - Method C (7.9 ± 0.2) vol.%, Laser-N (10.1 ± 0.5) vol.% (statistical uncertainty as error indicator)

Method C and method TP A - 82 lead on average to the highest bulk density. The radiometric density determination and the laser scanning method lead to a comparable level with higher scattering under repetitive conditions as method B. The alternative method D for low-noise stone mastic asphalts leads to the lowest bulk density and a deviating level compared to the reference method B. The fact that there can be a deviation between the two methods is not yet shown in the E LA D. The method according to ASTM leads on average to a void content of (11.2 ± 0.4) Vol.-% and tends to have a more precise repeatability than method D.



Pic. 3-2: Summary of the results of the space density investigations on the drill cores of a construction project with SMA 8 LA

The spatial densities of the drill cores from the installed layer show a comparable relation to the laboratory test samples. The required void content of 9 vol.% to 14 vol.% in the reference method was highlighted in blue. All samples without outliers meet the requirements for void content using method B. If method D, which is required in the E LA D for gathering experi-

ence, is used and the same level of the required void content is achieved, the requirement is clearly exceeded by all samples.

4 Influencing factors in the determination of bulk density

In order to assess the suitability of the methods for different areas and applications, all data of the investigations (bulk density and scattering) were analyzed with regard to the influences of the geometrical parameters (specimen height and diameter), specimen mass and characterizing parameters such as void content, texture properties, effective area of the texture and grain-specific parameters. The grain size specific parameters characterize the grading curve, which represents the possibility to control the voids content and the properties of a mix type/type via the composition. The binder content was also taken into account. This never showed any influence on the level of bulk density or its dispersion.

Overall, it was determined that not always the same factors have the same influence on the level of space density and its dispersion. The highest influences can be expected primarily from the grain-specific factors, the voids content and the texture including the effective area of these. Only secondary, effects are expected from the test specimen geometry and the mass. This confirms the national credo to differentiate the methods according to the mix types/types.

5 Conclusions and recommendations

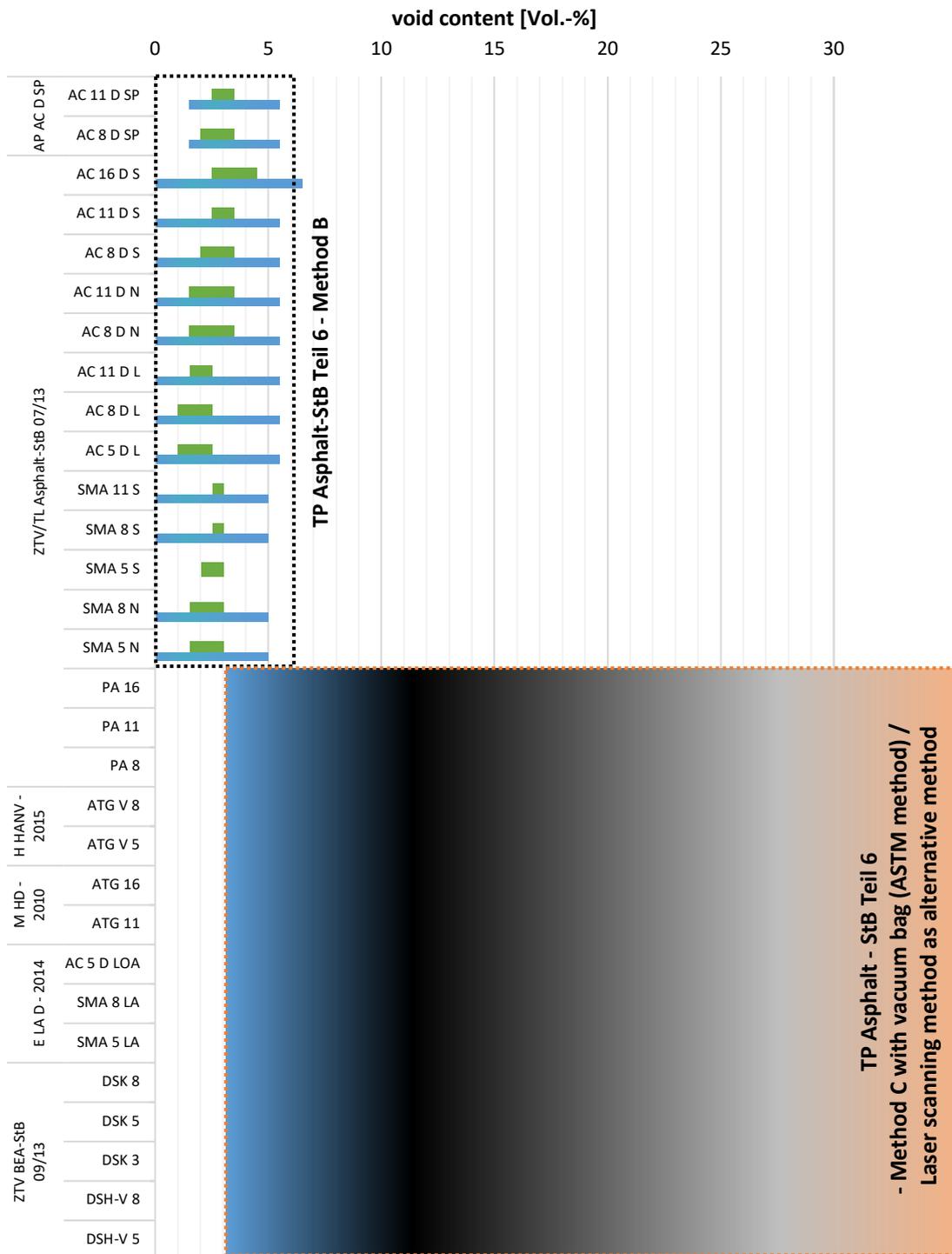
Significant differences between the procedures could be demonstrated, which can have different effects on practice. On the one hand, due to the influences of texture, the evaluation of extension samples with cut surfaces and the Marshall specimen with a texture artificially produced in the laboratory should be reconsidered. Due to the fact that the ASTM method can be expected to have less influence from the texture, it is also recommended for inclusion in the TP Asphalt-StB Part 6, as method C. The European standard DIN EN 12697-6 leaves the type of wrapping open for method C. However, it does not specify the necessary equipment and the execution, which are necessary for a standardized implementation. Therefore, recommendations were made in the report.

Method B is the reference method for determining the bulk density of dense asphalt pavements. According to the investigations carried out, a maximum void content of 6 % by volume would be recommended for this method. With increasing mass and height, as is the case with asphalt binder and base layers, the upper limit for the void content probably widens. The use of method B for asphalt wearing courses with void contents of more than 6% by volume is not recommended due to the high scattering.

For asphalt pavements with a high void content, the modified ASTM method and the laser scanning method seem to be more suitable with regard to scattering. The ASTM method leads to a quantitatively higher void content, which can however be determined more precisely than with the currently valid reference method, method D. For this purpose, the necessary equipment and materials would have to be purchased in the testing laboratories. The advantage is that all equipment and materials are manufactured in large series and are available without restrictions.

Alternatively, the laser scanning method has clear strengths, as it has hardly any dependencies with regard to the scattering of the test results and allows a reliable differentiation between the texture of a test specimen and the volumes associated with the bulk density. Regarding to the availability of equipment, it currently shows a clear weakness compared to the ASTM methods.

In summary, the following test scheme is recommended for common asphalt wearing courses or comparable asphalt mix types and grades.



Pic. 5-1: Recommendation for the application of the investigated test methods of bulk density determination to common asphalt wearing courses and comparable types of mix

Inhalt

1	Einleitung	12
2	Problemstellung	13
3	Untersuchungskonzept.....	14
4	Grundlagen	15
4.1	Messprinzip der Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte.....	15
4.1.1	Tauchwägung - Verfahren B	15
4.1.2	Ausmessverfahren - Verfahren D.....	16
4.1.3	Einwachsen von Prüfkörpern - Verfahren C	18
4.1.4	Umhüllen von Prüfkörpern mit Vakuumbutel – ASTM-Verfahren.....	20
4.1.5	Wasseraufnahme unter Vakuum – TP A, Teil 82	25
4.1.6	Radiometrische Dichtebestimmung.....	25
4.1.7	Volumenbestimmung mit dem Laserabtastungsverfahren.....	27
4.2	Statistische Methoden.....	29
5	Mischgutzusammensetzung	31
6	Probekörperherstellung	32
7	Ergebnisse der Raumdichtebestimmung	34
7.1	Splittmastixasphalt SMA	34
7.2	Lärmarmes Splittmastixasphalt SMA LA.....	36
7.3	Offenporiger Asphalt PA	37
8	Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung	39
8.1	Grundlagen.....	39
8.2	Auswertung des Fragebogens	39
8.3	Auswertung der Ergebnisse	41
8.4	Schlussfolgerungen aus der Vergleichsuntersuchung.....	43
9	Einflussfaktoren bei der Raumdichtebestimmung.....	43
10	Zusammenfassung und Empfehlungen	50
10.1	Quantifizierung der Einflüsse auf die Raumdichtebestimmung.....	50
10.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse von Laborprüfkörpern auf Bohrkerne	54
10.3	Empfehlungen für das nationale Regelwerk.....	56
10.3.1	Empfehlung für eine neues Verfahren C - Umhüllung mit Vakuumbuteln in der TP Asphalt-StB Teil 6.....	56
10.3.2	Empfehlung für die Grenzwerte und Toleranzen	58
10.4	Weiterer Forschungsbedarf.....	58
11	Literaturverzeichnis	59
12	Tabellenverzeichnis	60
13	Abbildungsverzeichnis.....	62
Anlage 1	64
	Zusammenfassung der Ergebnisse	64

1 Einleitung

Asphaltdeckschichten haben nach dem in Deutschland gültigen Regelwerk¹ für den Straßenbau, in Abhängigkeit der gewünschten Gebrauchseigenschaften, unterschiedliche Hohlraumgehaltsanforderungen zu erfüllen. Während konventionelle Deckschichten durch geringe Hohlraumgehalte die Dauerhaftigkeit der Befestigung sicherstellen sollen, in dem sie den Wasserzutritt in die Konstruktion verhindern und einer oxidativen Alterung des Bitumens entgegenwirken, ist entsprechend dem Schlussbericht „Weiterentwicklung offenporiger Asphalte bei akustisch wirksamen Deckschichten“ (Müller BBM GmbH, 11/2006) ein Maximum der Schallpegelminderung durch hohe von außen zugängliche Hohlräume erreichbar. Weiterhin wird der Verdichtungsgrad bei allen Schichten des Asphaltoberbaus als vertragsrelevantes Abzugskriterium angewandt¹. Bei Asphaltdeckschichten und teilweise bei Asphaltbinderschichten wird der Hohlraumgehalt auch als abzugsrelevantes Merkmal hinzugezogen. Während der Verdichtungsgrad zumeist im Sinne der Dauerhaftigkeit auf mindestens 98 % limitiert wurde, sind die Anforderungen an den Hohlraumgehalt mischgutspezifisch ausgelegt. Die Spannweite des Hohlraumgehaltes der Asphaltmischgutarten/-sorten gemäß deutschem Regelwerk reicht von 0 Vol.-% bis 30 Vol.-% (vgl. Bild 1-1).

Beiden Merkmalen - Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt - liegt die Bestimmung der Raumdichte am Ausbaustück oder Marshallprobekörper entsprechend den „Technischen Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 6: Raumdichte von Asphalt-Probekörpern“ (TP A, Teil 6) (FGSV Nr. 756, 2016) zugrunde. Diese ist, in Abhängigkeit von der Mischgutsorte, nach den entsprechend geregelten Verfahren durchzuführen. Bei Offenporigen Asphalten ist das Ausmessverfahren (Verfahren D) anzuwenden und bei allen anderen Walzasphalten das Tauchwägewerfahren mit Ledertuch (Verfahren B). Nur bei lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten entsprechend der E LA D (FGSV Nr. 739, 2014) soll zur Erfahrungssammlung neben dem Verfahren B auch das Verfahren D angewandt werden.

Vor der Einführung der europäischen Prüfnormen erfolgte die Festlegung des anzuwendenden Prüfverfahrens nach dem erwarteten Hohlraumgehalt der Prüfkörper in der DIN 1996-7. Bei einem Hohlraumgehalt über 12 Vol.-% (vgl. oranger Bereich in Bild 1-1) und bis einschließlich der TP A, Teil 6 von 2010 bei Asphalttragschichten wurde das Ausmessverfahren angewandt. Die EN 12697 empfiehlt im Anhang A eine Begrenzung der Tauchwägung mit Ledertuch auf einen Hohlraumgehalt bis maximal 5 Vol.-% für Asphalte mit kleinen Hohlräumen und maximal 4 Vol.-% für Splittmastixasphalt. Die Umhüllung von Probekörpern wird bis zu einem Hohlraumgehalt von maximal 15 Vol.-% und bei Asphalten mit rauen Oberflächen (vgl. schwarze Schraffierung in Bild 1-1) empfohlen. Es wird darauf hingewiesen, dass das Umhüllungsverfahren für Ausbauproben aufgrund des möglichen Wassers in der Probe ungeeignet ist. Für Prüfkörper mit regelmäßigen Oberflächen und einem Hohlraumgehalt von über 15 Vol.-% wird das Ausmessverfahren empfohlen.

Abweichend von den in Europa üblichen Verfahren wird z.B. in den USA mit der Prüfvorschrift ASTM D 6752-03 ein alternatives Verfahren angewendet, um das Volumen

¹ Empfehlung für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA - (FGSV Nr. 739, 2014); Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt - (FGSV Nr. 799, Ausgabe 2007 / Fassung 2013), Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen - (FGSV Nr. 797, 07/13), Hinweise für die Planung und Ausführung von alternativen Bindeschichten - (FGSV Nr. 737, 2015), Merkblatt für die Herstellung von Halbstarren Deckschichten - (FGSV Nr. 729, 2010), Hinweise für die Herstellung von Abdichtungssystemen aus Hohlraumreichen Asphalttraggerüsten mit Nachträglicher Verfüllung für Ingenieurbauten aus Beton - (FGSV Nr. 776, 2015), Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen - (FGSV Nr. 798, 09/13)

bei hohlraumreichen Asphaltarten zu ermitteln. Hierbei wird der Prüfkörper unter Vakuum in eine Folie eingeschweißt und die Raumdichte anschließend im Tauchwägetverfahren bestimmt. Weiterhin sind in der Prüfpraxis des Straßenbaus bisher nicht angewandte Verfahren denkbar, mit denen das Volumen von Probekörpern mittels Laserabtastung der Oberfläche oder radiometrischen Verfahren ermittelt wird.

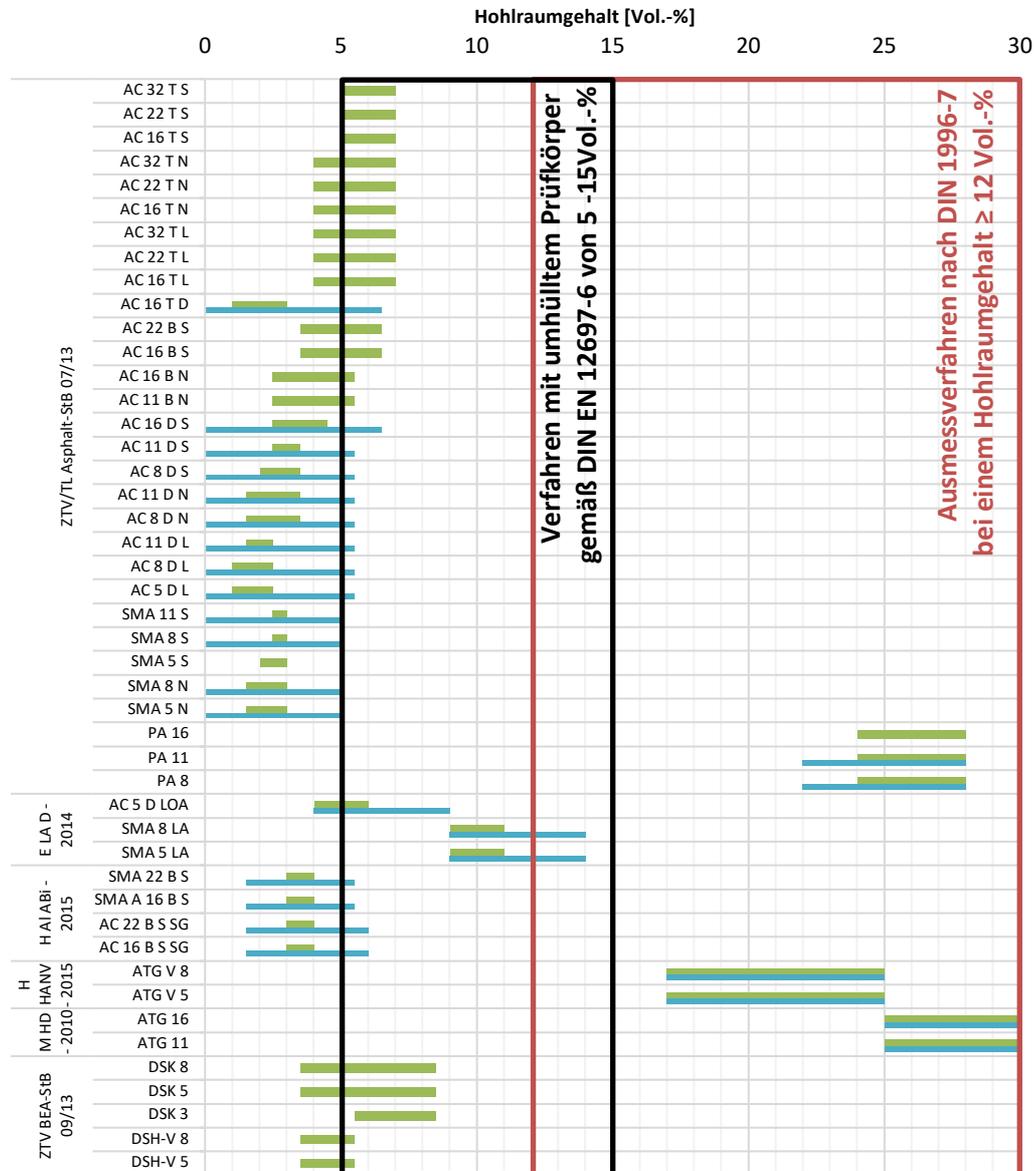


Bild 1-1: Bereiche des Hohlraumgehaltes in Erstprüfungen (grün) und Kontrollprüfungen (blau) für die Walzasphaltnischgutarten und -sorten

2 Problemstellung

Aus den Erfahrungen mit den Prüfverfahren ist bekannt, dass mit zunehmendem Hohlraumgehalt die Raumdichte an Probekörpern mit den standardisierten Verfahren nicht präzise genug erfasst werden kann. Vor allem, wenn der von außen zugängliche Hohlraumgehalt als Kriterium für die Beurteilung der akustischen Wirksamkeit einer Fahrbahndeckschicht herangezogen wird, muss ein präzises und technisch nachvollziehbares Verfahren zur Verfügung stehen.

Durch das Forschungsvorhaben soll, auf Basis der Erkenntnisse aus bisher angewandten Verfahren, ein neues oder zumindest verbessertes Prüfverfahren entwickelt

werden. Das Verfahren soll es ermöglichen, die Volumenermittlung zur Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphaltprobekörpern mit verbesserter Präzision durchzuführen. Das Verfahren soll die Qualitätssicherung verbessern und möglichst bauvertraglich sichere Werte liefern.

3 Untersuchungskonzept

Die Untersuchungen wurden an drei Mischgutarten durchgeführt, die bezüglich des Hohlraumgehaltes die gesamte Spannweite der Praxis abdecken. Ausgewählt wurden ein konventionelles Asphaltmischgut aus Splittmastixasphalt für den unteren Bereich des Hohlraumgehaltsspektrums, ein Asphaltmischgut für lärmarmen Splittmastixasphalt für den mittleren Bereich und eine Asphaltmischgut für offenporige Asphaltdeckschichten mit einem Hohlraumgehalt an der Obergrenze des Spektrums. Das Asphaltmischgut für alle Mischgutsorten wurde großtechnisch hergestellt und bei der Ausführung realer Baumaßnahmen entnommen.

In einem ersten Schritt sollten die Einflüsse aus Geometrie und Masse der Prüfkörperform auf die Wiederholpräzision der Verfahren ermittelt werden. Hierzu wurden aus dem entnommenen Mischgut Asphalt-Probepplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt. An den Asphalt-Probepplatten wurde die Raumdichte nach dem Verfahren B bei den Splittmastixasphalten und nach Verfahren D bei dem offenporigen Asphalt ermittelt, um das Erreichen eines anforderungsgerechten Verdichtungsgrades und Hohlraumgehaltes festzustellen. Die Platten wurden eindeutig gekennzeichnet, sodass für den späteren Verlauf der Untersuchungen eine Rückverfolgbarkeit zur Herkunft der Prüfkörper möglich ist. Aus den Asphalt-Probepplatten wurden maximal 20 Bohrkerne entnommen und nach nachfolgendem Konzept untersucht (vgl. Tab. 3-1). Die Tabelle zeigt die Anzahl der geprüften Probekörper je Verfahren und Geometrie und die Verwendung der Probekörper bei mehreren Verfahren. Diese derartig hergestellten Prüfkörper werden nachfolgend als Laborprüfkörper bezeichnet. Das Verfahren B, D und nach ASTM wurde an allen Laborprüfkörpern mit einem Durchmesser von 150 mm durchgeführt, um eine repräsentative Auswahl für die nachfolgenden Untersuchungen vornehmen zu können.

Mischgutarten	SMA 8 S / SMA 8 LA / PA 8					
	25			50		
Schichtdicke [mm]						
Durchmesser [mm]	100	150	225	100	150	225
TP Asphalt-Teil 6 - Verfahren D, Ausmessen	1-4	1-20	1-4	1-4	1-20	1-4
ASTM D6752 / D6752 M - umhüllte Probekörper (Plastiktüte)	1-4	1-20	1-4	1-4	1-20	1-4
TP Asphalt-Teil 6 - Verfahren B, Ledertuch	1-4	1-20	1-4	1-4	1-20	1-4
TP Asphalt-Teil 82 - Wasseraufnahme im Vakuum	1-4	1-4	1-4	1-4	1-20	1-4
DIN EN 12697 - 6 - umhüllte Probekörper (Wachs)	°	5-8	°	°	5-8	°
Volumenbestimmung über Laserabtastungsverfahren	°	9-12	°	°	9-12	°
Raumdichtebestimmung mittels Gammastrahlung	°	13-16	°	°	13-16	°
Raumdichtebestimmung nach neu entwickelten Verfahren	17 - 20	17 - 20	17 - 20	17 - 20	17 - 20	17 - 20

Tab. 3-1: Untersuchungskonzept an Laborprüfkörpern (° - wurde nicht durchgeführt)

Um eine Abschätzung von der Wiederholpräzision auf die Vergleichspräzision durchführen zu können, wurde an Laborprüfkörpern eines Lärmarmen Splittmastixasphaltes (SMA LA) eine Vergleichsuntersuchung mit 5 anderen nach RAP Stra – Fachgebiet G anerkannten Laboren durchgeführt. Jedes Labor erhielt 4 Prüfkörper an welchen die Raumdichte nach Verfahren B und dem Alternativverfahren D ermittelt werden sollten.

An Bohrkernen ($\varnothing 150\text{mm}$) aus eingebauten Schichten realer Baumaßnahmen wurde die Raumdichte nach dem Verfahren B und D der TP A, Teil 6, dem ASTM-Verfahren mit Vakuumbbeutel, über die Laserabtastung und die Radiometrische Methode bestimmt. Die Bohrkernentstammen alle jeweils aus einer Fertigerbahn und wurden auf einer Länge von maximal 10 m entnommen. Die Bohrkern des offenporigen Asphalt konnten aus dem Seitenstreifen einer Bestandstrecke mit einer Nutzungsdauer von 8 Jahren gewonnen werden. Die Bohrkern der Splittmastixasphaltes entstammen aus neu hergestellten Asphaltdeckschichten.

4 Grundlagen

4.1 Messprinzip der Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte

Für die Untersuchungen wurden unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte angewandt. Die Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte unterscheiden sich durch die Ermittlung des Volumens. Die Masse des Prüfkörpers ist in jedem Verfahren als Trockenmasse in g mit einer Genauigkeit von 0,1 g bestimmt worden. Hiervon ausgenommen ist die Bestimmung der Raumdichte über das radiometrische Verfahren. Die Bestimmung des Volumens bzw. der Raumdichte wird in den folgenden Abschnitten für die jeweiligen Prüfverfahren näher erläutert.

Die nachfolgend vorgestellten Messverfahren können wie folgt untergliedert werden.

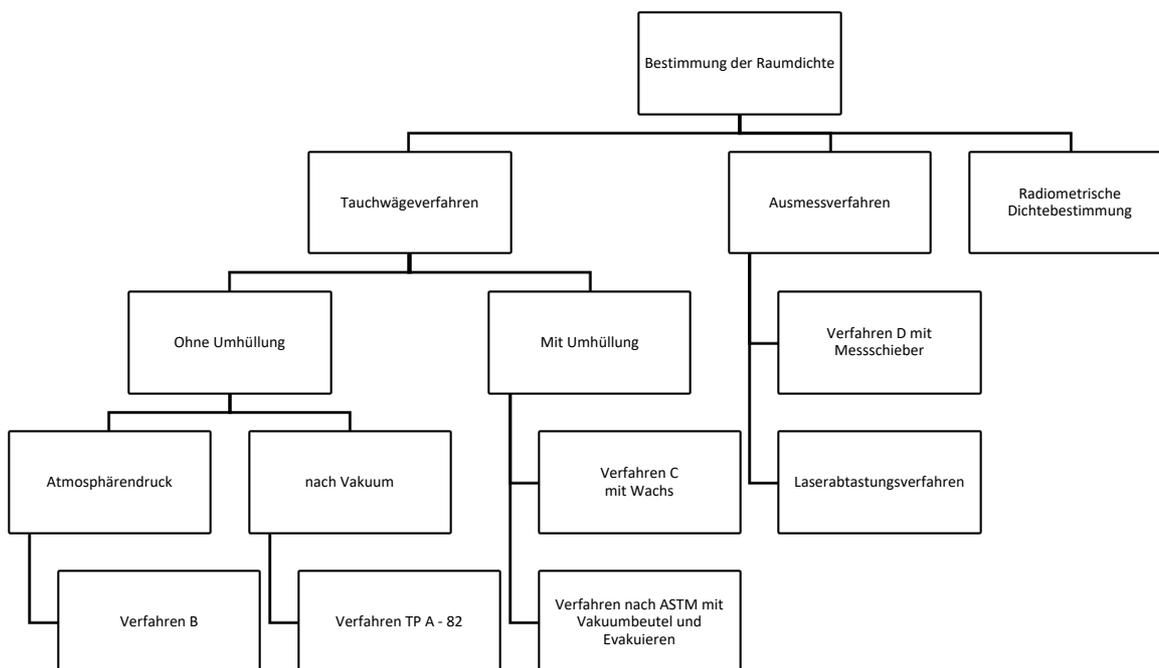


Bild 4-1: Gliederung der Verfahren nach den Messprinzipien

4.1.1 Tauchwägung - Verfahren B

Das Messprinzip der Tauchwägung ist seit 1929 national geregelt und stellt mit eines der ältesten Prüfverfahren im Straßenbau dar. Die Methodik ist als Verfahren B in der DIN EN 12697 – Teil 6 beschrieben und national in der TP A, Teil 6 präzisiert. Das Prinzip der Volumenbestimmung über die Tauchwägung ist auf das Archimedische

Prinzip zurückzuführen. Für hohlraumfreie Proben lässt sich das Prinzip wie folgt herleiten.

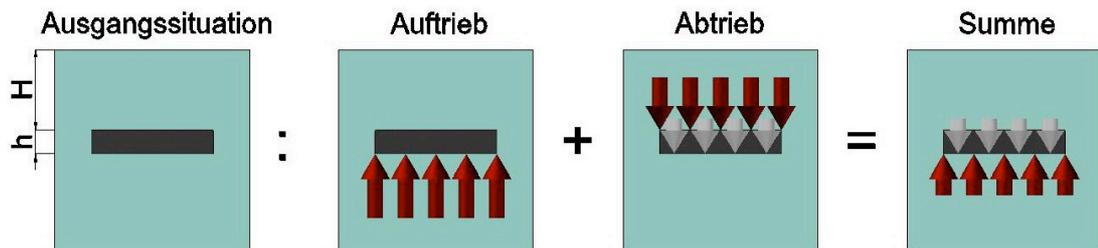


Bild 4-2: Archimedisches Prinzip der Tauschwägung

Wenn ein Körper mit der Höhe (h) um das Maß (H) in Wasser getaucht wird, so erfährt dieser einen Auftrieb. Daneben wirkt der Abtrieb resultierend aus dem aufliegenden Wasser und dem Eigengewicht der Probe. Über die Superposition der Spannungen kann die Abhängigkeit des Volumens über die Prüfkörperhöhe, -durchmesser und Masse mit dem Archimedischen Prinzip beschrieben werden. Bei einer gleichbleibenden Querschnittsfläche der Proben und einer gleichbleibenden Wasserdichte ist das Volumen der Proben nur von der Masse und der Höhe abhängig. Für Proben mit von außen zugänglichen Hohlräumen erfolgt eine Korrektur des Volumens über die Feuchtmasse. Infolge der europäischen Harmonisierung der Normen wurde die Bestimmung der Feuchtmasse geändert. In der DIN 1996 sollte die Feuchtmasse bestimmt werden, indem der Probekörper zehn Sekunden über die Kante abtropft und dann gewogen wird. Die europäische Normung bestimmt die Feuchtmasse, indem die nasse Oberfläche des Probekörpers mit einem feuchten Ledertuch trocken getupft oder gerollt wird. Dabei wurde nicht präzisiert, ob und in welche Richtung texturierte bzw. geschnittene Oberflächen zu halten sind. Beide Verfahren sollen den auf der Oberfläche befindlichen Wasserfilm entfernen, jedoch nicht das Wasser in den von außen zugänglichen Hohlräumen. Im Vergleich zum Verfahren D (siehe Abschnitt 4.1.2) - der Raumdichtebestimmung durch Ausmessen - ist das gemessene Volumen beider Methoden geringer. Gründe hierfür können sein, dass nicht das komplette Wasser in den oberflächennahen Hohlräumen verbleibt, weniger Wasser durch den Zutritt in die Hohlräume verdrängt wird und folglich ein höherer Auftrieb zu geringeren Volumen führt.

4.1.2 Ausmessverfahren - Verfahren D

Die Methodik ist als Verfahren D in der europäischen Prüfnorm beschrieben und national präzisiert. Die Präzision des Verfahrens wurde bisher noch nicht ermittelt. Aus unveröffentlichten Ergebnissen einer Vergleichsuntersuchung (ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH, 2017) ist bekannt, dass die Präzision unter Vergleichsbedingungen in etwa um den Faktor 2 schlechter zu beurteilen ist, als beim Verfahren B.

Das Volumen ist durch Ausmessen an selbst definierten und gekennzeichneten Stellen zu bestimmen (vgl. Bild 4-3). Gemäß der Technischen Prüfvorschriften sollen die Abmessungen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm bestimmt werden. Die Höhe wird über vier gleichmäßig verteilte Messpunkte mit einem Abstand von 10 mm zum Rand bestimmt. Der Durchmesser wird auf halber Höhe und den Grundflächen über zwei zueinander orthogonal liegende Geraden bestimmt. Die arithmetischen Mittelwerte der Abmessungen von Höhe und Durchmesser (vgl. Bild 4-3) gelten als charakteristische Abmessungen für den Prüfkörper. Angesichts des Umfangs an Messungen sollten theoretisch mögliche Exzesse des Körpers, also eine vom idealen Zylinder abweichende Form, in der Mittelwertbildung hinreichend berücksichtigt werden. Das Volumen schließt oberflächentangierende Hohlräume mit in die Berechnung der Raumdichte ein.

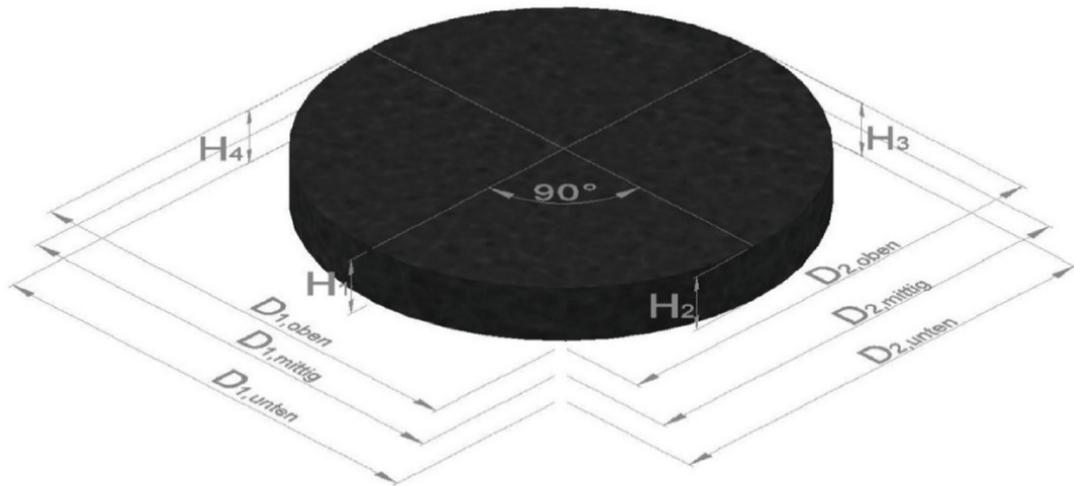


Bild 4-3: Messprinzip des Ausmessverfahrens – Verfahren D
nach dem Prinzip der DIN EN 12697-29 (DIN EN 12697-29, 12/2002)

Die Fehlerquellen des Verfahrens sind allein schon auf die Anzahl der Messungen und den damit verbundenen Laboranteneinfluss zurückzuführen. Weiterhin ist die Messung der halben Höhe notwendig, was bei schiefen Bohrkernen zu Fehlbeurteilungen führen kann. Nicht berücksichtigt werden beim Ausmessverfahren Ausbrüche und lokale Verformungen am Prüfkörper. Diese treten vor allem bei Bohrkernen aus neueren Schichten mit höheren Hohlraumgehalten, oder geringem Widerstand gegen kohäsive Kräfte auf, wenn die entsprechende Bohrtechnik nicht im tadellosen Zustand ist oder falsch bedient wird, die Wasserzuführung ungenügend oder/und die Temperaturen zu hoch sind. Dies trifft auch auf die anschließende Schichtentrennung zu, bei welcher Körner an der Schichtgrenze verloren gehen können. Bei Asphaltdeckschichten mit einer längeren Nutzungsdauer kann es auch durch die klimatischen und mechanischen Beanspruchungen zu Kornverlusten an der Oberfläche kommen (vgl. Bild 4-4), was die Präzision ebenfalls nachteilig beeinflusst.

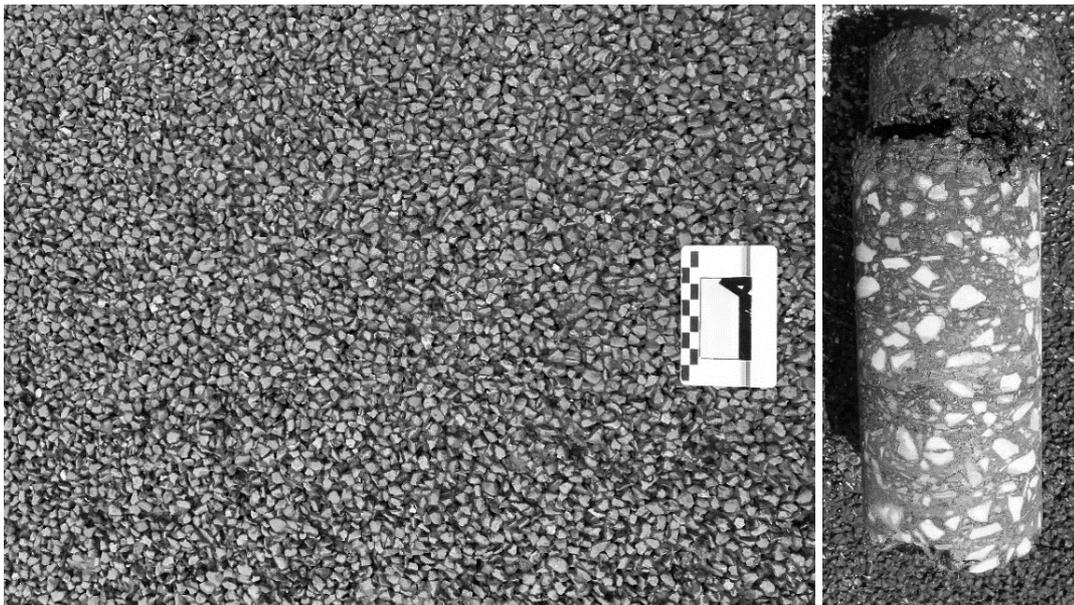


Bild 4-4: Fahrbahnoberfläche eines PA 8 mit einer Nutzungsdauer von über 8 Jahren (links); Bohrkern aus einer Fahrbahn mit einer offroporigen Asphaltdeckschicht, gebohrt bei über 30°C Lufttemperatur (rechts).

Um die Auswirkungen dieser Imperfektionen zu quantifizieren, wurde in Office Excel ein Zufallsgenerator generiert, mit dem der Einfluss von Kornverlusten am Bohrkern für einen PA 8 abgeschätzt werden kann. Bei Verlust eines bestimmten Anteils an Körnern in der Oberfläche nimmt die Masse des Prüfkörpers ab, während durch das Ausmessverfahren eine ideale Umhüllende bzw. ein Zylinder gebildet wird, welcher den Kornverlust nicht berücksichtigt. Der Zufallsgenerator generiert 1.000 kubische Körner mit den Abmessungen zwischen 5 und 8 mm. Je nach Vorgabe des prozentualen Kornverlustes im Bezug zur Oberfläche des Prüfkörpers werden aus den gebildeten Körnern über eine Zufallsziehung eine entsprechende Anzahl an Körnern gewählt und deren Masse vom Körper abgezogen. Das Volumen des Prüfkörpers bleibt gleich. Nachfolgend ist ein Ergebnis dieser Berechnungen im Bezug zur Prüfkörperhöhe, dem Verdichtungsgrad und dem Hohlraumgehalt Bild 4-5 in abgebildet.

Mit zunehmenden Kornverlust ist zu erwarten, dass der Einfluss auf den Verdichtungsgrad und den Hohlraumgehalt exponentiell zunimmt. Dies wird durch eine zunehmende Prüfkörperhöhe/-volumen/-masse kompensiert. Durch die Idealisierung der Prüfkörpergeometrie nimmt der Verdichtungsgrad ab und kann zu unbegründeten Mängelansprüchen führen, da diese weder auf die Einbauleistung noch auf die Zusammensetzung und Eigenschaften des Asphaltmischgutes zurückzuführen sind, sondern Verfahrensspezifisch abgeleitet werden können. Deutlich wird dies ab einem Kornverlust von ca. 9 %. Es wird abgeschätzt, dass ein Kornverlust in dieser Größenordnung nicht ohne andere Einflüsse, wie fehlendem Haftverhalten oder zu wenig Wasser beim Bohren, möglich ist.

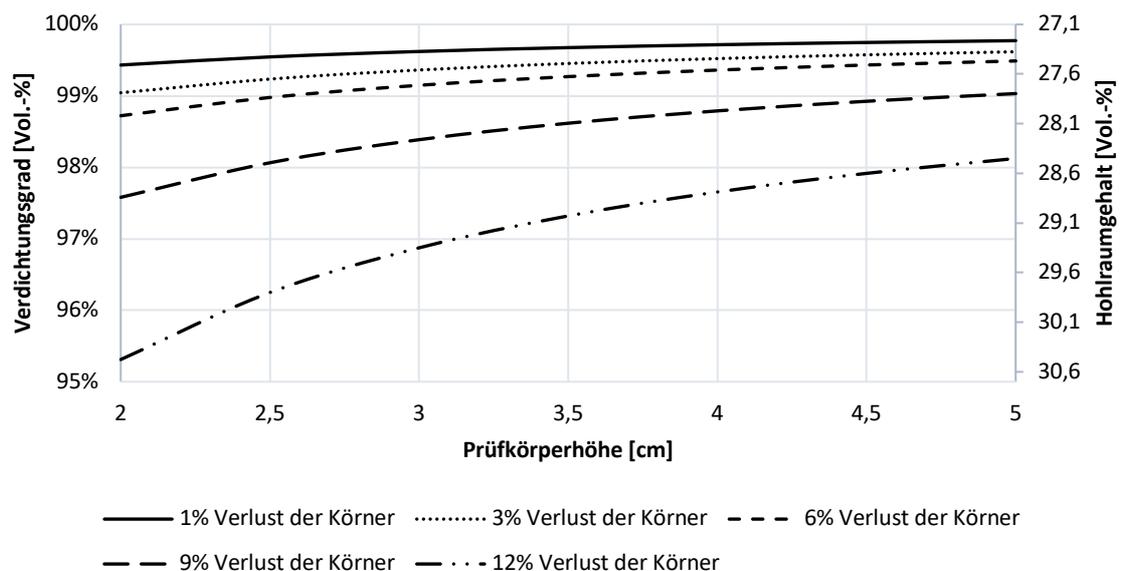


Bild 4-5: Veränderung des Verdichtungsgrades und des Hohlraumgehaltes bei unterschiedlichen Prüfkörperdicken durch Verlust von Körnern an den Prüfkörpern

4.1.3 Einwachsen von Prüfkörpern - Verfahren C

Das Verfahren ist als Verfahren C in der europäischen Prüfnorm beschrieben. National werden keine Präzisierungen in den Technischen Prüfvorschriften vorgenommen. Ziel ist es, die von außen zugänglichen Hohlräume mit einer bekannten Masse Paraffin zu verschließen. Die Bestimmung des Volumens erfolgt dann mittels Tauchwägung, bei der keine Feuchtmasse gemessen wird. Das Verfahren umgeht somit die Problematik einer Messung der Feuchtmasse.

Die Auftriebskraft der spezifischen leichten Masse des Paraffins wird rechnerisch von dem Volumen des Prüfkörpers abgezogen. Das Paraffin wird in flüssiger Form kurz über dem Schmelzpunkt (70 ± 5) °C als Umhüllung aufgebracht. Bei dem Vergleich zur

Volumenbestimmung durch Ausmessen sind geringere Volumen bei diesem Verfahren zu erwarten, da das Paraffin in die oberflächennahen Hohlräume eindringt.

Da die europäische Norm keine hinreichenden Erläuterungen zur Durchführung gibt, wird nachfolgend kurz die projektinterne Durchführung zur Paraffinierung erläutert.

Das verwendete Paraffin wurde aus handelsüblichen Teelichtern gewonnen. Nachdem der Docht und die Aluminiumschale entfernt wurden, wurde für einen Tastversuch das Paraffin stufenförmig ab 50 °C in 5 K Schritten erwärmt. Wenn das Paraffin nicht nach 5 Minuten auf einer Temperaturstufe farblos, flüssig und frei von Stücken war, wurde die Temperatur erhöht. Dieses Vorgehen führt nicht zur Identifizierung des Schmelzpunktes, reichte jedoch für die Sicherstellung der Verarbeitbarkeit aus.

Die Prüfkörper wurden mit Hilfe einer Zange in das flüssige Paraffin getaucht und 5 Sekunden geschwenkt. Die Anzahl der Umhüllungen hing von der Beschaffenheit der Textur und Paraffinschicht ab. Der Vorgang wurde so oft wiederholt bis die komplette Oberfläche blasenfrei mit Paraffin umhüllt war. Dies erforderte mindestens 3 Wiederholungen. Mit zunehmendem Hohlraumgehalt bzw. Volumen waren mehrere Durchgänge nötig. Lokale Blasen konnten herausgedrückt und mit dem noch streichfähigen Paraffin überzogen werden. Die fertig paraffinierten Prüfkörper wurden bis zur Prüfung auf Ölpapier gelagert. Einen Eindruck der paraffinierten Prüfkörper vermitteln die Abbildungen in Tab. 4-1.

Mischgutart	Vor dem Paraffinieren	Nach dem Paraffinieren
SMA 8 S		
SMA 8 LA		
PA 8		

Tab. 4-1: exemplarische Prüfkörper der Mischgutarten vor und nach dem Paraffinieren

In Bild 4-6 ist ein Prüfkörper nach einem Durchgang abgebildet. Die Pfeile kennzeichnen die von außen sichtbaren Stellen noch ohne Paraffinüberzug. Anhand dessen wird auch der Nachteil bei der Durchführung des Verfahrens ersichtlich. Es kann nicht nachträglich geprüft werden, ob der Prüfkörper vollständig umhüllt ist, bzw. nach der Tauchwägung noch im Inneren trocken geblieben ist.

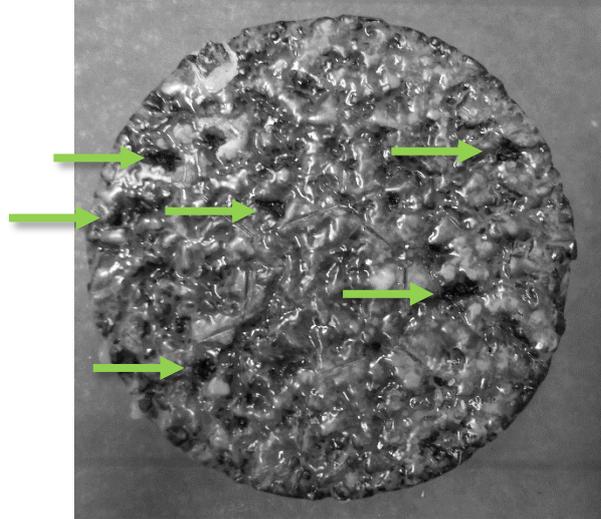


Bild 4-6: Prüfkörper (SMA 8 LA) nach einem Durchgang Paraffinieren mit Kennzeichnung der noch erkennbaren Fehlstellen

4.1.4 Umhüllen von Prüfkörpern mit Vakuumbbeutel – ASTM-Verfahren

Die Durchführung und Randbedingungen sind in der „Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method“ (ASTM D6752-03, 01/2004) - im Nachfolgenden als ASTM bezeichnet - beschrieben. Grundlegend ist das Verfahren der Raumdichtebestimmung durch Umhüllung der Prüfkörper zuzuordnen. In der DIN EN 12697-6 wird die Möglichkeit der Umhüllung grundsätzlich beschrieben, wobei jedoch keine nähere Spezifikation des Umhüllungsmaterials getroffen wird.

Das Verfahren ist gemäß der ASTM für Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm und 150 mm bestehend aus Splittmastixasphalt oder offenporigen Asphalt bzw. stark ausgeprägten Texturen oder miteinander kommunizierenden Hohlräumen geeignet. Dies weicht von der europäischen Normung ab. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass Prüfkörper mit rauen Oberflächen und Folien als Umhüllung, eine Wahrnehmung von Texturporen als innere Hohlräume veranlassen. Dies führt zu einer Unterschätzung der Raumdichte. Für Bohrkerne und Ausbaustücke wird das Verfahren in der europäischen Norm aufgrund des möglichen Wassers im Prüfkörper als ungeeignet deklariert.

Da sich das Messprinzip von dem Verfahren C nicht wesentlich unterscheidet, werden im Nachfolgenden die Durchführung und Randbedingungen nach ASTM näher beschrieben.

Die Prüfkörper werden nach der Ermittlung der Trockenmasse in Folien (Schichtdicke zwischen 100 μm und 150 μm) eingepackt. Die Folie wird mit einer 0,93 kW Pumpe in weniger als 60 s auf einen Mindestdruck von 10 mm Hg², bezogen auf den Luftdruck auf Meereshöhe, evakuiert. Hierfür wird in den USA ein spezielles Gerät zum Verkauf angeboten. Nach dem Evakuieren wird eine Tauchwägung am umhüllten Prüfkörper durchgeführt. Die ASTM sieht vor, nach der Tauchwägung den Prüfkörper aus dem

² Entspricht ca. 1.333 Pa bzw. ca. 98 %. Vakuumaschinen geben zumeist ein prozentuales Niveau des Vakuums an. Dies bezieht sich auf das Niveau auf Meereshöhe.

Beutel zu nehmen, um die Trockenmasse zu validieren. Dies ermöglicht eine nachträgliche Kontrolle der Dichtigkeit im Unterschied zum Einwachsen von Prüfkörpern.

Um eine nationale Umsetzung mit entsprechendem Support zu testen, wurden Vakuumerätehersteller aus dem Bereich der Verpackungsindustrie und Küchentechnik angeschrieben. Auf Grund der nachfolgenden Gespräche und der technischen Gerätespezifikation wurde ein Gerät der Nordvac GmbH (Boss Vakuum) ausgewählt und nach ersten Tastversuchen auch für die Laborversuche eingesetzt. Mit dem Vakuumschrankmodell NT 21 (siehe Bild 4-7) können unterschiedliche Stufen des Vakuums in Prozent angefahren werden. Weiterhin lässt die Kammergröße, bei Verwendung unterschiedlicher Größen an Beuteln, Probekörperdurchmesser von 100 bis 225 mm zu. Somit konnten neben den geforderten Konfigurationen der ASTM auch weitere Messungen durchgeführt werden, um Festlegungen für die Messdurchführung ableiten zu können. Die Versiegelung erfolgte im Gerät mit einer doppelten Schweißnaht, wobei die Zeit der Versiegelung den Foliendicken angepasst werden muss.



Bild 4-7: Im Projekt verwendete Vakuummaschine vom Typ NT 21 der Fa. Boss Vakuum

In einem ersten Schritt wurden unterschiedliche Foliendicken getestet. In Europa sind Vakuumfolien/-beutel, welche den Spezifikationen der ASTM entsprechen, bzw. diese erfüllen, mit Dicken von 90 μm und 150 μm Standard. Andere Foliendicken werden nur auf Anfrage hergestellt. Daher wurden vorab beide in Frage kommenden Dicken getestet. Bei einer Foliendicke von 90 μm konnte bereits nach wenigen Versuchen festgestellt werden, dass die scharfen Kanten der Prüfkörper die Folie penetrieren, sodass das Vakuum nicht gehalten wird.

Um den Einfluss der Foliendicke auf die Raumdichtebestimmung dennoch quantifizieren zu können, wurden mehrere Folien ineinander gesteckt. Somit konnten rechnerische Foliendicken von 150 μm , 240 μm und 300 μm untersucht werden. Die Untersuchungen wurden an je vier Prüfkörpern aus PA 8 mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 25 mm und 50 mm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 4-8 zusammengefasst.

Mit abnehmender Foliendicke schmiegt sich die Folie bzw. Einhüllende in die Poren der Textur immer mehr an. Somit wird das bestimmte Volumen immer kleiner und die Raumdichte größer. In Bezug auf den Hohlraumgehalt bedeutet dies pauschal im Mittel eine Änderung von 1 Vol.-% je 150 μm Foliendicke. Dieser Effekt, scheint von der Art des Evakuierens abhängig zu sein. Die verwendete Vakuummaschine entzieht aus der kompletten Kammer die Luft bis zu einem definierten Druck. Dann wird der Beutel am Schweißbalken versiegelt und im Anschluss mit einem Luftstoß bzw. Druckausgleich

die Kammer wieder auf Normaldruck gebracht. Dieser spontane Druckausgleich scheint die Folie in die Texturporen zu drücken.

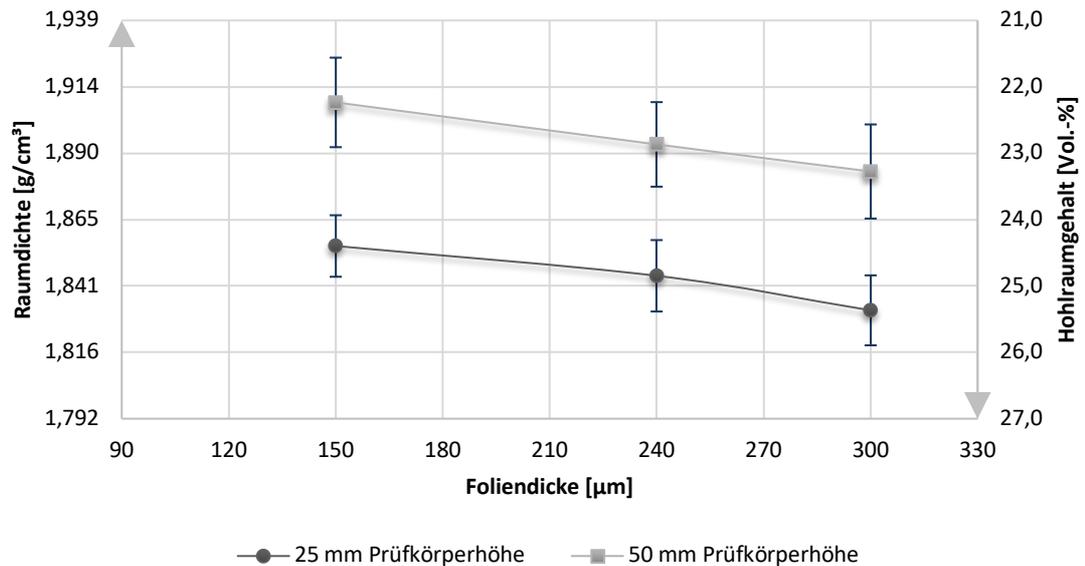


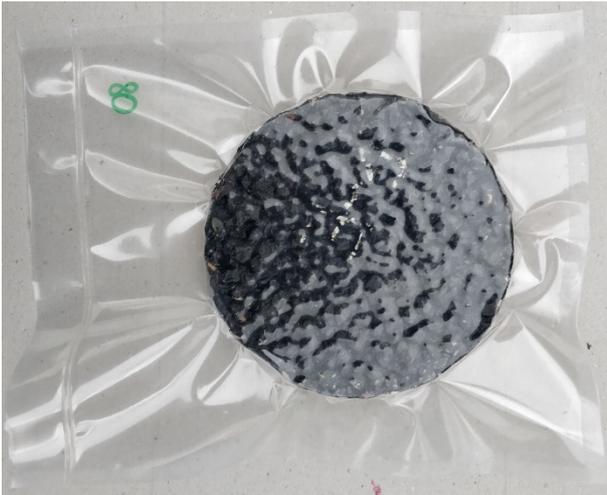
Bild 4-8: Einfluss der Foliendicke auf die Raumdictebestimmung bzw. den abgeleiteten Hohlraumgehalt bei einem 98% Vakuum, Prüfkörper \varnothing 150 mm aus PA 8

Dem Bild 4-8 wurden die statistische Unsicherheit (vgl. Abschnitt 4.2) beigefügt. Tendenziell ist mit abnehmender Foliendicke eine Verbesserung der Präzision unter Wiederholbedingungen feststellbar. Diese wirkt sich jedoch erst auf die 2. Nachkommastelle des Hohlraumgehaltes aus, sodass diese im Sinne der Praxis vernachlässigbar ist.

Im Sinne des Umweltschutzes und der Ressourcenschonung ist die Verwendung einer möglichst dünnen Folie mit einer Foliendicke von 150 μm anzustreben. Dies entspricht den Anforderungen der ASTM.

Viele günstige Vakuumiergeräte für den Haushalt schaffen es, ein Vakuum von 90 % zu erzeugen. Um eine kostengünstige Umsetzung zu prüfen, wurde an den gleichen Prüfkörpern an denen die Foliendicke getestet wurde, der Einfluss des Vakuums überprüft. Nachfolgend sind die Ergebnisse in Bild 4-9 zusammengefasst. In Tab. 4-2 sind die sich abbildenden Texturen der Prüfkörper bei unterschiedlichem Vakuum dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass bei einem Vakuum von 80 % die Folie optisch nicht mehr gänzlich an der Mantelfläche anliegt. Daher wurde die Serie mit 80 % aus den weiteren Untersuchungen ausgenommen.

Vakuum [%]	Fotodokumentation
98 %	 A photograph showing a dark, porous, circular sample (likely a catalyst or filter) placed inside a white plastic bag. The bag is partially inflated, and the sample is centered. A green label with the number '86' is visible on the left side of the bag.
90 %	 A photograph showing a dark, porous, circular sample (likely a catalyst or filter) placed inside a white plastic bag. The bag is partially inflated, and the sample is centered. A green label with the number '90' is visible on the left side of the bag.
85 %	 A photograph showing a dark, porous, circular sample (likely a catalyst or filter) placed inside a white plastic bag. The bag is partially inflated, and the sample is centered. A green label with the number '85' is visible on the left side of the bag.

Vakuum [%]	Fotodokumentation
80 %	

Tab. 4-2: Fotodokumentation der abbildenden Textur der Prüfkörper bei unterschiedlichem Vakuum

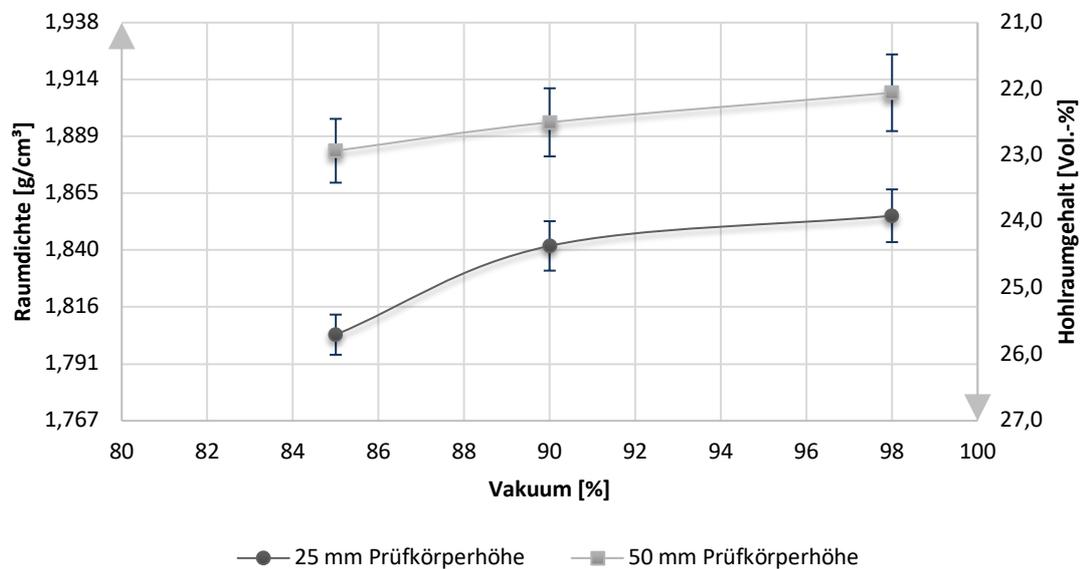


Bild 4-9: Einfluss des Vakuums auf die Raumdicke bzw. den abgeleiteten Hohlraumgehalt bei einer Foliendicke von 150 μm , Prüfkörper \varnothing 150 mm aus PA 8

Es scheint, dass sich die Raumdicke bzw. der Hohlraumgehalt mit zunehmendem Vakuum asymptotisch einem Niveau annähert. Dieser Effekt ist bei einer Prüfkörperhöhe von 25 mm ausgeprägter als bei einer Prüfkörperhöhe von 50 mm. Quantitativ sinkt der Hohlraumgehalt mit steigender Evakuierung um im Mittel 0,1 Vol.-% je Prozent Vakuum. Die Präzision unter Wiederholbedingungen wird mit abnehmendem Vakuum besser. Beide Beobachtungen sind Effekte, welche aus dem Niveau des Vakuums resultieren. Mit der Vakuummaschine wird immer ein definiertes Niveau an Druck in dem Beutel belassen. Mit zunehmender Luft im Beutel (Vakuum in Prozent sinkt) steigt der Hohlraumgehalt an, was auf die verbliebene Luft zurückgeführt werden kann. Es wird vermutet, dass eine Kombination des beschriebenen Effektes in Kombination mit dem anschmiegen der Folie an die Textur wirkt. Erst mit zunehmendem Druck wird der im Sinne des umhüllenden Beutels charakteristische Hohlraumgehalt des Prüfkörpers gemessen. Wenn immer wieder der gleiche Anteil der Luft im Beutel verbleibt, so wird auch immer wieder der gleiche Hohlraumgehalt gemessen. Die Verbesserung der Präzision mit abnehmendem Vakuum ist somit nur scheinbar und unabhängig vom Prüfkörper selbst.

Es konnte quantifiziert werden, dass die Foliendicke und das Vakuum einen Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Aufgrund der Voruntersuchungen und der Festlegungen nach ASTM wurden daher die in Tab. 4-3 dargestellten Randbedingungen für das Vakuumierverfahren im Projekt präzisiert.

Kennwert	ASTM	Präzisierung
Foliendicke	zwischen 100 - 150 μm	150 μm
Vakuum	in weniger als 60 s auf einen Mindestdruck von 10 mm Hg (98 %)	in weniger als 60 s auf 98 %

Tab. 4-3: Präzisierung der Randbedingungen für das Evakuieren von Prüfkörpern in Beuteln

4.1.5 Wasseraufnahme unter Vakuum – TP A, Teil 82

Die technischen Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 82 beschreiben ein Verfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahme von Asphalt-Probekörpern unter Anwendung von Vakuum. Das Messprinzip basiert auf einer Bestimmung des Volumens vor Anwenden des Vakuums, welche der Tauchwägung nach Abschnitt 4.1.1 entspricht, und nach Anwenden des Vakuums.

Die Volumenbestimmung sieht eine vorherige Konditionierung des Prüfkörpers in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Vakuum vor. Dieses Volumen eliminiert die von außen zugänglichen Poren und Gesteinsporen. Anhand der Trockenmasse kann eine Raumdichte bestimmt werden. Diese wird im Nachfolgenden als „Verfahren nach TP A, Teil 82 zur Bestimmung der Raumdichte durch vorherige Konditionierung der Prüfkörper“ mit aufgenommen.

4.1.6 Radiometrische Dichtebestimmung

Die Dichtebestimmung mit einer radiometrischen Durchstrahlungseinrichtung wurde von der BAST an zur Verfügung gestellten Prüfkörpern vorgenommen. Nachfolgend ist das Messprinzip auf der Grundlage eines Flyers der BAST beschrieben.

„Bei der radiometrischen Dichtemessung wird der Bohrkern von den gebündelten Gammastrahlen einer schwach radioaktiven Quelle, hier Cäsium-137, durchstrahlt. Je nach Dichte des Mediums werden die Gammastrahlen mehr oder weniger abgeschwächt. Die abgeschwächte Strahlung wird von einem Detektor empfangen, erzeugt dort Impulse und wird in ein Messsignal umgewandelt.“

Als Kalibrierdaten für die Dichtemessung sind die Impulsraten von Referenzkörpern aus Aluminium mit bekannter Dichte im Detektor gespeichert. Diese Daten werden verwendet, um aus der aktuellen Impulsrate die zugehörige Dichte zu berechnen. Damit wird eine zerstörungsfreie und berührungsfreie Messung der Dichte von Bohrkernen ermöglicht.

Bei der Durchstrahlungseinrichtung handelt es sich um eine Entwicklung der BAST aus dem Jahr 1983.

Im orangefarbenen Bleibehälter befindet sich die Strahlenquelle. Beim enthaltenen radioaktiven Material handelt es sich um CS137 mit einer Anfangsaktivität von 185 MBq (1982).

Das radioaktive Präparat ist zweifach sicher in einer Edelstahlkapsel verpackt und durch einen zusätzlichen Bleimantel (100 mm Wanddicke und 250 mm Durchmesser) zuverlässig abgeschirmt. Die Kapsel hat eine Gesamtlänge von 15,0 mm bei einem Durchmesser von max. 6,4 mm und eine Wandstärke von 1,1 mm.

Der Strahlengang wird durch eine Bohrung von 10 mm ermöglicht. Er ist bei Nichtgebrauch von einer Bleischeibe verschlossen. Der Schließmechanismus ist verriegelt.

In Richtung des Strahlengangs schließt sich der zur Probenaufnahme vorgesehene Drehteller an.

Der Drehteller wird an die Proben angepasst. Es stehen Drehteller mit 100 mm, 150 mm sowie 200 mm zur Verfügung.

Bei der radiometrischen Messung wird das gemessene Medium weder kontaminiert noch anderweitig verändert. Es bleibt ganz einfach so, wie es ist.“ (BAST)

Nach Angaben der BAST wurde die Strahlenquelle seit 1983 nicht getauscht. Zur Kompensierung der abnehmenden Zählrate wird die Messzeit bei der Kalibrierung so lange erhöht, bis die bekannte Dichte des Kalibrierkörpers erreicht wird.

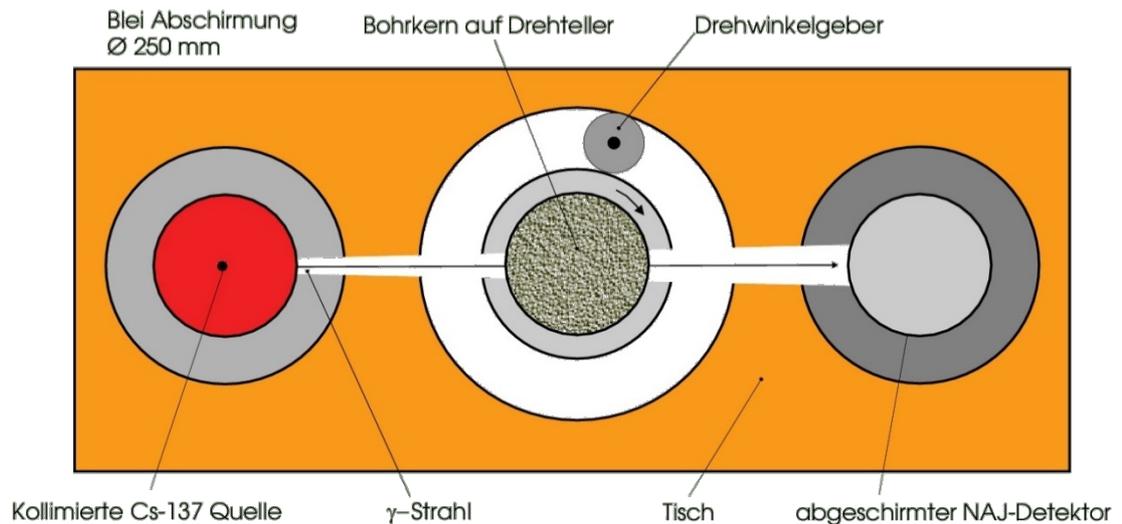


Bild 4-10: Prinzipskizze der Durchstrahlungseinrichtung



Bild 4-11: Durchstrahlungseinrichtung mit Bohrkern auf Drehteller

4.1.7 Volumenbestimmung mit dem Laserabtastungsverfahren

Die Volumenbestimmung mit einem Laserabtastungsverfahren wurde von der Müller BBM GmbH an zur Verfügung gestellten Probekörpern durchgeführt. Nachfolgend ist das Mess- und Auswertungsprinzip beschrieben.

„Mithilfe eines Streiflichtverfahrens wurden von den einzelnen Bohrkernen dreidimensionale Scans durchgeführt. Vor der Durchführung wurden die Oberflächen der Probekörper mit einem Spray behandelt, um gerichtete Lichtreflexionen zu vermeiden – das Streiflichtverfahren basiert auf diffusen Reflexionen. Der Probekörper wurde auf einem Drehteller platziert und während der Probekörper sich drehte, wurden in allen radialen Richtungen Scans durchgeführt. Um alle Seiten der Probekörper zu erfassen, wird der Probekörper nach der ersten Messung gekippt auf dem Drehteller platziert und es erfolgt eine zweite Messung. Die beiden Messungen werden digital miteinander verknüpft. Anschließend findet eine dritte Messung statt und es wird überprüft, inwieweit die dritte Messung das Ergebnis der ersten beiden Messungen verbessern kann. Dieser Arbeitsschritt erfolgt iterativ bis die Verbesserung durch einen weiteren Scan sehr gering ist.“ (Müller-BBM GmbH, 12/2018, p. Abschnitt 5.3)

Die Scans wurden anschließend in ein Raummodell überführt (vgl. Bild 4-12 bis Bild 4-14), aus dem mit verschiedenen Berechnungsverfahren die Bestimmung des Volumens erfolgen kann. Die Volumina werden nach drei Methoden ausgewertet:

- Netz (Laser-N):
Bei der Auswertung werden die ermittelten Messpunkte (in der Regel deutlich über 1 Million Punkte) vernetzt und das eingeschlossene Volumen des Netzes ausgewertet. (Müller-BBM GmbH, 12/2018)
- Gauß-Verfahren (Laser-G):
Beim Gauß-Verfahren dienen die Messpunkte in einem ersten Schritt zur Herleitung einer geschlossenen Oberfläche, aus der dann mittels des Gaußschen Integralsatzes das Volumen bestimmt wird. (Müller-BBM GmbH, 12/2018)
- Hüllfläche (Laser H):
Hier wird ein Zylinder um das Messobjekt gelegt, der alle Messpunkte einschließt. Diese Auswertungsmethodik entspricht in etwa dem Ausmessverfahren - Verfahren D. Aufgrund hervorstechender Körner in der Fläche ist ein höheres Volumen zu erwarten. (Müller-BBM GmbH, 12/2018)

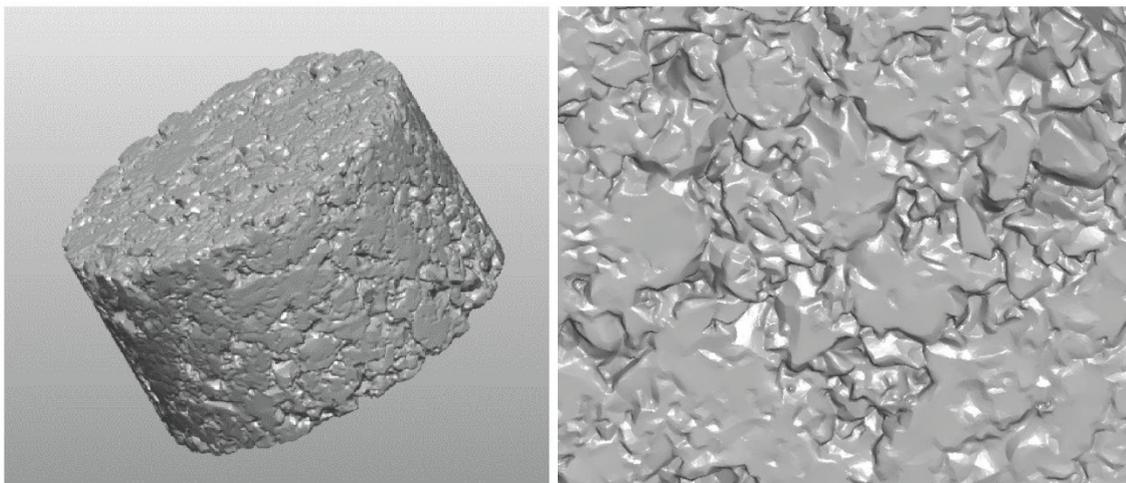


Bild 4-12: 3D-Darstellung und Detailansicht der Oberfläche des SMA 8 S (Müller-BBM GmbH, 12/2018)

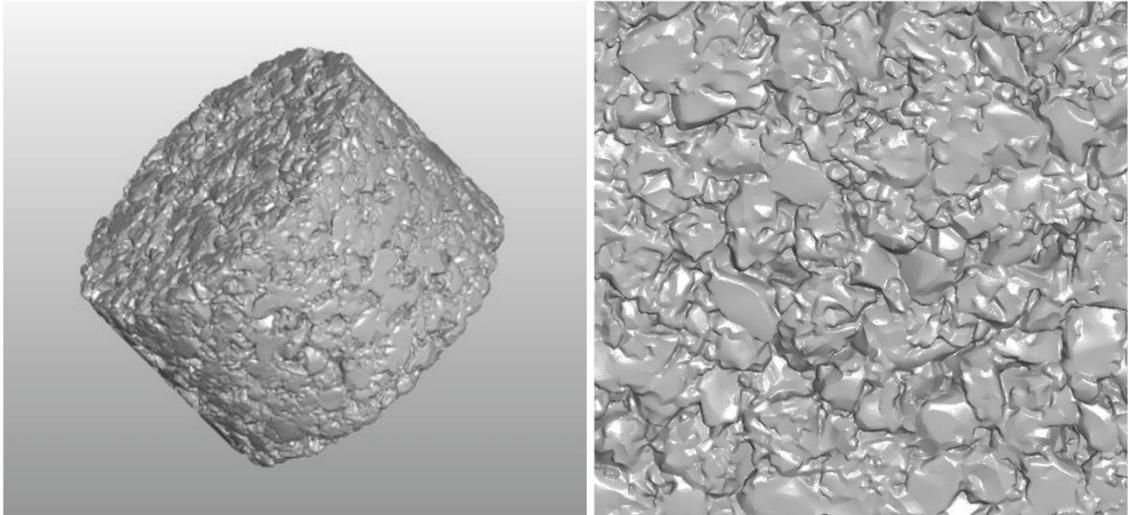


Bild 4-13: 3D-Darstellung und Detailansicht der Oberfläche des SMA 8 LA (Müller-BBM GmbH, 12/2018)

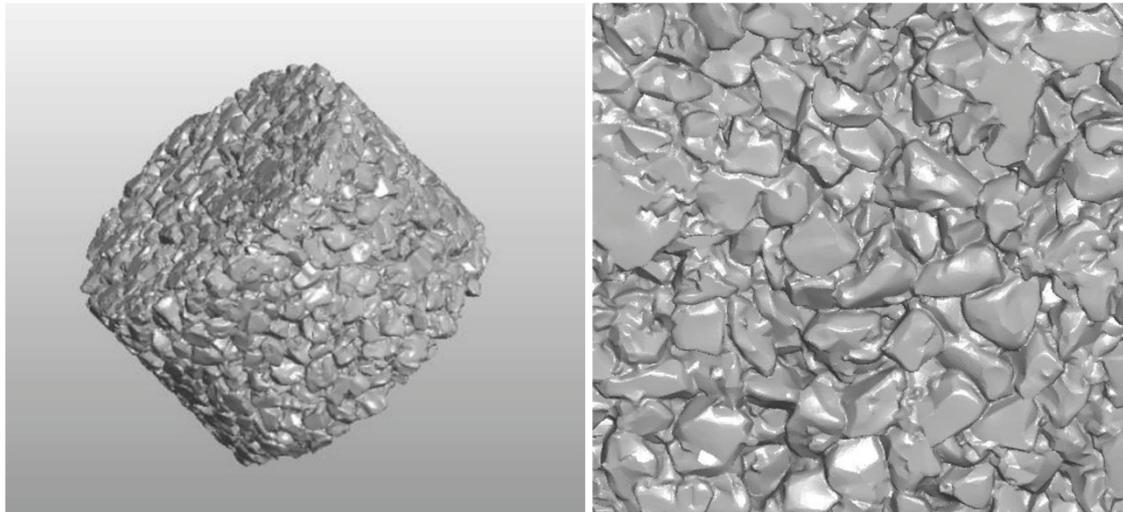


Bild 4-14: 3D-Darstellung und Detailansicht der Oberfläche des PA 8 (Müller-BBM GmbH, 12/2018)

Bei ersten Tastversuchen wurden Marshall-Probekörper vermessen. Diese entsprechen nicht durchgehend den Anforderungen der Technischen Prüfvorschriften (Höhe) bzw. Technischen Lieferbedingungen (Hohlraumgehalt). Für erste Tastversuche reichte jedoch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse und diente dem Test des Laserabtastungsverfahrens. Nachfolgend sind die Ergebnisse graphisch den konventionellen Verfahren gegenübergestellt (vgl. Bild 4-15). Zur Orientierung wurden die Spannweiten des Hohlraumgehaltes, welche mit den vorliegenden Raumdichten und Rohdichten berechnet wurden, den Beschriftungen der Abszisse beigefügt.

Demnach weist das Auswertungsverfahren Laser-N ein äquivalentes Niveau zum konventionellen Verfahren B auf. Das Verfahren Laser-G liegt auf einem vergleichbaren Niveau mit dem konventionellen Verfahren D. Das Auswertungsverfahren Laser-H führt zur niedrigsten Raumdichte.

Die Tastversuche zeigen sehr gut, wie sensibel sich die Raumdichte durch unterschiedliche Definition des Volumens verändert.

Für die weitere Auswertung wurde das Netz-Verfahren angewandt, da dieses am besten die texturbedingten Hohlräume von dem für die Raumdichte der Prüfkörper von Bedeutung stehenden Volumen differenziert.

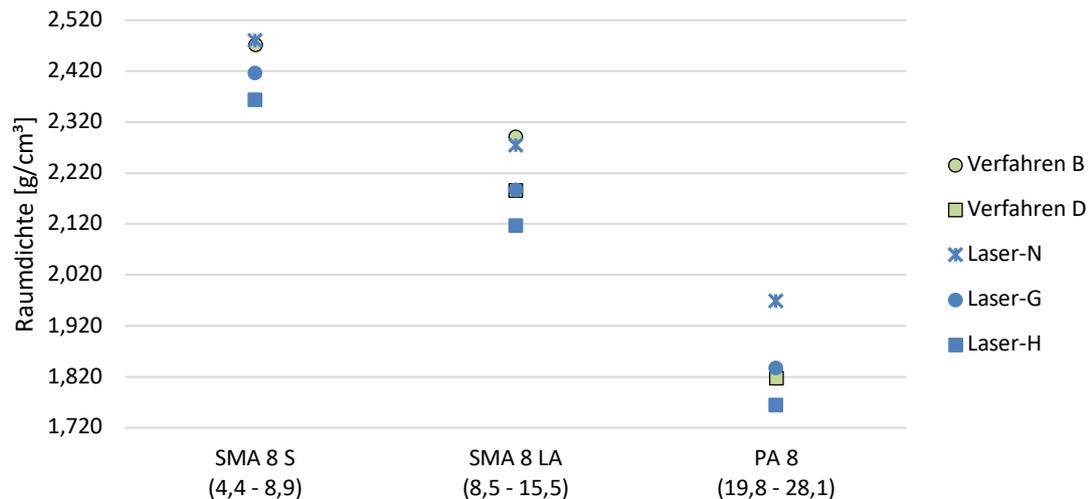


Bild 4-15: Ergebnisse erster Tastversuche der Raumdichtebestimmung mit dem Laserabtastungsverfahren (Klammerwerte – Spanne des Hohlraumgehaltes)

4.2 Statistische Methoden

Die angewandten Methoden der Statistik entsprechen den statistischen Grundlagen der Technischen Prüfbedingungen, Teil 0 (FGSV Nr. 755/0, 2009) und dem Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen (FGSV Nr. 926/1, 2000), (FGSV Nr. 926/2, 2003).

Alle Ergebnisse wurden vor der Auswertung auf Ausreißer untersucht. Zur Identifizierung von statistischen Ausreißern wurde das Verfahren von Davies/Gather mit dem Hampel-Identifizierer und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% entsprechend dem Merkblatt gewählt. Technische Ausreißer wurden nicht identifiziert. Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Raumdichtebestimmung einer Gruppe / Klasse³ mit folgenden Kennwerten beschrieben:

- Arithmetischer Mittelwert
- Median
- Kleinster Wert – Größter Wert einer Gruppe
- Spannweite
- Standardabweichung
- Variationskoeffizient
- Anzahl der Werte ohne Ausreißer
- Vertrauensbereich

Aus folgenden Gründen wurde auf die Berechnung der Wiederholpräzision verzichtet:

- Nicht alle Gruppen/Klassen erfüllen die notwendige Anzahl von Einzelwerten.
- Eine Trennung des Einflusses aus der Mischgut- und Probekörperherstellung von der Präzision der Prüfung kann mit dem vorliegenden Konzept nicht durchgeführt werden. Der Einfluss aus der Mischgutherstellung kann aufgrund der großtechnischen Herstellung als konstant angenommen werden. Ähnlich kann der Einfluss aus der Probekörperherstellung (ein Labor, ein Prüfer) als konstant angenommen werden.

³ Gruppe/Klasse: Prüfkörper mit vergleichbaren Merkmalen (Mischgutart/-sorte, Probekörperhöhe/ -masse/ -durchmesser, Angewandtes Verfahren zur Raumdichtebestimmung)

Zur Beschreibung der Präzision, der durchgeführten Untersuchungen für den Fall in einem Labor mit einem Prüfer, wurde einheitlich die statistische Unsicherheit ($\pm q_r$) des Vertrauensbereiches genutzt. Der Kennwert weist eine vergleichbare Relation zur Wiederholpräzision auf. Mit zunehmendem absolutem Niveau sinkt die Präzision und mit abnehmendem absolutem Niveau steigt die Präzision. Die statistische Unsicherheit berücksichtigt eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (k-Wert 1,96), welche für Kennwerte der Technischen Prüfvorschriften für Asphalt standardmäßig zugrunde gelegt wird. Weiterhin wird die Anzahl (n) normiert und ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Gruppen untereinander. Nachfolgend ist die Berechnung in Anlehnung an die TP A, Teil 0 dargestellt (FGSV Nr. 755/0, 2009):

$$q_r = \pm \frac{1}{\sqrt{n}} * 1,96 * s_r$$

Gemäß TP A, Teil 0 wird die statistische Unsicherheit unter Vergleichsbedingungen genutzt. Die Herleitung des Kennwertes erlaubt jedoch auch eine Anwendung unter Wiederholbedingungen.

Der Kennwert kann positiv oder negativ werden. Für die Bewertung ist das absolute Niveau maßgeblich.

Zur Abschätzung der Einflussfaktoren wurde eine Multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei werden die Einflussfaktoren (Bsp. Prüfkörperhöher und Masse) als „X“ und die abhängigen Variablen (Bsp. Raumdichte und Präzision) als „Y“ bezeichnet. Es gilt:

$$Y = a \cdot x_a + b \cdot x_b + \dots + m \cdot x_m + n$$

Die Regressionsfaktoren (a, b, ...m und n) werden so lange heuristisch angepasst, bis die geringste quadratische Abweichung zwischen den tatsächlichen Werten von Y und den berechneten Werten der abhängigen Variabel feststellbar ist. Die Güte der multiplen Regression ist neben den Einflussfaktoren auch von der Menge derer abhängig. Als Ergebnis kann eine Abhängigkeit der Einflussfaktoren auf die Variable dargestellt werden, wenn bestimmte Einflussfaktoren konstant angenommen werden. Der wahre Wert von Y ist immer als Summe aller Einflüsse anzusehen und kann sich bei Änderung eines Faktors entsprechend ändern.

5 Mischgutzusammensetzung

Die verwendeten Asphaltmischgüter wurden großtechnisch hergestellt und bei Baumaßnahmen oder Probefeldern für Baumaßnahmen verwendet. Nachfolgend ist die Zusammensetzung tabellarisch zusammengefasst. Den Ergebnissen liegt eine Doppelbestimmung zugrunde.

Bezeichnung	Splittmastixasphalt SMA 8 S		Lärmarmer Splittmastixasphalt SM 8 LA		Offenporiger Asphalt PA 8		
	IST	SOLL*	IST	SOLL*	IST	SOLL*	
Bindemittelart/-sorte	25/55-55	-	40/100-65	-	40/100-65	-	
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	68,0	≤ 71	58,6	≤ 76	70,6	≤ 78	
Nadelpenetration [0,1 mm]	28	-	38	-	33	-	
Bindemittelgehalt [M.-%]	6,8	6,8 – 7,6	6,6	6,2 – 7,0	6,1	6,1 – 6,9	
Siebdurchgang bei [M.-%]	11,2 mm	100	100	100	100	100	
	8 mm	96	90 – 100	96	90 – 100	95	90 – 100
	5,6 mm	47	35 – 55	28	20 – 30	14	5 – 15
	2 mm	25	20 – 30	18	15 – 20	6	5 – 10
	0,063 mm	9	8 - 12	7	6 – 8	5	3 - 5
Krümmungszahl (C _c) [-]	17,15	-	9,18	-	1,12	-	
Ungleichförmigkeitszahl (C _u) [-]	77,33	-	12,26	-	1,39	-	
Hohlraumgehalt am MPK [Vol.-%]	3,0	2,5 – 3,0	9,0	9,0 – 11,0	26	24 – 28	
Mean Profile Depth (MPD) [mm]	0,44 – 0,64	-	0,65 – 0,67	-	0,95 – 1,23	-	
Gestaltfaktor (g) [%]	83,5 – 83,8	-	77,5 – 82,0	-	53,0 – 64,9	-	
Strömungswiderstand (BK Höhe 25 mm / 50 mm) [Pa s/m]	> 40.000* / > 40.000*	-	11.263 / > 40.000*	-	172	-	

*Der Strömungswiderstand liegt oberhalb des gültigen Bereiches des Messsystems.

Tab. 5-1: Zusammensetzung der verwendeten Asphaltmischgutsorten und Vergleich mit den Anforderungen der TL/ZTV Asphalt-StB bzw. E LA D

Neben den in der Asphalttechnologie bekannten Kennwerten wurden zwei weitere Kennwerte aus der Bodenmechanik hinzugezogen. Beide reduzieren den Sieblinienverlauf auf eine Kennziffer. Die Ungleichförmigkeitszahl beschreibt die Steilheit der Körnungslinie im Bereich d_{10} bis d_{60} . Die Krümmungszahl ist ein Maß für den Verlauf in diesem Bereich.

Die Texturkennwerte wurden an den Laborprüfkörpern gemessen. Dabei kann festgehalten werden, dass an den höheren Prüfkörpern mischgutunabhängig immer eine höhere mittlere Profiltiefe und ein höherer Gestaltfaktor gemessen wurden.

6 Probekörperherstellung

Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten erfolgte mischgutspezifisch. Abweichend von den Technischen Prüfvorschriften war eine Dicke der Asphalt-Probepplatten von 25 mm und 50 mm angestrebt (FGSV Nr. 756, 2013), (FGSV Nr. 756, 2007).

Die Platten aus Splittmastixasphalt wurden entsprechend dem Verdichtungsregime der TP A, Teil 33 hergestellt. Der Verdichtungserfolg ist in Tab. 6-1 dargestellt. Neben der Anforderung an die Ebenheit der Platten wurde gemäß TP A, Teil 22 auch die Abweichung zur Soll-Dicke als Kennwert mit aufgenommen.

Die Asphalt-Probepplatten aus offenporigem Asphalt wurden entsprechend dem Anhang B des „Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt“ (FGSV Nr. 750, 2013) hergestellt. Bei Herstellung der Asphalt-Probepplatten mit Porous Asphalt (PA) und eine Höhe von 50 mm ist festzuhalten, dass trotz Absenkung der Herstellungstemperatur auf 125 °C in Anlehnung an die H HANV (FGSV Nr. 776, 2015), das Gesteinsgerüst durch das Eigengewicht verdichtet wurde. Die Verdichtungsanforderungen der TP A, Teil 22 und 33 werden noch eingehalten (vgl. Tab. 6-1).

Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten aus lärmtechnisch optimiertem Splittmastixasphalt wurde äquivalent zum PA nach M OPA durchgeführt. Dieses Vorgehen führte zu einheitlichen Höhen und Ebenheiten der Platten.

Mischgutart /-sorte	Höhe		Anzahl der Asphalt-Pro- beplatten	Ebenheit* [%]	Anforde- rung	Abweichung der Dicke* [%]	Anforde- rung
	Soll [mm]	IST* [mm]					
SMA 8 S	25	25,48	21	2,00	≤ 7,5 %	1,93	± 5 %
	50	50,52	21	1,05	≤ 7,5 %	1,04	± 5 %
SMA 8 LA	25	25,55	14	2,65	≤ 7,5 %	2,20	± 5 %
	50	50,71	16	2,06	≤ 7,5 %	1,43	± 5 %
PA 8	25	25,21	23	3,49	≤ 7,5 %	0,84	± 5 %
	50	48,52	23	2,20	≤ 7,5 %	-2,87	± 5 %

Tab. 6-1: Zusammenfassung des Verdichtungserfolges der Asphalt-Probepplatten (* - Ergebnisse der arithmetischen Mittelwerte)

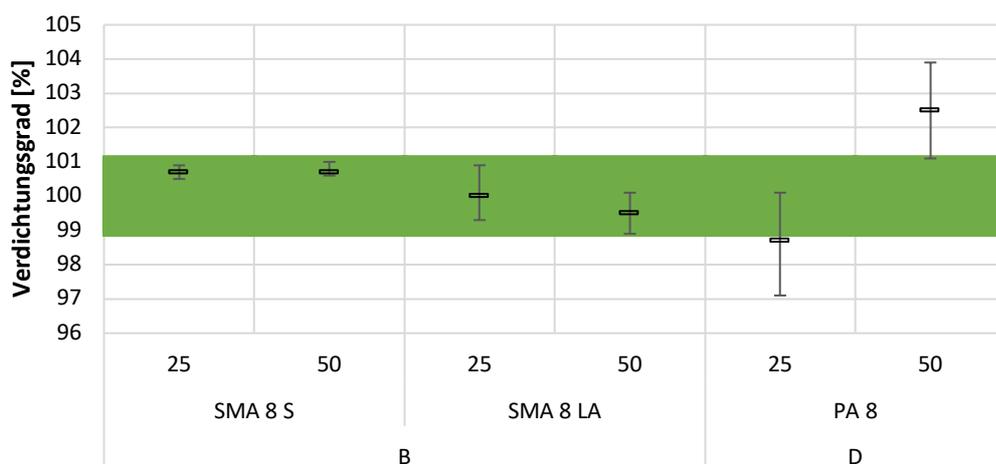


Bild 6-1: Spannweiten und Mittelwerte des Verdichtungsgrades an den hergestellten Asphalt-Probepplatten vor den Anforderungsbereichen der TP A, Teil 33

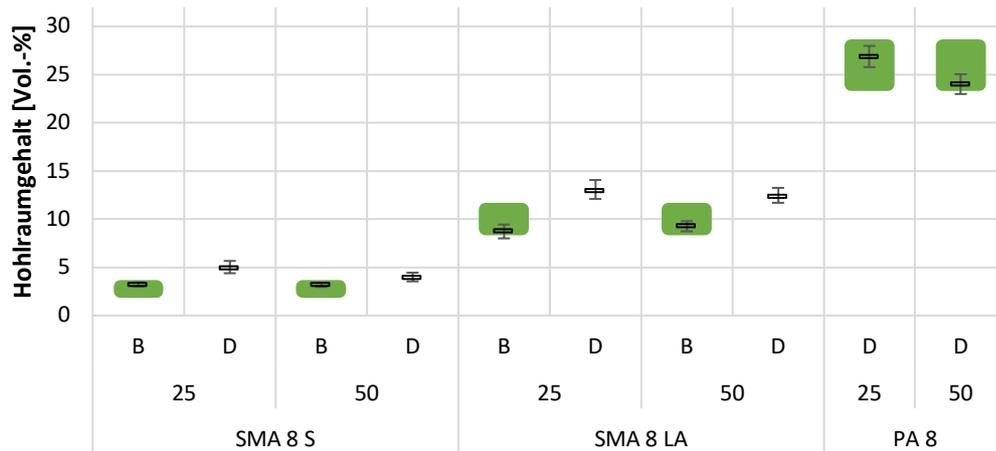


Bild 6-2: Spannweiten und Mittelwerte der Hohlraumgehalte an den hergestellten Asphalt-Probepplatten vor den Anforderungsbereichen der TL Asphalt-StB bzw. den E LA D für Erstprüfungen

Die Anforderungen an den Verdichtungsgrad werden von den Splittmastixasphalten, trotz von der TP A, Teil 33 abweichenden Herstellungshöhen, eingehalten (vgl. Bild 6-1). Die Anforderungen an den Hohlraumgehalt bei der Erstprüfung werden eingehalten (vgl. Bild 6-2). Die Asphalt-Probepplatten aus SMA 8 LA und einer Dicke von 25 mm unterschreiten teilweise den Anforderungsbereich des Hohlraumgehaltes bei Erstprüfungen. Insgesamt weisen die beiden Nennstärken der Mischgutsorte ein vergleichbares Niveau des Hohlraumgehaltes auf.

Die Asphalt-Probepplatten aus PA weichen von der Anforderung des Verdichtungsgrades ab (vgl. Bild 6-1). Das Niveau der angestrebten Nennstärken von 25 mm bestätigt die Erfahrungen, dass die Asphalt-Probepplatten mit dem Verdichtungsregime nach M OPA nicht einem Marshall-Probekörper mit 2 x 50 Schlägen, sondern mit einer höheren Anzahl an Schlägen entspricht. Gleiche Beobachtungen konnten bereits bei der Herstellung von Asphalt-Probepplatten mit einem Asphalttraggerüst mit nachträglicher Verfüllung (ATG-V) nach H HANV festgehalten werden. Bei einer angestrebten Nennstärke von 50 mm kann aufgrund der unterschiedlichen Herstellungstemperaturen zwischen dem Marshall-Probekörper und den Asphalt-Probepplatten kein direkter Vergleich im Sinne der ZTV Asphalt-StB erfolgen. Abschließend wird bei den Asphalt-Probepplatten aus PA der Hohlraumgehalt als maßgeblicher Kennwert ggü. dem Verdichtungsgrad betrachtet. Diese erfüllen größtenteils die Anforderungen für die Erstprüfung. Die geringen Abweichungen bei einer angestrebten Nennstärke von 50 mm liegen innerhalb des Toleranzbereiches nach ZTV Asphalt-StB.

7 Ergebnisse der Raumdichtebestimmung

Nachfolgend sind die Untersuchungsergebnisse zusammenfassend dargestellt und interpretiert. Eine quantitative Beurteilung über die Einflüsse erfolgt in Abschnitt 4.2. Die Einzelergebnisse werden der Anlage des Schlussberichtes beigelegt.

Die Ergebnisse sind für die Laborprüfkörper in Bild 7-1 bis Bild 7-6 zusammengefasst. Auf der linken Ordinate ist die Skala der Raumdichte dargestellt und auf der rechten Ordinate die Skala des daraus resultierenden Hohlraumgehaltes. Auf der Abszisse sind die jeweiligen Verfahren, geordnet von der niedrigsten Raumdichte zur höchsten Raumdichte der Verfahrensmittelwerte, dargestellt (ausgehend von der Relation bei Splittmastixasphalt). Die Verfahren wurden nach den Prüfkörperhöhen (25 mm oder 50 mm) und dem Prüfkörperdurchmesser ($\varnothing 100$ mm, $\varnothing 150$ mm, $\varnothing 225$ mm) weiter untergliedert. Die abgebildeten Fehlerindikatoren stellen die statistische Unsicherheit der Gruppe dar (siehe Abschnitt 4.2). Auf der Abszisse sind der mittlere Hohlraumgehalt und die mittlere Unsicherheit eines Verfahrens unabhängig von der Prüfkörpergeometrie in Vol.-% ausgewiesen. Fehlende Werte sind der Bildunterschrift beigelegt. Am jeweiligen Referenzverfahren, welches in den E LA D, TL/ZTV Asphalt-StB angegeben ist, wurden die Anforderungsbereiche für Erstprüfungen (grüner Bereich) und die Toleranzen für Kontrollprüfungen (blauer Bereich) bzw. bei den Bohrkernen aus eingebauten Schichten die Anforderungsbereiche zur Orientierung hinterlegt.

7.1 Splittmastixasphalt SMA

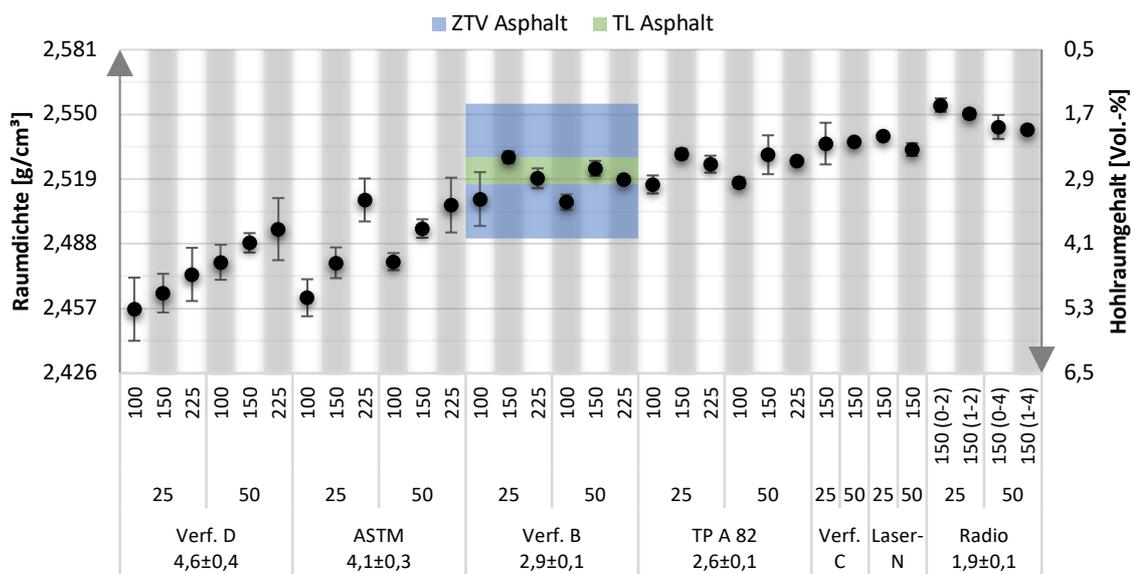


Bild 7-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an der Mischgutart Splittmastixasphalt SMA aus Laborprüfkörpern – Verfahren C ($2,3 \pm 0,2$) Vol.-%, Laser-N ($2,3 \pm 0,1$) Vol.-%

Die Verfahren führen zu unterschiedlichen Raumdichten / Hohlraumgehalten infolge der unterschiedlichen Definition des Volumens im Messprinzip. Aus dieser Tatsache ableitend kann geschlussfolgert werden, dass unter Beibehaltung der mischgutspezifischen Anforderungsbereiche nicht alle Verfahren für alle Mischgutarten/-sorten aufgrund des ermittelten Niveaus geeignet sind. Ein Verfahrenswechsel würde eine neue Definition der Anforderungsbereiche erfordern.

Bei den Messungen mit dem Verfahren D werden die niedrigste Raumdichte und daraus resultierend der höchste Hohlraumgehalt ermittelt. Mit zunehmender Prüfkörperhöhe, -masse und -durchmesser nimmt die Raumdichte zu. Die statistische Unsicherheit ist beim Verfahren D am höchsten. Es erscheint, dass mit zunehmendem Niveau der Raumdichte bzw. abnehmendem Niveau des Hohlraumgehaltes die Wiederhol-

Präzision der Verfahren günstiger wird. Hiervon ausgenommen ist das Verfahren nach TP A, Teil 82, welches bei einem Bohrkerndurchmesser von 150 mm einen breiteren Vertrauensbereich aufweist.

Gegenüber dem Referenzverfahren mit Ledertuch (Verfahren B) lässt die radiometrische Ermittlung der Raumdichte eine bessere Präzision, einhergehend mit einem niedrigeren Hohlraumgehalt von im Mittel 1,1 Vol.-%, erwarten.

Die Ergebnisse des radiometrischen Verfahrens wurden noch einmal aufgearbeitet. Die Ergebnisse 0-x cm weisen die Raumdichte der Probekörper inkl. Textur auf. Die Ergebnisse 1-x cm weisen die Raumdichten ab einer Tiefe von 1 cm auf und sollten folglich keine Anteile der Textur berücksichtigen. Tendenziell weisen die Mittelwerte der Gruppen ohne Textur eine geringere Raumdichte auf.

Es muss festgehalten werden, dass das Verfahren B bei Splittmastixasphalt im erwarteten Bereich des Hohlraumgehaltes und unter Einhaltung der Anforderungen der TP A, Teil 6 keine signifikanten Schwächen aufweist, welche einen Wechsel zu einem anderen Verfahrens rechtfertigen würde. Die Untersuchungen am Splittmastixasphalt dienen zur statistischen Analyse bzw. zur Verbreiterung der Spanne des Hohlraumgehaltes.

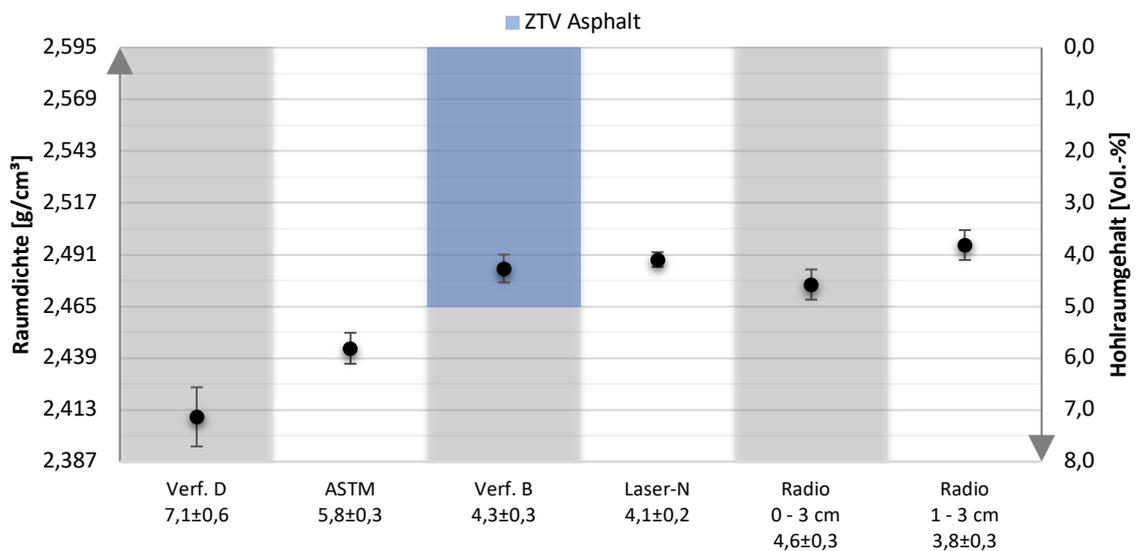


Bild 7-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an den Bohrkernen einer Baumaßnahme mit der Mischgutart Splittmastixasphalt SMA

Die Raumdichten der Bohrkernproben aus der eingebauten Schicht weisen eine vergleichbare Relation auf wie die Laborprüfkörper. Dem Referenzverfahren wurde die Anforderung an den Hohlraumgehalt von maximal 5 Vol.-% in blau hinterlegt. Alle Proben mit Ausnahme der Ausreißer erfüllen die Anforderungen an den maximalen Hohlraumgehalt. Zwei Bohrkernproben wurden als statistische Ausreißer beim Verfahren nach ASTM und dem Verfahren B identifiziert.

Das Laserabstastungsverfahren, und die radiometrische Dichtebestimmung kommen zu einem vergleichbaren Niveau für den Hohlraumgehalt.

7.2 Lärmarmer Splittmastixasphalt SMA LA

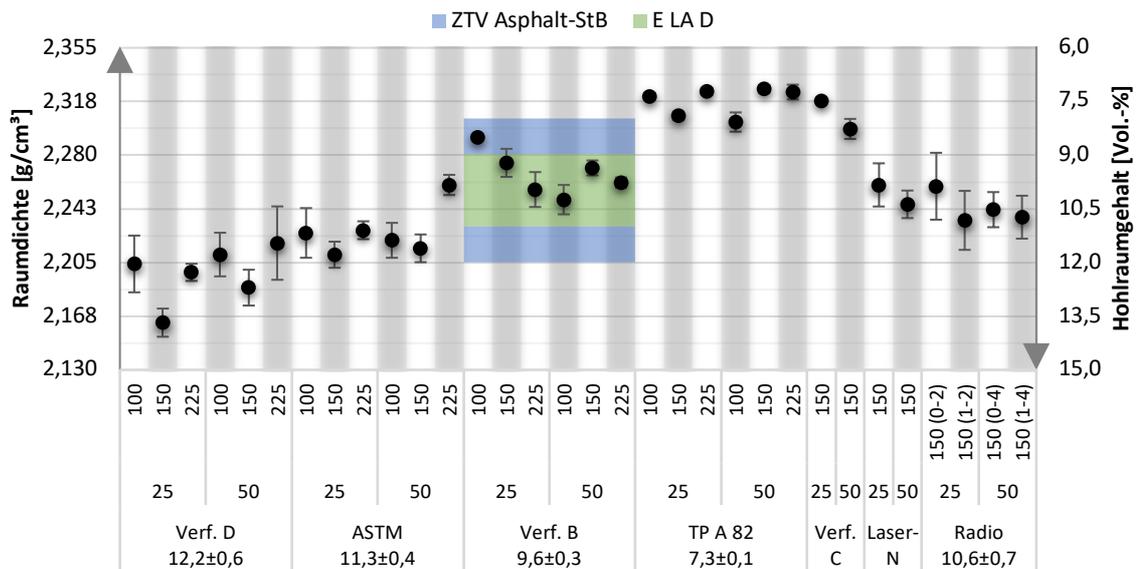


Bild 7-3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an der Mischgutart Lärmarmer Splittmastixasphalt SMA LA – Verfahren C ($7,9 \pm 0,2$) Vol.-%, Laser-N ($10,1 \pm 0,5$) Vol.-%

Gegenüber dem konventionellen Splittmastixasphalt ist die Relation der Verfahren bei gleicher Anordnung wie in Bild 7-2 nicht identisch. Die radiometrische Dichtebestimmung führt zu einer geringeren Dichte als das Verfahren C und reiht sich im Mittel zwischen dem Verfahren B und dem nach ASTM ein. Das Verfahren C führt im Mittel zu einer geringeren Raumdichte als das Verfahren nach TP A, Teil 82.

Die Anforderungen für die Erstprüfung werden bei einem konventionellen Bohrkern-durchmesser von 150 mm erfüllt. Unter Berücksichtigung der Toleranzbereiche nach ZTV Asphalt-StB erfüllen alle Geometrien, bei Anwendung der Raumdichtebestimmung nach Verfahren B, die Anforderungen für die Kontrollprüfung. Im Mittel wird mit dem Verfahren B ein Hohlraumgehalt von ($9,6 \pm 0,3$) Vol.-% ermittelt. Die Anwendung der Raumdichtebestimmung nach dem Verfahren D führt im Mittel zu einem Hohlraumgehalt von ($12,2 \pm 0,6$) Vol.-%. Die E LA D weisen derzeit nicht auf Unterschiede zwischen den beiden Verfahren hin.

Das Verfahren nach ASTM führt im Mittel zu einem Hohlraumgehalt von ($11,2 \pm 0,4$) Vol.-% und einer besseren Wiederholpräzision als das Verfahren D.

Dem Referenzverfahren am nächsten kommt die radiometrische Dichtebestimmung mit einem Hohlraumgehalt von ($10,7 \pm 0,7$) Vol.-%. Es weist innerhalb der Gruppen die schlechteste Präzision auf. Es scheint, dass die abnehmende Prüfkörperhöhe und die Textur einen Einfluss auf die Wiederholpräzision des Verfahrens nehmen.

Hinsichtlich einer optimierten Wiederholpräzision scheinen die Verfahren nach TP A, Teil 82 und das Umhüllungsverfahren mit Wachs geeigneter zu sein. Das Verfahren nach TP A, Teil 82 weist im Mittel und in der Spannweite mit einem Hohlraumgehalt von ($7,3 \pm 0,1$) Vol.-% das niedrigste Niveau auf.

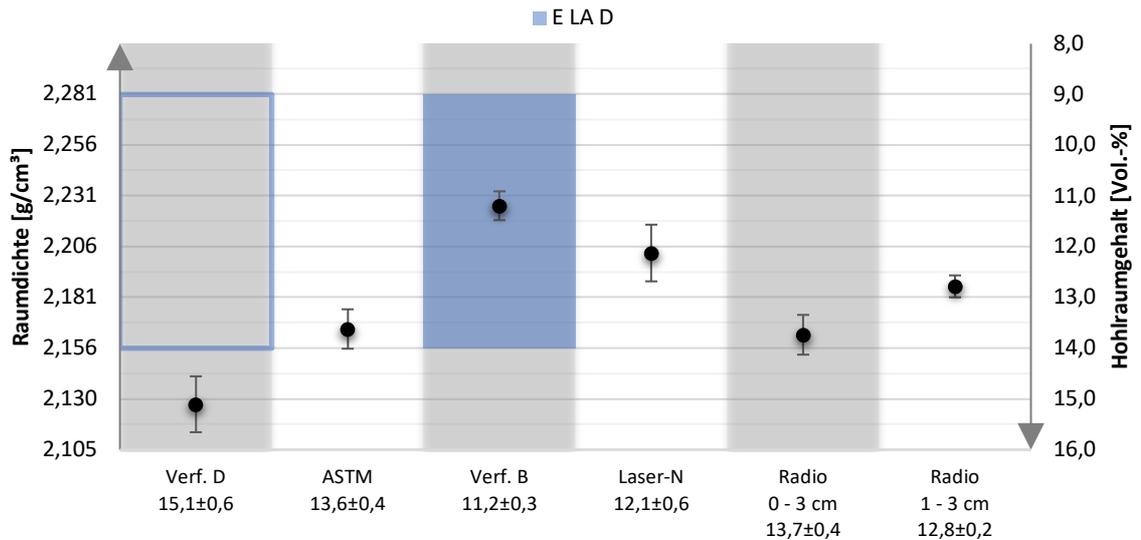


Bild 7-4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an den Bohrkernen einer Baumaßnahme mit der Mischgutart Lärmarrer Splittmastixasphalt SMA LA

Die Raumdichten der Bohrkern aus der Baumaßnahme weisen eine vergleichbare Relation auf wie die Laborprüfkörper. Dem Referenzverfahren wurde die Anforderung an den Hohlraumgehalt von 9 Vol.-% bis 14 Vol.-% in blau hinterlegt. Alle Proben ohne Ausreißer erfüllen die Anforderungen an den Hohlraumgehalt mit dem Verfahren B. Bei Anwendung des in den E LA D zur Erfahrungssammlung vorgeschlagene Verfahren D und dem gleichen Niveau des geforderten Hohlraumgehaltes, liegen die Hohlraumgehalte aller Proben deutlich oberhalb des Zielbereiches für das Verfahren B.

7.3 Offenporiger Asphalt PA

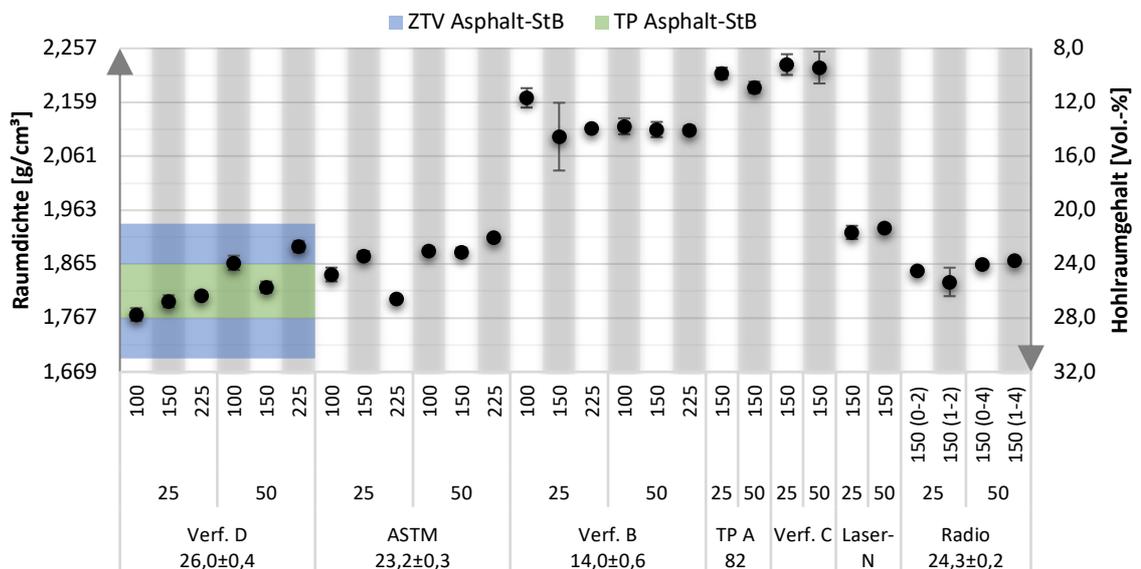


Bild 7-5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an der Mischgutart Offenporiger Asphalt PA – TP A, Teil 82 (10,4 ± 0,4) Vol.-%, Verfahren C (9,3 ± 1,0) Vol.-%, Laser-N (21,5 ± 0,4) Vol.-%

Das Referenzverfahren für Offenporige Asphalte stellt das Verfahren D dar. Es scheint eine Abhängigkeit zwischen der Prüfkörpergröße oder/und -masse und dem Niveau

der Raumdicthe zu geben. Mit steigender Masse/Prüfkörpergröße steigt die Raumdicthe. Im Mittel wird der Zielbereich für die Erstprüfung eingehalten.

Auf einem vergleichbaren Niveau des Hohlraumgehaltes aber mit verbesserter Wiederholpräzision sind das ASTM Verfahren und die radiometrische Raumdicthebestimmung zu nennen. Diese weisen einen verfahrensbedingt geringeren Hohlraumgehalt von ca. 2-3 Vol.-% auf.

Die übrigen Verfahren weisen aufgrund des Messprinzips einen signifikant geringeren Hohlraumgehalt aus. Teilweise ist die Verfahrenspräzision der anderen Verfahren schlechter zu bewerten als jene des Ausmessverfahrens.

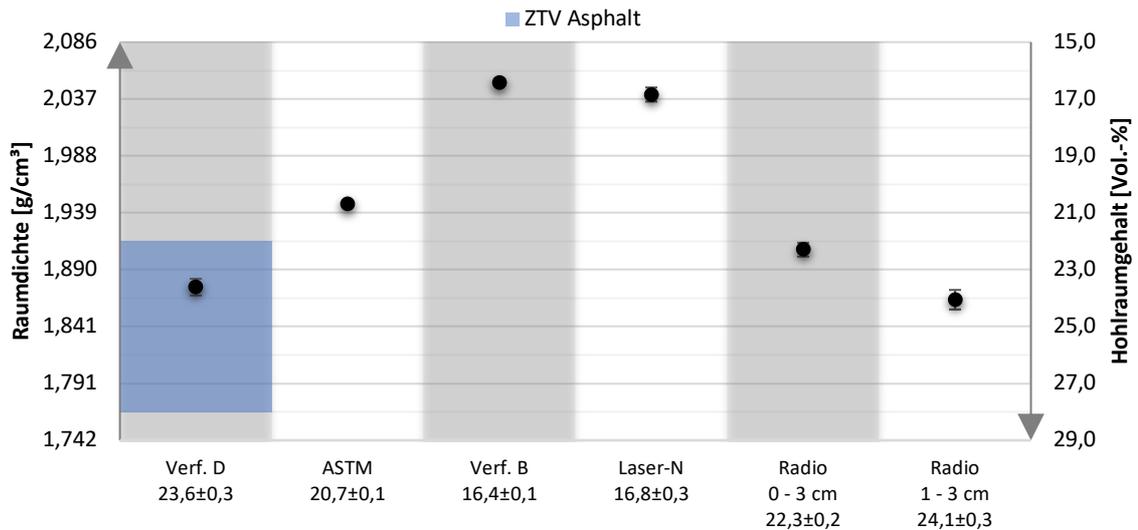


Bild 7-6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdictheuntersuchungen an den Bohrkernen einer Baumaßnahme mit der Mischgutart Offenporiger Asphalt PA

Die Raumdichten der Bohrkern aus der Baumaßnahme weisen eine vergleichbare Relation auf wie die Laborprüfkörper. Dem Referenzverfahren wurde der Anforderungsbereich für den Hohlraumgehalt von 22 Vol.-% bis 28 Vol.-% in blau hinterlegt. Alle Proben ohne Ausreißer erfüllen die Anforderungen an den Hohlraumgehalt mit dem Verfahren D. Bei Anwendung eines anderen Verfahrens müssten deutliche Anpassungen beim Zielhohlraumgehalt erfolgen.

8 Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung

8.1 Grundlagen

Jedes der fünf Labore hat vier Probekörper aus einem Lärmarmen Splittmastixasphalt erhalten, an welchen die Raumdichte nach den Verfahren D und B der TP A, Teil 6 ermittelt werden sollten. An den übergebenen Bohrkernen wurde vorab die Raumdichte nach den Verfahren B und D vom Forschungsnehmer bestimmt.

Es wurde jedem Labor freigestellt die Untersuchungen mit einem oder mehreren Laboranten durchzuführen. Die Ergebnisse waren in ein Messprotokoll einzutragen und zu übergeben. Neben den Ergebnissen sollte ein Fragebogen mit beantwortet werden. Die Teilnehmer wurden vorab darüber aufgeklärt, dass die Ergebnisse für eine forschungsinterne Vergleichsuntersuchung genutzt werden.

8.2 Auswertung des Fragebogens

Nachfolgend sind die Antworten der Teilnehmer auf die Fragen tabellarisch aufgelistet.

1. Frage	Wie oft führen Sie die Prüfung nach TP Asphalt-StB Teil 6 (Verfahren B und D) im Durchschnitt durch?									
Antwortmöglichkeit	Verfahren B Labor Nr.					Verfahren D Labor Nr.				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Täglich	x			x ^{*3}	x					
Wöchentlich		x	x	x ^{*3}						
Monatlich						x ^{*1}		x	x	x
Jährlich							x			
Nie										
...										
	*1	„teilweise wöchentlich“								
	*3	„öfter als einmal pro Woche, aber u.U. nicht täglich“								

Tab. 8-1: Antworten der Labore auf die 1. Frage der Vergleichsuntersuchung

2. Frage	Haben Sie schon Erfahrungen bei der Bestimmung der Raumdichte an Probekörpern aus SMA 8 LA oder SMA 5 LA?				
Antwortmöglichkeit	Labor Nr.				
	1	2	3	4	5
Ja	x		x		x
Nein		x ^{*2}		x	
...					
	*2	„Nein, bisher nur ein Bauvorhaben betreut.“			

Tab. 8-2: Antworten der Labore auf die 2. Frage der Vergleichsuntersuchung

3. Frage	Wie stellen Sie die Wassertemperatur sicher?
Labor Nr.	Antwort
1	„mittels Einhängethermostat“
2	„Thermostat und Thermometer“
3	„Thermostat“
4	„DAkKS-kalibriertes Thermometer Thermostat“
5	„Thermostat“

Tab. 8-3: Antworten der Labore auf die 3. Frage der Vergleichsuntersuchung

4. Frage	Spezifizieren Sie ihre genutzte Waage (Hersteller, Typ, Wägebereich, Genauigkeit, Toleranzen bei maximaler und minimaler Auslastung)
Labor Nr.	Antwort
1	„Sartorius AG Germany – LA 1200 S – 5g bis 12000g – d 0,1g – e 1g“
2	„Sartorius – LC 1200 S – Wägebereich max. 12000g – Genauigkeit 0,1g – Abweichung bei max. Auslastung +0,2g, min. Auslastung 0,0g“
3	„Mettler PM 6000 – bis 6100g – 0,1g - ±0,1g“
4	„SARTORIUS Modell: MSA 8201S-000-D0 – Genauigkeit 0,1g – Max 8200g – Minimale Auslastung → Abweichung 0,0g – Maximale Auslastung → Abweichung -0,1g“
5	„Mettler PM 16-N – 0,0g – 16.000,0g“

Tab. 8-4: Antworten der Labore auf die 4. Frage der Vergleichsuntersuchung

5. Frage	Nutzen Sie zur Temperierung der Probekörper ein zusätzliches Becken?	
Labor Nr.	Antwort	
	Nein	Ja, Wenn Ja, wie überführen Sie die Probekörper in das Wägebekken?
1		„Ja, mit Hand“
2	x	
3	x	
4	x	
5	x	

Tab. 8-5: Antworten der Labore auf die 5. Frage der Vergleichsuntersuchung

6. Frage	Welches Ledertuch nutzen Sie für das Verfahren B? (Art des Leders, Herkunft usw.)
Labor Nr.	Antwort
1	„Autoledertuch (ohne genaue Bezeichnung)“
2	„NIGRIN Performance Autoleder Tran gegerbt, Art. 74129/ 2323cm ² “
3	„Naturleder, Baumarkt“
4	„Schafleder, Real“
5	„Peggy Perfect Fensterleder (Maier Haushaltspflege GmbH) – 100% Leder (Schaf)“

Tab. 8-6: Antworten der Labore auf die 6. Frage der Vergleichsuntersuchung

7. Frage	Spezifizieren Sie Ihren verwendeten Messschieber: Digital oder Analog? - Hersteller/Marke - Flügellänge in mm?
Labor Nr.	Antwort
1	„Analog – Vogel Germany – 150 mm“
2	„Analog – PROMAT RU08 279758 – 80 mm“
3	„Dicke digital TopCraft 39mm – Ø analog Preissler 81mm“
4	„SMT Messzeuge – 40mm“
5	„Digital Promat – 150mm Länge – Flügellänge 40mm; Digital Messschieber – 300mm Länge – Flügellänge 80mm“

Tab. 8-7: Antworten der Labore auf die 7. Frage der Vergleichsuntersuchung

Die Antworten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Verfahren B wird zur Bestimmung der Raumdichte in den Prüfstellen häufiger angewandt als das Verfahren D.

- Mehr als die Hälfte der Teilnehmer haben Erfahrungen mit semiporösen Asphaltdeckschichten aus SMA LA.
- Die Wassertemperatur wird bei allen Prüfstellen elektronisch/automatisch geregelt.
- Die eingesetzten Waagen entsprechen der TP A, Teil 6 (Ablesegenauigkeit von 0,1 g) und weisen im Mittel einen Wägebereich bis 10.000 g bei einer Genauigkeit von maximal 0,1 g auf.
- Nur ein Labor arbeitet mit zwei Becken zur Temperierung und Wägung. Die TP A, Teil 6 weist keine Einschränkung diesbezüglich auf.
- Die Mehrzahl der Ledertücher bestehen aus Naturleder.
- Die Flügellänge der Messschieber ist nach den Angaben bei 3 von 5 Laboren nachvollziehbar geeignet, um einen Durchmesser von 150 mm in der mittleren Höhe eines Bohrkernes zu messen. Bei 2 von 5 Laboren kann die Flügellänge nicht eindeutig nachvollzogen werden. Die TP A, Teil 6 macht diesbezüglich keine Vorgaben. Die Mehrzahl der Labore arbeitet mit digitalen Messschiebern.

8.3 Auswertung der Ergebnisse

Nachfolgend sind die Einzelergebnisse und Mittelwerte der Labore graphisch dargestellt. Im Labor 2 und 5 wurden die Messungen durch zwei Laboranten durchgeführt. Die Ergebnisse des Forschungsnehmers wurden in der Graphik ebenfalls eingetragen und farblich gekennzeichnet. Die Nummern in der Abszisse stehen für die Prüfkörper. Keiner der Messwerte konnte als Ausreißer identifiziert werden.

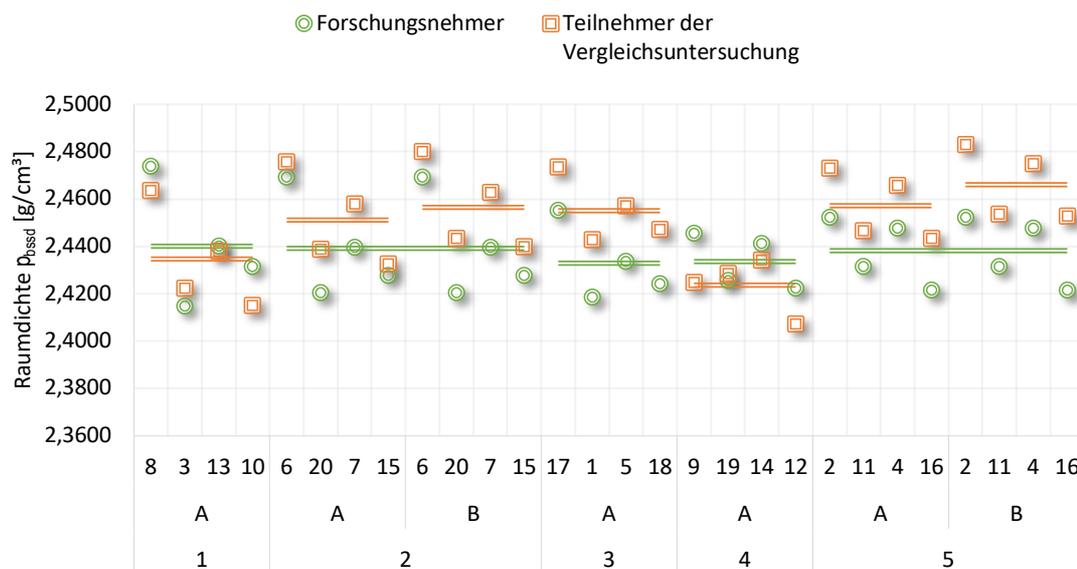


Bild 8-1: Zusammenfassung der Vergleichsuntersuchung für das Verfahren B zur Bestimmung der Raumdichte an einem SMA 8 LA

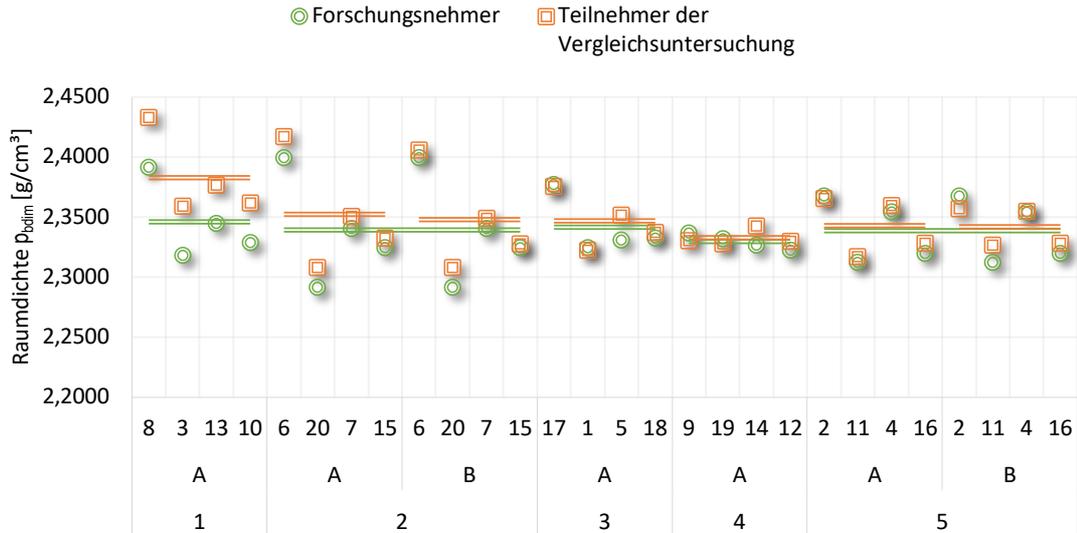


Bild 8-2: Zusammenfassung der Vergleichsuntersuchung für das Verfahren D zur Bestimmung der Raumdichte an einem SMA 8 LA

Die Relationen zwischen den Ergebnissen des Forschungsnehmers und der Teilnehmer der Vergleichsuntersuchung zeigen in dem Bild 8-1 und Bild 8-2 unabhängig vom Verfahren zur Raumdichtebestimmung vergleichbare Trends auf. Insgesamt verschiebt sich der Gruppenmittelwert der Teilnehmer der Vergleichsuntersuchung im Vergleich zum Forschungsnehmer tendenziell auf ein höheres Niveau der Raumdichte. Daher wurden die nachfolgenden Mittelwerte zwischen dem Forschungsnehmer und den Teilnehmern der Vergleichsuntersuchung mit einem t-Test ($\alpha = 5\%$) betrachtet, ob diese der gleichen Grundgesamtheit zuzuordnen sind (Hypothese). Würde die Hypothese nicht erfüllt werden, könnte die Schlussfolgerung lauten, dass die Ergebnisse des Forschungsnehmers im Vergleich zu anderen RAP Stra anerkannten Laboren signifikant abweichen.

Verfahren	Arithmetische Mittelwerte [g/cm³]		Hypothese erfüllt
	Forschungsnehmer	Teilnehmer der Vergleichsuntersuchung	
Verfahren B	2,4373	2,4492	Ja
Verfahren D	2,3391	2,3497	Ja

Tab. 8-8: Ergebnisse des t-Test bei beiden Verfahren

Die Mittelwerte des Forschungsnehmers beider Verfahren sind im Vergleich mit den Mittelwerten der anderen Labore nicht signifikant unterschiedlich und können einer Grundgesamtheit zugeordnet werden.

8.4 Schlussfolgerungen aus der Vergleichsuntersuchung

Es konnte statistisch nachgewiesen werden, dass die Mittelwerte des Forschungsnehmers vergleichbar zu den Ergebnissen anderer Labore sind. Für die weitere Interpretation der Ergebnisse des Forschungsprojektes ist es von Bedeutung die ermittelte Präzision unter Wiederholbedingungen hinsichtlich der Präzision unter Vergleichsbedingungen abschätzen zu können.

Verfahren	Wiederholpräzision (s_r) [g/cm ³]		Vergleichspräzision (s_R) [g/cm ³]
	Forschungsnehmer	Vergleichsuntersuchung	
Verfahren B	0,0006	0,0006	0,0446
Verfahren D	0,0008	0,0010	0,0820

Tab. 8-9: Ergebnisse des Präzisionsabschätzung⁴ des Forschungsnehmers und der Vergleichsuntersuchung

Der Vergleich der für beide Grundgesamtheiten abgeschätzten Präzision unter Wiederholbedingungen zeigt beim Verfahren B zwischen dem Forschungsnehmer und der Vergleichsuntersuchung keine Abweichung. Beim Verfahren D ist tendenziell in der Vergleichsuntersuchung eine höhere Präzision unter Wiederholbedingungen festzustellen. Es wird abgeschätzt, dass die geringere Streuung des Forschungsnehmers auf die vorangegangenen Arbeiten im Forschungsprojekt bzw. Häufigkeit bei der Anwendung des Verfahrens D zurück zu führen sind. Vergleicht man die Präzision der beiden Verfahren so ist festzustellen, dass beim Verfahrens D gegenüber dem Verfahren B, sowohl unter Wiederhol- wie auch unter Vergleichsbedingungen, eine größere Streuung der Ergebnisse zu erwarten ist.

Die Präzision unter Vergleichsbedingungen ist beim Verfahren B um ca. den Faktor 75 und im Verfahren D um den Faktor 82 höher als unter Wiederholbedingungen. Beim Verfahren B wird in der TP A, Teil 6 eine Vergleichspräzision für ein Asphaltmischgut mit einem Größtkorn von 8 mm von 0,0227 g/cm³ bei zwei Proben angegeben. Diese wird beim SMA 8 LA um den Faktor 2 überschritten. Grund hierfür kann der höhere Hohlraumgehalt der semiporösen Schicht im Vergleich zu dichten Asphaltdeckschichten sein.

9 Einflussfaktoren bei der Raumdichtebestimmung

Wie in Abschnitt 7 angedeutet scheint das Niveau und das Streumaß der Raumdichte verfahrensbedingt von verschiedenen Einflussgrößen abhängig zu sein. Zum Vergleich der Verfahren und deren Empfindlichkeit hinsichtlich unterschiedlicher Einflüsse resultierend aus den Einflussfaktoren auf die Kennwerte der Raumdichtebestimmung, (Niveau und Streumaß) wurden multiple Regressionsanalysen durchgeführt. Die nach den Technischen Prüfvorschriften, Lieferbedingungen und der europäischen Norm bekannten Einflussgrößen sind:

- der Hohlraumgehalt bzw. national die Mischgutart/-sorte (Hbit in Vol.-%)
- die Prüfkörperhöhe (h in mm)
- die Prüfkörpermasse (md in g)
- und der Anteil der Korngruppe 11,2/16.

Letzteres kann in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden, da alle im Projekt verwendeten Mischgutsorten einen Nennkorndurchmesser von 8 mm aufweisen. Der Anteil wird zu 0 angenommen. Als weitere Faktoren werden die Art und Ausprägung der Textur (MPD und g), sowie mischgutspezifische Faktoren wie die Krümmungszahl (CC) und die Ungleichförmigkeitszahl (CU) mit berücksichtigt.

Mit der Kenntnis zum Einfluss der genannten Faktoren können spezielle Einsatzbereiche der Verfahren definiert und geprüft werden warum ein Verfahren bei bestimmten Kennwerten angewendet werden kann, bei anderen nicht. Das Problem bei einer Betrachtung aller Einflussfaktoren auf die Raumdichte oder die Streumaße ist, dass die einzelnen Faktoren aus statistischer Sicht nicht voneinander abhängig sein dürfen. Die genannten Faktoren sind jedoch alle voneinander abhängig. Mit zunehmender Prüfkörperhöhe/Prüfkörperdurchmesser (Volumen) steigen auch die Masse und die Fläche der Textur. Da die geometrischen Kennwerte, die Prüfkörpermasse und die charakterisierenden Kennwerte alle mit- und untereinander Einfluss auf das Ergebnis der Raumdichte nehmen und keine Ersatzkennwerte hinzugezogen werden können, wird nachfolgend wissentlich die Betrachtung über mit- und voneinander abhängigen Einflussfaktoren durchgeführt, da diese nur als vergleichendes Instrument zwischen den Verfahren herangezogen werden. Nachfolgend sind die Einflussfaktoren und zugehörigen Merkmale tabellarisch zusammengefasst.

Merkmal	Einflussfaktoren
Raumdichte	Geometrische Kennwerte: Prüfkörperhöhe (h) und -durchmesser (\emptyset)
	Prüfkörpermasse (md)
	charakterisierende Kennwerte: Hohlraumgehalt (Hbit), Textur (MPD und g) und die effektiv am Prüfkörper texturierte Fläche (A_{Teff}), Krümmungszahl (CC) und Ungleichförmigkeitszahl (CU)
Streumaß / statistische Unsicherheit einer Gruppe	Geometrische Kennwerte: Prüfkörperhöhe (h) und -durchmesser (\emptyset)
	Prüfkörpermasse (md)
	charakterisierende Kennwerte: Hohlraumgehalt (Hbit), Textur (MPD und g) und die effektiv am Prüfkörper texturierte Fläche (A_{Teff}), Krümmungszahl (CC) und Ungleichförmigkeitszahl (CU)

Tab. 9-1: betrachtete Abhängigkeit der Merkmale und Einflussfaktoren

Bei den Verfahren C – Umhüllung mit Wachs, der Laserabtastung und der Radiometrischen Dichtebestimmung kann der Prüfkörperdurchmesser nicht als Einflussfaktor mitberücksichtigt werden, da nur Prüfkörper mit einem Durchmesser von 150 mm untersucht wurden.

Die effektiv texturierte Oberfläche (A_{Teff}) ist eine prozentuale Angabe der texturierten Fläche eines Prüfkörpers im Verhältnis zur Gesamtoberfläche eines Prüfkörpers. Der Kennwert soll den Zusammenhang zwischen den Bohrkerndurchmesser, der Bohrkernhöhe und der Textur beschreiben.

Der Einfluss auf die Raumdichtebestimmung bei den Bohrkernen kann nicht abgeschätzt werden. Grund hierfür ist der geringe Stichprobenumfang von nur drei Baumaßnahmen mit Prüfkörpern gleicher Höhe und Durchmesser.

Die nachfolgend abgebildeten Abhängigkeiten sind nur ein Indiz, ob und inwieweit die Raumdichtebestimmung mit einem bestimmten Verfahren abhängig vom Einflussfaktor ist. Sie sagen nichts zur Art der Abhängigkeit aus bzw. ob und in welcher Größenordnung die Raumdichte bzw. die Standardabweichung sich bei Veränderung des Einflussfaktors verändert. Ein hoher Einfluss ist gleichbedeutend mit einem Niveau von 1. Kein Einfluss liegt vor, wenn ein Niveau von 0 in den Abbildungen dargestellt ist.

Die Koeffizienten sagen aus, inwieweit sich ein Merkmal verändert, wenn der Einflussfaktor verändert wird. Diese sind den einzelnen Zeilen in der Spalte 1 für den Einfluss auf die Raumdichte (ρ) bzw. die Präzision (s) in g/cm^3 aufgelistet. Ein positiver Koeffizient zeigt, dass die Raumdichte zunimmt oder die Präzision sich verschlechtert. Ein negativer Koeffizient zeigt an, dass die Raumdichte abnimmt und die Präzision sich verbessert wenn der Einflussfaktor zunimmt.

In Tab. 9-2 ist der Einfluss der Kennwerte auf das Niveau der Raumdichte für alle Verfahren dargestellt und interpretiert. Es konnte belegt werden, dass mit steigendem Hohlraumgehalt der verfahrensabhängige Einfluss auf die Raumdichte größer wird. Ausgenommen hiervon sind das Laserabtastungsverfahren und die Umhüllung mit Wachs.

Alle Verfahren weisen hinsichtlich des Niveaus bei der Raumdichtebestimmung an den Laborprüfkörpern auf eine Abhängigkeit zu den mischgutspezifischen Faktoren der Körnungslinie (C_U und C_C) und dem Hohlraumgehalt hin. Nur das Laserabtastungsverfahren und das Verfahren C mit Wachs weist keine Abhängigkeit zur Ungleichförmigkeitszahl auf. Diese Abhängigkeit kann darauf zurückgeführt werden, dass über die Körnungslinie der Hohlraumgehalt eingestellt werden kann. Weitere Interpretationen wurden verfahrensabhängig in der Tab. 9-2 vorgenommen.

Prüfverfahren		Einfluss auf das Niveau der Raumdichte (ρ)	Einfluss auf die Präzision (s) unter Wiederholbedingungen	Interpretation der Ergebnisse		
Verfahren B – Tauchwägung mit Ledertuch				<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund des Archimedischen Prinzips, welches dem Verfahren zugrunde liegt, nimmt der Durchmesser Einfluss auf das Niveau der Raumdichtebestimmung und die Präzision. • Das Verfahren ist stark abhängig vom Hohlraumgehalt und der effektiv texturierten Fläche. • Der Einfluss der Textur und texturierten Fläche kann über den Erfolg des Abtupfens der Probe mit einem Ledertuch in Abhängigkeit von der Texturtiefe der Probe begründet sein. 		
	Hbit				ρ	s
	md				-1,6E-07	6,5E-06
	h				-	1,6E-03
	\emptyset				-1,1E-05	-6,6E-04
	CC				5,3E-03	5,0E-03
	CU				7,5E-04	6,7E-04
	MPD				9,2E-03	-5,2E-02
	g				-5,8E-05	-9,7E-04
	Ateff				2,4E-04	6,2E-03
Verfahren D – Ausmessverfahren				<ul style="list-style-type: none"> • Der Gestaltfaktor kann Einfluss auf die Prüfung nehmen, da bei der Bildung des idealisierten Zylinders die Textur bei vorwiegend konkav ausgeprägten Oberflächen einem idealisierten Zylinder näherkommt als bei konvexen Texturen. • Die Masse nimmt aufgrund möglicher Abweichungen von der ideal zylindrischen Form der Probekörper, z.B. durch Kornausbrüche, Einfluss auf das Niveau der Raumdichte bzw. die Streuung der Ergebnisse. • Mit zunehmender Höhe oder Durchmesser werden die Messungen mit den Messschiebern unhandlicher für die Prüfer. 		
	Hbit				ρ	s
	md				9,5E-08	8,7E-06
	h				-7,0E-05	1,7E-03
	\emptyset				-	-7,5E-05
	CC				5,7E-03	-2,6E-02
	CU				7,2E-04	1,6E-03
	MPD				1,3E-02	-3,5E-01
	g				-2,1E-04	3,1E-03
	Ateff				-	-1,8E-03

Prüfverfahren			Einfluss auf das Niveau der Raumdichte (ρ)		Einfluss auf die Präzision (s) unter Wiederholbedingungen		Interpretation der Ergebnisse
Lasertastungsverfahren							<ul style="list-style-type: none"> Der Einfluss der Texturausprägung (g) und der Prüfkörperhöhe kann über die Reflexion des Laserstrahls dargestellt werden. Der Einfluss der Masse ist sehr signifikant nimmt aber aufgrund der Größe des Koeffizienten keinen nennenswerten auf das Ergebnis.
	ρ	s					
Hbit	-	-					
md	7,3E-05	7,7E-05					
h	-3,5E-03	-3,3E-03					
\emptyset	-	-					
CC	3,2E-02	-4,4E-03					
CU	-	-					
MPD	-	-					
g	2,7E-03	1,1E-03					
Ateff	-	-					
Verfahren C – Umhüllung mit Wachs							<ul style="list-style-type: none"> Mit zunehmender Masse bzw. bei äquivalenter Dichte wird mehr Wachs zur Umhüllung benötigt. Dies zeigte sich auch bei der Anzahl der benötigten Umhüllungsvorgänge. Auch wenn die erste Schicht des Wachses vor dem nächsten Eintauchen in das flüssige Wachs nahezu abkühlt, wird es trotzdem noch einmal weich und kann dadurch tiefer in die von außen zugänglichen Poren gelangen. Dies verringert das ermittelte Volumen wodurch sich die berechnete Raumdichte erhöht.
	ρ	s					
Hbit	-	-					
md	-3,6E-04	-1,4E-04					
h	1,6E-02	5,9E-03					
\emptyset	-	-					
CC	4,4E-02	5,2E-03					
CU	-	-					
MPD	-	-					
g	-9,0E-03	-1,5E-03					
Ateff	-	-					

Prüfverfahren			Einfluss auf das Niveau der Raumdichte (ρ)	Einfluss auf die Präzision (s) unter Wiederholbedingungen	Interpretation der Ergebnisse	
Verfahren nach ASTM - Evakuieren von Prüfkörpern					<ul style="list-style-type: none"> Die Ausprägung der Textur nimmt Einfluss darauf wie sich die Folie anschmiegen kann. Die geometrischen Imperfektionen weisen aufgrund der geringen Koeffizienten keinen signifikanten Einfluss auf die Raumdichtebestimmung auf. 	
		ρ				s
	Hbit	-9,7E-04				-2,5E-02
	md	4,6E-06				1,9E-07
	h	2,5E-04				-8,5E-05
	\emptyset	-9,1E-05				1,6E-05
	CC	-7,5E-03				4,2E-02
	CU	4,0E-04				5,3E-04
	MPD	-9,4E-02				5,7E-01
	g	7,0E-04				3,7E-03
Ateff	-5,5E-04	-1,3E-04				
Verfahren nach TP A, Teil 82 – Wasseraufnahme unter Vakuum					<ul style="list-style-type: none"> Gegenüber dem Verfahren B nimmt bei der Wasseraufnahme unter Vakuum der Einfluss der Texturtiefe, der Höhe und des Durchmessers zu. Hierbei ist festzuhalten, dass die Texturtiefe den höchsten Koeffizienten aufweist. Es scheint, dass auch unter Vakuum die Raumdichtebestimmung abhängig von den von außen zugänglichen bzw. der Textur zuzuordnenden Hohlräume ist. Für eine weitergehende Interpretation wären zusätzliche Untersuchungen z.B. mit variierendem Vakuum notwendig. 	
		ρ				s
	Hbit	2,0E-03				-2,6E-02
	md	-2,9E-07				-4,0E-09
	h	1,2E-03				-1,8E-04
	\emptyset	2,5E-05				1,1E-05
	CC	-9,6E-03				5,5E-03
	CU	7,7E-04				6,8E-04
	MPD	-1,5E-01				1,7E-02
	g	8,6E-04				-3,9E-05
Ateff	-	-1,6E-04				

Prüfverfahren	Einfluss auf das Niveau der Raumdichte (ρ)		Einfluss auf die Präzision (s) unter Wiederholbedingungen	Interpretation der Ergebnisse
Radiometrische Dichtebestimmung der BAST				
	ρ	s		
Hbit	-2,5E-02	8,0E-03		<ul style="list-style-type: none"> Das radiometrische Verfahren mit der Prüfeinrichtung an der BAST weist einen sehr geringen Koeffizienten betreffend die Prüfkörpermasse auf. Die radiometrische Dichtebestimmung weist jedoch auch Grenzen bezüglich des Hohlraumgehaltes auf, welcher bereits bei Verwendung der Isotopensonde als einbaubegleitende zerstörungsfreie Verdichtungskontrolle bekannt ist. Die Luft vermindert die Durchstrahlung der Prüfkörper, somit ist mit zunehmendem Hohlraumgehalt mit einer Verschlechterung der Präzision zu rechnen.
md	3,5E-06	-9,7E-05		
h	3,9E-05	2,7E-04		
\emptyset	-	-		
CC	2,6E-03	6,1E-02		
CU	9,8E-04	-4,2E-03		
MPD	-2,2E-02	5,2E-01		
g	2,5E-04	-6,4E-03		
Ateff	8,8E-05	6,7E-04		

Tab. 9-2: Einflussfaktoren auf die Raumdichtebestimmung bei unterschiedlichen Verfahren und Probenarten (im Labor hergestellte Prüfkörper und Bohrkerne)

Hinsichtlich der Präzision kann, unabhängig von der jeweiligen Art der Einflussfaktoren, folgende Relation zwischen den Verfahren im Mittel festgestellt werden:

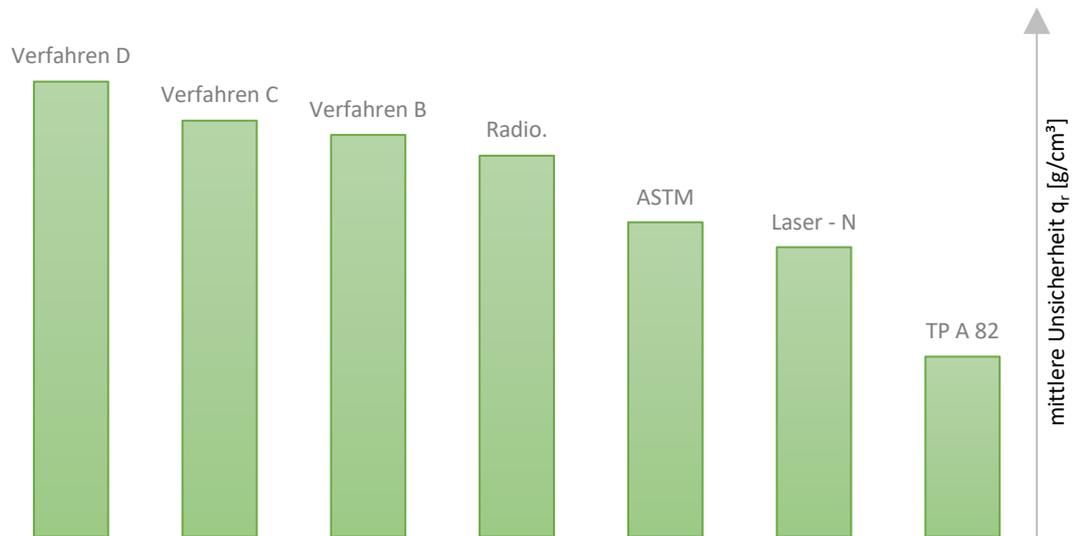


Bild 9-1: Rangfolge der mittleren Unsicherheit unabhängig von der Mischgutsorte, Prüfkörperhöhe und -masse zwischen den Verfahren

Im Vergleich der beiden Umhüllungsverfahren wird mit dem Verfahren nach ASTM im Vergleich zum Verfahren C eine weitaus bessere Präzision erreicht. Durch Hinzunahme von Vakuum kann eine deutlich verbesserte Präzision bei nicht umhüllten Tauchwägungen erreicht werden. Die Verfahren D und C lassen im Mittel die schlechteste Präzision erwarten. Als wesentlicher Grund hierfür wird der hohe Laboranteneinfluss (Vielzahl der Messungen und/oder Prüfkörpervorbereitungen) vermutet.

10 Zusammenfassung und Empfehlungen

10.1 Quantifizierung der Einflüsse auf die Raumdichtebestimmung

Die Ergebnisse an den Laborprüfkörpern können nach statistischer Betrachtung wie folgt tabellarisch zusammengefasst werden.

Verfahren	Einfluss auf die																		Niveau des H _{Bit}	Empfohlener Bereich des H _{Bit}		
	Raumdichte									Streuung unter Wiederholbedingungen												
	H _{bit}	m _d	h	∅	C _C	C _U	MPD	g	A _{Teff}	H _{bit}	m _d	h	∅	C _C	C _U	MPD	g	A _{Teff}				
Spalte	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
Verfahren mit Tauchwägung	ohne Umhüllung	Verf. B	++	o	o	o	++	+	+	o	+	--	o	-	+	+	-	++	+	-	o (- - bei hohen H _{bit})	≤ 6 Vol.-% bei ADS
		TP A, Teil 82	++	o	+	o	++	+	++	o	+	++	o	+	o	--	+	++	o	o	o (- - bei hohen H _{bit})	≤ 12 Vol.-%
	mit Umhüllung	Verf. C	o	+	++	*	++	o	o	+	o	o	+	-	*	-	o	o	+	o	- (- - bei hohen H _{bit})	≤ 3 Vol.-%
		ASTM-Verf.	++	o	o	o	++	+	++	+	o	+	o	o	o	++	o	++	o	o	o (+ bei niedrigen H _{bit})	> 6 Vol.-% ≤ 30 Vol.-%
Ausmessverfahren	Verf. D	++	o	+	o	++	+	++	+	o	+	o	--	+	++	-	++	-	+	o bei hohen H _{Bit} (+)	> 20 Vol.-%	
	Laserabtastung	o	+	++	*	++	o	o	++	o	o	o	+	*	+	o	o	-	o	o (- bei hohen H _{bit})	-	
Radiometrische Raumdichtebestimmung		++	+	o	*	++	+	o	o	o	--	o	o	*	--	+	--	+	o	o (- bei niedrigen H _{bit})	≤ 10 Vol.-%	
Legende:																						
Indizes	Spalte 2 bis 10					Spalte 11 bis 19									Spalte 20							
++	Nimmt einen sehr hohen Einfluss auf das Niveau der Raumdichte.					Nimmt einen sehr hohen Einfluss auf die Präzision der Raumdichtebestimmung und führt zu einer Verbesserung unter Wiederholbedingungen.																
+	Nimmt einen hohen Einfluss auf das Niveau der Raumdichte.					Nimmt einen hohen Einfluss auf die Präzision der Raumdichtebestimmung und führt zu einer Verbesserung unter Wiederholbedingungen.									Im Vergleich zum Referenzverfahren werden der Hohlraumgehalt bzw. das Volumen zu hoch beurteilt.							
o	Nimmt keinen nennenswerten Einfluss auf das Niveau der Raumdichte.					Nimmt keinen nennenswerten Einfluss auf die Präzision der Raumdichtebestimmung.									... ist kein signifikanter Unterschied im Bezug zum Hohlraumgehalt bzw. Volumen erkennbar.							
-						Nimmt einen hohen Einfluss auf die Präzision der Raumdichtebestimmung und führt zu einer Verschlechterung unter Wiederholbedingungen.									... zu niedrig beurteilt.							
--						Nimmt einen sehr hohen Einfluss...									... viel zu niedrig beurteilt.							
*	wurde nicht untersucht.																					

Tab. 10-1: Zusammenfassung der Prüfergebnisse und halbquantitative Interpretation

Anhand der Ergebnisse können allgemeine und verfahrensspezifische Trends abgelesen werden. Primär nehmen die mischgutspezifischen Faktoren wie der Hohlraumgehalt, die Kennziffern der Körnungslinie und die Textur Einfluss auf das Niveau der Raumdichte. Erst sekundär nehmen die geometrischen Eigenschaften der Prüfkörper, wie die Höhe und der Durchmesser, Einfluss auf die Raumdichte. Dies bestätigt deutlich die derzeitige Praxis, unterschiedliche Verfahren für unterschiedliche Mischgutsorten bzw. Bereiche des Hohlraumgehaltes anzuwenden.

Die bisher genutzten Verfahren, welche einen idealen Zylinder als Umhüllende annehmen (Verfahren D) oder den Prüfkörper mit einer Folie umhüllen, führen zum größten Volumen und folglich dem rechnerisch höchsten Hohlraumgehalt. Das Einwachsen und die Behandlung der Prüfkörper mit Vakuum vor der Volumenbestimmung, also Verfahren bei welchen Fluide in die Texturporen und tiefer in den Prüfkörper dringen können, führen zu den geringsten Volumina und niedrigsten Hohlraumgehalten. Dies trifft bei steigenden Hohlraumgehalten auch auf das Verfahren B zu.

Bei Bewertung aller Einflussfaktoren können folgende Empfehlungen zur Anwendung der Verfahren bei den unterschiedlichen Hohlraumgehaltsbereichen gegeben werden. Das Verfahren B stellt das Referenzverfahren zur Raumdichtebestimmung bei dichten Asphaltdeckschichten dar. Für dieses Verfahren wäre nach den bisher durchgeführten Untersuchungen eine Hohlraumgehaltsobergrenze von maximal 6 Vol.-% zu empfehlen. Mit zunehmender Masse und Höhe, wie es bei Asphaltbinder- und Asphalttrag-schichten der Fall ist, scheint die Obergrenze des Hohlraumgehaltes vermutlich höher zu liegen. Von der Anwendung des Verfahrens bei Asphaltdeckschichten mit Hohlraumgehalten von mehr als 6 Vol.-% wird aufgrund der hohen Streuungen abgeraten.

Für Asphaltdeckschichten mit hohem Hohlraumgehalt scheinen hinsichtlich der Streuungen das modifizierte ASTM-Verfahren, das Laserabtastungsverfahren und die Bestimmung des Volumens nach Vakuum (TP A, Teil 82) geeigneter zu sein. Letzteres wäre in den RAP-Stra anerkannten Laboren schnell einführbar und kurzfristig umsetzbar. Das Verfahren führt jedoch zu einem geringeren Hohlraumgehalt der Schicht. Folglich müssten die Anforderungsbereiche neu definiert oder das Ergebnis korrigiert werden. Das ASTM-Verfahren führt zu einem quantitativ niedrigeren Hohlraumgehalt, welcher jedoch präziser bestimmt werden kann als beim zurzeit gültigen Referenzverfahren dem Verfahren D. Hierzu müssten allerdings in den Prüfstellen die benötigten Geräte und Materialien angeschafft werden. Von Vorteil ist, dass alle Geräte und Materialien in Großserien hergestellt werden und uneingeschränkt verfügbar sind.

Alternativ kann mit dem Laserabtastungsverfahren das Volumen schnell und mit sehr geringen Streuungen an der trockenen Probe ermittelt werden. Es bestehen nahezu keine Abhängigkeiten hinsichtlich der Streuungen der Prüfergebnisse von der Texturtiefe. Weiterhin erlaubt das Verfahren eine quantifizierte Abgrenzung zwischen der Textur eines Prüfkörpers und dem zur Raumdichte zugehörigen Volumen. Das im Projekt verwendete Prüfgerät war ein Prototyp. Hinsichtlich der Geräteverfügbarkeit ist im Vergleich zum ASTM-Verfahren derzeit noch ein Nachteil vorhanden. Außerdem war im Projekt ein sehr hoher Aufwand für die Auswertung erforderlich, durch das Zusammenfügen von einzelnen Aufnahmen. Durch Automatisierungsverfahren würde sich dieser Nachteil möglicherweise mit vertretbarem Aufwand beseitigen lassen.

Zusammenfassend ist das nachfolgend dargestellte Prüfschema für die gängigen Asphaltdeckschichten bzw. vergleichbare Asphaltmischgutarten und -sorten zu empfehlen.

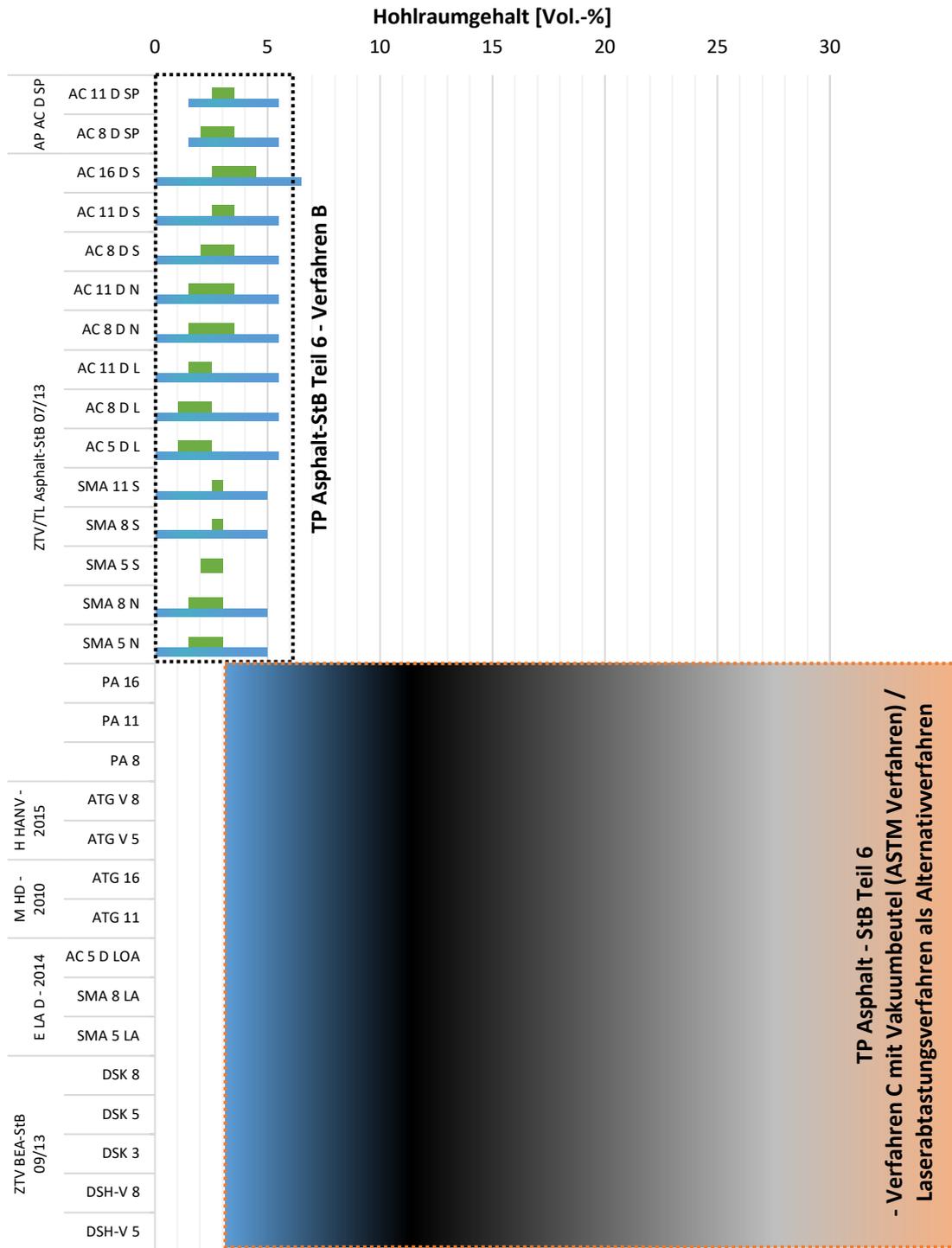


Bild 10-1: Empfehlung zur Anwendung der untersuchten Prüfmethode der Raumdictebestimmung auf die gängigen Asphaltdeckschichten und vergleichbare Mischgutsorten

10.2 Übertragbarkeit der Ergebnisse von Laborprüfkörpern auf Bohrkerne

Die verwendeten Laborprüfkörper dieser Arbeit wurden aus Asphalt-Probepplatten gebohrt und sind hinsichtlich der Anteile an Schnittflächen und texturierten Oberflächen vergleichbar mit Bohrkernscheiben aus einer eingebauten Asphaltdeckschicht, wenn sie gleiche geometrische Abmessungen aufweisen. Dies kann beim direkten Vergleich der Mittelwerte und der Spannweiten der Verfahren untereinander bestätigt werden (vgl. Tab. 10-2 und Bild 10-2).

Mischgut	Verfahren D		Verfahren nach ASTM		Verfahren B	
	Laborprüf-körper	Bohrkern-probe	Laborprüf-körper	Bohrkern-probe	Laborprüf-körper	Bohrkern-probe
SMA 8 S	4,6 ± 0,4	7,1 ± 0,6	4,1 ± 0,3	5,8 ± 0,3	2,9 ± 0,1	4,3 ± 0,3
SMA 8 LA	12,2 ± 0,6	15,1 ± 0,6	11,3 ± 0,4	13,6 ± 0,4	9,6 ± 0,3	11,2 ± 0,3
PA 8	26,0 ± 0,4	23,6 ± 0,3	23,2 ± 0,3	20,7 ± 0,1	14,0 ± 0,6	16,4 ± 0,1

Tab. 10-2: mittlerer Hohlraumgehalt und statistische Unsicherheit für alle Mischgutsorten im Vergleich zwischen Laborprüfkörpern und Bohrkernen aus eingebauten Schichten

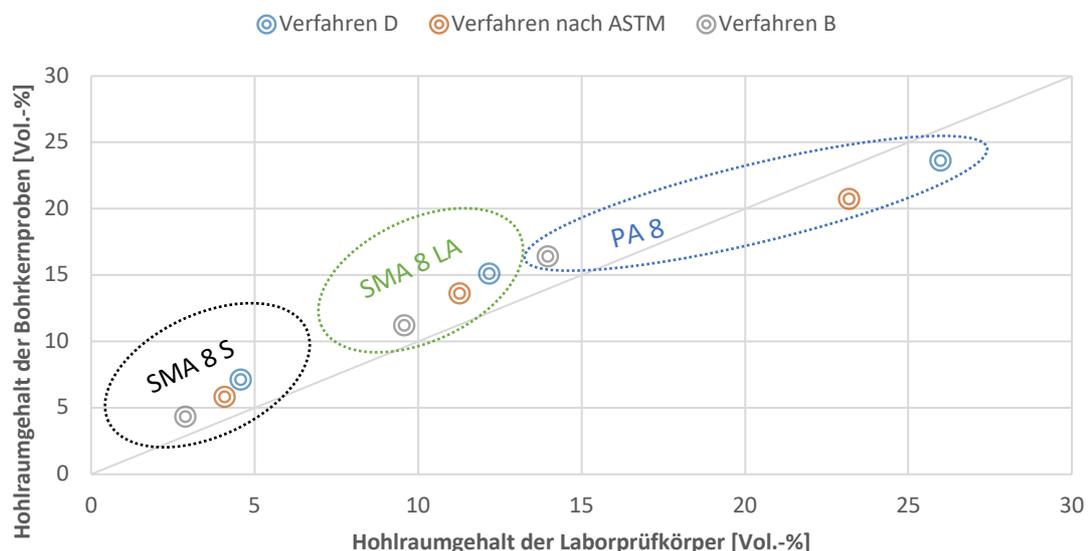


Bild 10-2: Vergleich der Hohlraumgehalte von Laborprüfkörpern und Bohrkernen aus eingebauten Schichten bei drei Verfahren zur Raumdichtebestimmung (D, ASTM und B)

Für die Praxis ist der Marshall-Probekörper (MPK, $h = 63,5 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$, $\varnothing = 101,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) aufgrund des abgeleiteten und abzugsrelevanten Kriteriums „Verdichtungsgrad“ von hoher Bedeutung. Bei der Betrachtung der Einflussfaktoren konnte belegt werden, dass die geometrischen Kennwerte des Prüfkörpers wie die Höhe und der Durchmesser kaum einen Einfluss auf die Raumdichte oder gar deren Streuung nehmen aber die Art und Ausprägung der Textur. Die laborseitig hergestellte Textur des MPK ist einheitlich auf allen Flächen ausgeprägt und unterscheidet sich dahingehend deutlich von Ausbauproben. Unter Berücksichtigung der Flächen am Prüfkörper mit einer Textur kann der Vergleich zwischen einer Ausbauprobe und dem MPK bei SMA 8 LA abgeleitet aus den Ergebnissen im Abschnitt 9 theoretisch wie folgt aussehen:

SMA 8 LA		BK (Ø 150, h = 33 mm)	MPK (Ø 101,6, h = 63,5 mm)
Anteil der Fläche mit Textur bezogen auf den gesamten Prüfkörper [%]		42 %	100 %
Raumdichte nach [g/cm ³]	Verfahren B	2,280 ± 0,011	2,284 ± 0,047
	Verfahren D	2,278 ± 0,035	2,275 ± 0,057
	Verfahren ASTM	2,280 ± 0,017	2,273 ± 0,019

Tab. 10-3: arithmetische Ermittlung der Raumdichten und der Streuung von SMA 8 LA zur Beurteilung des Verdichtungsgrades unter Wiederholbedingungen

Anhand der ermittelten Daten wurde eine Abschätzung der Verteilung mit 10.000 Fallbeispielen errechnet (vgl. Bild 10-3). Diese kann zum Vergleich der Verfahren herangezogen werden.

Das Referenzverfahren (Verfahren B) lässt gegenüber den anderen Verfahren am Bohrkern eine geringe Streuung erwarten. Mit zunehmender Textur bzw. ohne Schnittkanten nimmt die Streuung am MPK deutlich zu. Dies führt dazu, dass im Berechnungsbeispiel eine Streuung des Verdichtungsgrades von bis zu $\pm 2\%$ zu erwarten sind. Gegenüber dem Verfahren D mit einer Streuung von bis zu $\pm 3\%$ ist das Verfahren B deutlich günstiger anzusehen. Das Verfahren nach ASTM lässt am Bohrkern gegenüber dem Verfahren B eine höhere Streuung erwarten. Aufgrund des geringeren Einflusses der Textur auf die Streuung (vgl. Abschnitt 10.1) nimmt diese mit zunehmender Textur am MPK weniger zu als beim Verfahren B. Dies führt im Beispiel zu einer deutlich günstigeren verfahrensbedingten Streuung von ca. $\pm 1,2\%$ beim Verdichtungsgrad.

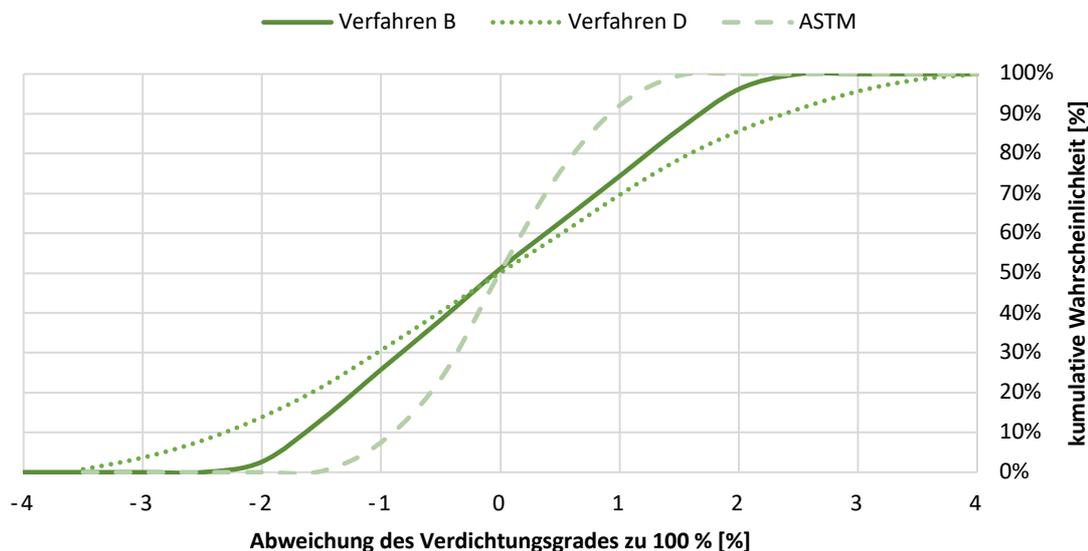


Bild 10-3: kumulative Wahrscheinlichkeit der Abweichung des Verdichtungsgrades unter den in Tab. 9-3 ermittelten Raumdichten und Streuungen am BK und dem MPK für einen SMA 8 LA

Um das Fallbeispiel zu vervollständigen wurde auch die Auswirkung auf den Hohlraumgehalt am Bohrkern betrachtet. Dabei wurde die Streuung infolge der Rohdichtebestimmung nicht mit berücksichtigt. Aufgrund dessen, dass die Streuungen beim Verfahren B am Bohrkern geringer sind als beim Verfahren nach der ASTM sind geringere

Streuungen des Hohlraumgehaltes von ca. $\pm 0,5$ Vol.-% gegenüber ca. $\pm 0,75$ Vol.-% zu erwarten (vgl. Bild 10-4). Mit dem Verfahren D sind die ungünstigsten Auswirkungen auf die Hohlraumgehaltsberechnung mit einer Streuung von bis zu $\pm 1,5$ Vol.-% abzuschätzen.

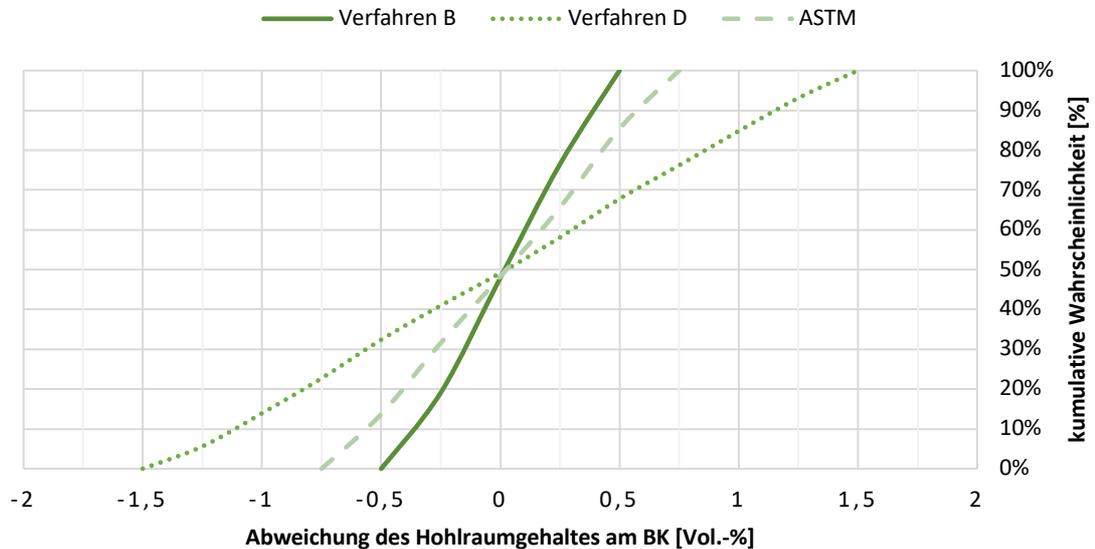


Bild 10-4: kumulative Wahrscheinlichkeit der Abweichung des Hohlraumgehaltes unter den in Tab. 9-3 ermittelten Raumdichten und Streuungen am BK für einen SMA 8 LA

10.3 Empfehlungen für das nationale Regelwerk

Auf Grundlage der derzeitigen Verfahrensweise bei der Durchführung von Kontrollprüfungen ist zu empfehlen, das Verfahren nach ASTM mit wesentlichen Präzisierungen in die TP Asphalt-StB Teil 6 aufzunehmen. Dieses Verfahren liefert bei semiporösen und offenporigen Asphalten ein vergleichbares Raumdichteniveau von Ausbauproben und Marshall-Probekörpern, was eine Verbesserung gegenüber den zurzeit angewandten Verfahren bedeutet. Geeignete Geräte werden in großen Stückzahlen produziert und sind ausreichend am Markt verfügbar.

10.3.1 Empfehlung für eine neues Verfahren C - Umhüllung mit Vakuumbuteln in der TP Asphalt-StB Teil 6

Die DIN EN 12697-6 lässt im Verfahren C die Umhüllung mit geeigneten Materialien, wie zum Beispiel die in dieser Arbeit verwendeten Vakuumbutel zu. Sie spezifiziert jedoch nicht die hierzu benötigten Geräte und die Durchführung, welche für eine standardisierte Umsetzung notwendig sind. Diese werden nachfolgend entsprechend der Gliederung der TP Asphalt-StB Teil 6 formuliert bzw. Empfehlungen für eine Integration des Verfahrens in die Technischen Prüfvorschriften gegeben. Alternativ können diese für eine kurzfristige Umsetzung in eine Arbeitsanleitung genutzt werden.

Abschnitt	Absatz	Text
2	3	Für die Bestimmung des Volumens des Probekörpers werden vier unterschiedliche Verfahren mit den Bezeichnungen A, B, C und D angewendet, die grundsätzlich nach der Art und Beschaffenheit der Probekörperoberfläche festgelegt sind.

Abschnitt	Absatz	Text
2	11 (neu)	<p>Verfahren C: Raumdichte – umhüllter Probekörper:</p> <p>Das Verfahren C wird bei semiporösen und offenen Probekörper-Oberflächen angewendet. Bei diesem Verfahren wird der Probekörper mit einem definierten Vakuumbutel umhüllt, sodass die inneren Hohlräume, welche Teil der Materialzusammensetzung sind, bei der anschließenden Tauchwägung von der Flüssigkeit unberührt bleiben.</p> <p>Nach dem Verfahren C sind Probekörper aus Asphaltdeckschichtmischgut für lärmtechnisch optimierte Deckschichten aus SMA LA nach E LA D sowie für Offenporige Asphaltdeckschichten ZTV/TL Asphalt-StB zu prüfen. Das Verfahren ist ebenfalls anzuwenden bei hohlräumreichen Asphalttraggerüsten nach H HANV und M HD.</p>
3	Aufzählung 7 und 8 (neu)	<p>- Vakuumiergerät: <i>Anmerkung: Das Gerät muss in der Lage sein, mindestens 98 % Vakuum in weniger als 60 s zu erzeugen und den offenen Kunststoffbeutel dicht zu verschweißen. Hierfür hat sich eine Mindestschweißzeit von 2 s bei einer Foliendicke von 150 µm als geeignet erwiesen. Es wird empfohlen einen Schweißbalken zu verwenden, welcher ein Abtrennen der überschüssigen Folie ermöglicht.</i></p> <p>- Vakuumbutel: <i>Anmerkung: Die Vakuumbutel müssen eine Foliendicke von 150 µm aufweisen. Geringere Foliendicken reißen aufgrund der scharfen Kanten an den Prüfkörpern schnell auf. Die Größe der Beutel sollte so gewählt werden, dass der Prüfkörper maximal Zweidrittel der Fläche des Beutels einnimmt und zu allen geschlossenen Rändern mindestens 1,5 cm Abstand besteht.</i></p>
5	5.3 (neu) Verfahren D kann auf Abschnitt 5.4 verschoben werden.	<p>5.3.1 Durchführung</p> <p>a) An der trockenen Probe ist die Masse m_1 auf 0,1 g zu bestimmen.</p> <p>b) Die Probe wird in einem Vakuumbutel auf 98% evakuiert. Beim Einlegen der Probe in den Vakuumbutel ist darauf zu achten, dass die Probe soweit wie möglich aber mindestens 1,5 cm vom Schweißbalken entfernt ist und zum hinteren Rand mindestens 1,5 cm Abstand besteht.</p> <p>c) An der trockenen, umhüllten Probe ist die Masse m_2 durch Wägung zu bestimmen. Falls überschüssige Folie abgetrennt werden kann, sollte dies vor der Wägung durchgeführt werden.</p> <p>d) Die Probe wird für eine Dauer von (90 ± 30) min im Wasserbad auf $(25,0 \pm 1,0)$ °C temperiert. Die umhüllte Probe ist unter Wasser von anhaftenden Luftblasen zu befreien.</p> <p>e) Die Masse der Probe in Wasser m_3 ist durch Wägung zu bestimmen.</p> <p>f) Die Probe ist aus dem Wasser zu entnehmen und von der Folie zu befreien, sodass die Probe nicht in Berührung mit der Flüssigkeit kommt. Hierfür ist zu empfehlen den Beutel vorab mit einem Handtuch trocken zu tupfen. An der Probe ist die Masse m_4 durch Wägung zu bestimmen.</p> <p>5.3.2 Auswertung</p> <p>Die Berechnung der Raumdichte – BSEA erfolgt mit nachfolgender Gleichung, wenn die Trockenmasse nach dem Umhüllen und Tauchwägen (m_4) um weniger als 1,0 M.-% von der ersten Trockenmasse (m_1) abweicht:</p> $\rho_{bsea} = \frac{m_1}{[m_4 + (m_2 - m_1)] - m_3 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{Beutel}}}$ <p>mit:</p> <p>m_1 = Masse der trockenen Probe vor dem Vakuumieren in g m_2 = Masse der trockenen, vakuumierten Probe mit Vakuumbutel in g m_3 = Masse der vakuumierten Probe mit Vakuumbutel unter Wasser in g m_4 = Masse der aus dem Vakuumbutel ausgepackten Probe in g ρ_{Beutel} = Dichte der Vakuumbutel nach Angaben des Herstellers in g/cm³ mit einer Genauigkeit von 0,001 g/cm³</p> <p><i>Anmerkung: Falls die Dichte der Vakuumbutel nicht bekannt ist, kann diese über kombinierte Dichtermittlung mit einem Material bekannter Dichte über Tauchwägung ermittelt werden.</i></p>

Tab. 10-4: Textbausteine zur Ergänzung der TP Asphalt-StB Teil 6 um ein Verfahren C – umhüllter Probekörper mit Vakuumbutel.

Dieses Verfahren bietet die Chance, als eine der ersten Methoden die Raumdichte präzise an trockenen Prüfkörpern zu bestimmen, sodass diese ohne mehrmalige und zeitaufwändige Trocknung weiter für zum Beispiel die Bestimmung der Rohdichte oder der Mischgutzusammensetzung und Bindemittleigenschaften genutzt werden können. Durch die Kontrolle über die Masse m_4 ist dieses Vorgehen abgesichert.

Weiterhin empfehlen wir die Überarbeitung der E LA D, ZTV Asphalt-StB, H HANV und den M HD. Das Alternativverfahren zur Erfahrungssammlung an den SMA LA – Schichten sollte das Verfahren C mit Vakuumbutel darstellen und nicht das derzeit empfohlene Verfahren D. Dieses Vorgehen sollte zur Erfahrungssammlung auch für die Offenporigen Asphalte bzw. Asphaltträgerüste angewendet werden.

10.3.2 Empfehlung für die Grenzwerte und Toleranzen

Bei Anwendung der in Abschnitt 10.3 aufgeführten Änderungen können für die Mischgutsorten SMA 5 LA, SMA 8 LA, PA 8 folgende Grenzwerte und Toleranzen für das Verfahren C empfohlen werden:

Eigenschaften	E LA D		TL/ZTV Asphalt- StB
	SMA 5 LA	SMA 8 LA	PA 8
Asphaltmischgut			
minimaler Hohlraumgehalt MPK [Vol.-%]	11,0	11,0	21
maximaler Hohlraumgehalt MPK [Vol.-%]	13,0	13,0	25
Schichteigenschaften			
Verdichtungsgrad [%]	≥ 97,0	≥ 97,0	≥ 97,0
Hohlraumgehalt [Vol.-%]	11,0 bis 16,0	11,0 bis 16,0	19,0 bis 25,0
Asphaltmischgut der Baumaßnahme			
Der Hohlraumgehalt am MPK jeder Probe darf die Grenzwerte der E LA D bzw. TL Asphalt-StB um nicht mehr als die nachfolgend angegebenen Toleranzen über- oder unterschreiten	1,5 Vol.-%	1,5 Vol.-%	2,0 Vol.-%

Tab. 10-5: Grenzwerte und Toleranzen für das Verfahren C – Umhüllung mit Vakuumbutel an semiporösen und offenporigen Asphaltdeckschichten

10.4 Weiterer Forschungsbedarf

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt belegen den großen Einfluss vielfältiger Faktoren auf eines der am häufigsten angewandten Prüfverfahren im Straßenbau „die Raumdichtebestimmung“. Dieses Forschungsprojekt war darauf ausgelegt primär die Raumdichtebestimmung an semiporösen Schichten zu optimieren. Für die nicht texturierten, massigeren, geometrisch größeren und zum Teil hohlraumreicheren Ausbauproben aus Asphaltbinder- und Asphalttragschichten wird empfohlen das bisherige Verfahren B hinsichtlich der Eignung zu validieren.

11 Literaturverzeichnis

- ASPHALTA Prüf- und Forschungslaboratorium GmbH, 2017. *Ringversuch zur Ermittlung der Vergleichs- und Wiederholpräzision bei der Raumdichtebestimmung von Dünnen Asphaltdeckschichten in Heißbauweise*, s.l.: unveröffentlicht.
- ASTM D6752-03, 01/2004. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method*. s.l.:ASTM International.
- BAST, nicht benannt. *Radiometrische Durchstrahlungseinrichtung der BAST*, s.l.: BAST.
- DIN 1996 - 7, 12/1992. *Prüfung von Asphalt - Teil 7: Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad*. s.l.:Beuth Verlag GmbH.
- DIN 1996-7, 07/1992. *Prüfung von Asphalt – Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad*. s.l.:Beuth Verlag.
- DIN EN 12697-29, 12/2002. *Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 29: Bestimmung der Maße von Asphalt-Probekörpern*. s.l.:Beuth Verlag.
- DIN EN 12697-6, 07/2012. *Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 6 : Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern*. s.l.:Beuth Verlag.
- Dr.-Ing. Renken, 2000. Besonderheiten bei der Prüfung des Hohlraumgehaltes und des Verdichtungsgrades offenporiger Asphaltdeckschichten. *Bitumen*, 2(62. Jahrgang).
- FGSV Nr. 729, 2010. *Merkblatt für die Herstellung von Halbstarren Deckschichten*. s.l.:M HD.
- FGSV Nr. 737, 2015. *Hinweise für die Planung und Ausführung von alternativen Bindschichten*. s.l.:H AI ABi.
- FGSV Nr. 739, 2014. *Empfehlung für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA*. s.l.:E LA D.
- FGSV Nr. 750, 2013. *Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt*. s.l.:M OPA.
- FGSV Nr. 755/0, 2009. *Technische Prüfvorschriften für Asphalt - Statistische Grundlagen zur Auswertung der Untersuchungen, Schiedsuntersuchungen, Allgemeine Angaben im Prüfbericht*. s.l.:TP A, Teil 0.
- FGSV Nr. 756, 2007. *Technische Prüfvorschriften für Asphalt - Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV)*. s.l.:TP A, Teil 33.
- FGSV Nr. 756, 2013. *Technische Prüfvorschriften für Asphalt - Spurbildungsversuch*. s.l.:TP A, Teil 22.
- FGSV Nr. 756, 2016. *Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Teil 6: Raumdichte von Asphalt-Probekörpern*, s.l.: TP A, Teil 6.
- FGSV Nr. 776, 2015. *Hinweise für die Herstellung von Abdichtungssystemen aus Hohlraumreichen Asphaltträgergerüsten mit Nachträglicher Verfüllung für Ingenieurbauten aus Beton*. s.l.:H HANV.
- FGSV Nr. 797, 07/13. *Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen*. s.l.:TL Asphalt-StB 07/13.

- FGSV Nr. 798, 09/13. *Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen - Asphaltbauweisen.* s.l.:ZTV BEA-StB 09/13.
- FGSV Nr. 799, Ausgabe 2007 / Fassung 2013. *Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt.* s.l.:ZTV Asphalt-StB 07/13.
- FGSV Nr. 926/1, 2000. *Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen - Teil 1: Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren.* s.l.:Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen.
- FGSV Nr. 926/2, 2003. *Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen - Teil 2: Erkennen und Behandeln von Ausreißern.* s.l.:Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen.
- Müller BBM GmbH, 11/2006. *Weiterentwicklung offenporiger Asphalte: Schalltechnische und bautechnische Untersuchungen an den realisierten Strecken in Bayer – Schlussbericht,* s.l.: s.n.
- Müller-BBM GmbH, 12/2018. *Durchführung von Labormessungen des Schallabsorbtionsgrades und des Strömungswiderstandes an Bohrkernen ,* s.l.: unveröffentlicht.

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Untersuchungskonzept an Laborprüfkörpern (° - wurde nicht durchgeführt).....	14
Tab. 4-1:	exemplarische Prüfkörper der Mischgutarten vor und nach dem Paraffinieren.....	19
Tab. 4-2:	Fotodokumentation der abbildenden Textur der Prüfkörper bei unterschiedlichem Vakuum.....	24
Tab. 4-3:	Präzisierung der Randbedingungen für das Evakuieren von Prüfkörpern in Beuteln	25
Tab. 5-1:	Zusammensetzung der verwendeten Asphaltmischgutsorten und Vergleich mit den Anforderungen der TL/ZTV Asphalt-StB bzw. E LA D	31
Tab. 6-1:	Zusammenfassung des Verdichtungserfolges der Asphalt-Probepplatten (* - Ergebnisse der arithmetischen Mittelwerte).....	32
Tab. 8-1:	Antworten der Labore auf die 1. Frage der Vergleichsuntersuchung	39
Tab. 8-2:	Antworten der Labore auf die 2. Frage der Vergleichsuntersuchung	39
Tab. 8-3:	Antworten der Labore auf die 3. Frage der Vergleichsuntersuchung	39
Tab. 8-4:	Antworten der Labore auf die 4. Frage der Vergleichsuntersuchung	40
Tab. 8-5:	Antworten der Labore auf die 5. Frage der Vergleichsuntersuchung	40
Tab. 8-6:	Antworten der Labore auf die 6. Frage der Vergleichsuntersuchung	40
Tab. 8-7:	Antworten der Labore auf die 7. Frage der Vergleichsuntersuchung	40
Tab. 8-8:	Ergebnisse des t-Test bei beiden Verfahren.....	42
Tab. 8-9:	Ergebnisse des Präzisionsabschätzung Forschungsnehmers und der Vergleichsuntersuchung	43
Tab. 9-1:	betrachtete Abhängigkeit der Merkmale und Einflussfaktoren	44
Tab. 9-2:	Einflussfaktoren auf die Raumdichtebestimmung bei unterschiedlichen Verfahren und Probenarten (im Labor hergestellte Prüfkörper und Bohrkern)	49

Tab. 10-1:	Zusammenfassung der Prüfergebnisse und halbquantitative Interpretation	51
Tab. 10-2:	mittlerer Hohlraumgehalt und statistische Unsicherheit für alle Mischgutsorten im Vergleich zwischen Laborprüfkörpern und Bohrkernen aus eingebauten Schichten	52
Tab. 10-3:	arithmetische Ermittlung der Raumdichten und der Streuung von SMA 8 LA zur Beurteilung des Verdichtungsgrades unter Wiederholbedingungen	55
Tab. 10-4:	Textbausteine zur Ergänzung der TP Asphalt-StB Teil 6 um ein Verfahren C – umhüllter Probekörper mit Vakuumbbeutel.	57
Tab. 10-5:	Grenzwerte und Toleranzen für das Verfahren C – Umhüllung mit Vakuumbbeutel an semiporösen und offenporigen Asphaltdeckschichten	58
Tab. A.1-0-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 S und eine Prüfkörperhöhe von 25 mm - Laborprüfkörper	64
Tab. A.1-0-2:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 S und eine Prüfkörperhöhe von 50 mm - Laborprüfkörper	65
Tab. A.1-0-3:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 LA und eine Prüfkörperhöhe von 25 mm - Laborprüfkörper	66
Tab. A.1-0-4:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 LA und eine Prüfkörperhöhe von 50 mm - Laborprüfkörper	67
Tab. A.1-0-5:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte PA 8 und eine Prüfkörperhöhe von 25 mm - Laborprüfkörper	68
Tab. A.1-0-6:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte PA 8 und eine Prüfkörperhöhe von 50 mm – Laborprüfkörper	69
Tab. A.1-0-7:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Prüfkörper aus eingebauten Schichten	70
Tab. A.1-0-8:	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Prüfkörper aus der Vergleichsuntersuchung	71

13 Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1:	Bereiche des Hohlraumgehaltes in Erstprüfungen (grün) und Kontrollprüfungen (blau) für die Walzasphaltnischgutarten	13
Bild 4-1:	Gliederung der Verfahren nach den Messprinzipien	15
Bild 4-2:	Archimedisches Prinzip der Tauschwägung	16
Bild 4-3:	Messprinzip des Ausmessverfahrens – Verfahren D nach dem Prinzip der DIN EN 12697-29 (DIN EN 12697-29, 12/2002)	17
Bild 4-4:	Fahrbahnoberfläche eines PA 8 mit einer Nutzungsdauer von über 8 Jahren (links); Bohrkern aus einer Fahrbahn mit einer offenporigen Asphaltdeckschicht, gebohrt bei über 30°C (rechts)	17
Bild 4-5:	Veränderung des Verdichtungsgrades und des Hohlraumgehaltes bei unterschiedlichen Prüfkörperdicken durch Verlust von Körnern an den Prüfkörpern	18
Bild 4-6:	Prüfkörper (SMA 8 LA) nach einem Durchgang Paraffinieren mit Kennzeichnung der noch erkennbaren Fehlstellen	20
Bild 4-7:	Im Projekt verwendete Vakuummaschine vom Typ NT 21 der Fa. Boss Vakuum.....	21
Bild 4-8:	Einfluss der Foliendicke auf die Raumdichtebestimmung bzw. den abgeleiteten Hohlraumgehalt bei einem 98% Vakuum, Prüfkörper \varnothing 150 mm aus PA 8.....	22
Bild 4-9:	Einfluss des Vakuums auf die Raumdichte bzw. den abgeleiteten Hohlraumgehalt bei einer Foliendicke von 150 μ m, Prüfkörper \varnothing 150 mm aus PA 8.....	24
Bild 4-10:	Prinzipskizze der Durchstrahlungseinrichtung	26
Bild 4-11:	Durchstrahlungseinrichtung mit Bohrkern auf Drehteller.....	26
Bild 4-12:	3D-Darstellung und Detailansicht der Oberfläche des SMA 8 S (Müller-BBM GmbH, 12/2018)	27
Bild 4-13:	3D-Darstellung und Detailansicht der Oberfläche des SMA 8 LA (Müller-BBM GmbH, 12/2018)	28
Bild 4-14:	3D-Darstellung und Detailansicht der Oberfläche des PA 8 (Müller-BBM GmbH, 12/2018).....	28
Bild 4-15:	Ergebnisse erster Tastversuche der Raumdichtebestimmung mit dem Laserabtastungsverfahren (Klammerwerte – Spanne des Hohlraumgehaltes).....	29
Bild 6-1:	Spannweiten und Mittelwerte des Verdichtungsgrades an den hergestellten Asphalt-Probepplatten vor den Anforderungsbereichen der TP A, Teil 33	32
Bild 6-2:	Spannweiten und Mittelwerte der Hohlraumgehalte an den hergestellten Asphalt-Probepplatten vor den Anforderungsbereichen der TL Asphalt-StB bzw. den E LA D für Erstprüfungen	33
Bild 7-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an der Mischgutart Splittmastixasphalt SMA aus Laborprüfkörpern – Verfahren C ($2,3 \pm 0,2$) Vol.-%, Laser-N ($2,3 \pm 0,1$) Vol.-%.....	34
Bild 7-2:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an den Bohrkernen einer Baumaßnahme mit der Mischgutart Splittmastixasphalt SMA.....	35
Bild 7-3:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an der Mischgutart Lärmarmen Splittmastixasphalt SMA LA – Verfahren C ($7,9 \pm 0,2$) Vol.-%, Laser-N ($10,1 \pm 0,5$) Vol.-%.....	36
Bild 7-4:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an den Bohrkernen einer Baumaßnahme mit der Mischgutart Lärmarmen Splittmastixasphalt SMA LA.....	37

Bild 7-5:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an der Mischgutart Offenporiger Asphalt PA – TP A, Teil 82 ($10,4 \pm 0,4$) Vol.-%, Verfahren C ($9,3 \pm 1,0$) Vol.-%, Laser-N ($21,5 \pm 0,4$) Vol.-%	37
Bild 7-6:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Raumdichteuntersuchungen an den Bohrkernen einer Baumaßnahme mit der Mischgutart Offenporiger Asphalt PA	38
Bild 8-1:	Zusammenfassung der Vergleichsuntersuchung für das Verfahren B zur Bestimmung der Raumdichte an einem SMA 8 LA	41
Bild 8-2:	Zusammenfassung der Vergleichsuntersuchung für das Verfahren D zur Bestimmung der Raumdichte an einem SMA 8 LA	42
Bild 9-1:	Rangfolge der mittleren Unsicherheit unabhängig von der Mischgutsorte, Prüfkörperhöhe und -masse zwischen den Verfahren	50
Bild 10-1:	Empfehlung zur Anwendung der untersuchten Prüfmethode der Raumdichtebestimmung auf die gängigen Asphaltdeckschichten und vergleichbare Mischgutsorten.....	53
Bild 10-2:	Vergleich der Hohlraumgehalte von Laborprüfkörpern und Bohrkernen aus eingebauten Schichten bei drei Verfahren zur Raumdichtebestimmung (D, ASTM und B).....	54
Bild 10-3:	kumulative Wahrscheinlichkeit der Abweichung des Verdichtungsgrades unter den in Tab. 9-3 ermittelten Raumdichten und Streuungen am BK und dem MPK für einen SMA 8 LA.....	55
Bild 10-4:	kumulative Wahrscheinlichkeit der Abweichung des Hohlraumgehaltes unter den in Tab. 9-3 ermittelten Raumdichten und Streuungen am BK für einen SMA 8 LA	56

Anlage 1

Zusammenfassung der Ergebnisse

Mischgutart	PK-Höhe [mm]	Verfahren	Ø [mm]	Raumdichte [g/cm³]								Vertrauensbereich		Hohlraumgehalt [Vol.-%]			
				Mittelwert	Median	kleinster Wert	größter Wert	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anzahl ohne Ausreißer	Min	Max	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert	
SMA 8 S	25	B	100	2,5094	2,5057	2,4940	2,5324	0,0384	0,0147	0,59%	5	2,4965	2,5223	3,30	2,80	3,80	
			150	2,5294	2,5303	2,5157	2,5397	0,0240	0,0066	0,26%	20	2,5265	2,5323	2,53	2,42	2,64	
			225	2,5194	2,5209	2,5146	2,5226	0,0080	0,0042	0,17%	3	2,5146	2,5241	2,91	2,73	3,10	
		C	150	2,5360	2,5368	2,5231	2,5473	0,0242	0,0102	0,40%	4	2,5260	2,5460	2,27	1,89	2,66	
			D	100	2,4566	2,4651	2,4368	2,4737	0,0369	0,0173	0,70%	5	2,4415	2,4718	5,33	4,75	5,92
				150	2,4643	2,4652	2,415	2,4980	0,0830	0,0211	0,86%	20	2,4551	2,4736	5,04	4,68	5,39
		225		2,4733	2,4711	2,4633	2,4855	0,0222	0,0113	0,46%	3	2,4606	2,4860	4,69	4,20	5,18	
		TP A 82	100	2,5164	2,5169	2,5086	2,5211	0,0125	0,0049	0,20%	5	2,5121	2,5207	3,03	2,86	3,19	
			150	2,5312	2,5318	2,5278	2,5335	0,0057	0,0024	0,10%	4	2,5288	2,5336	2,46	2,37	2,55	
			225	2,5262	2,5252	2,5226	2,5317	0,0091	0,0041	0,16%	4	2,5221	2,5302	2,65	2,50	2,81	
		Radio.	150 (0-2)	2,5544	2,5547	2,5501	2,5581	0,0080	0,0033	0,13%	4	2,5512	2,5577	1,56	1,44	1,69	
			150 (1-2)	2,5502	2,5498	2,5479	2,5533	0,0054	0,0022	0,09%	4	2,5480	2,5524	1,73	1,64	1,81	
		Lasere	150	2,5397	2,5397	2,5392	2,5401	0,0009	0,0005	0,02%	3	2,5391	2,5402	2,13	2,11	2,15	
		ASTM	100	2,4621	2,4643	2,4459	2,4722	0,0264	0,0101	0,41%	5	2,4533	2,4710	5,12	4,78	5,46	
			150	2,4789	2,4772	2,4431	2,5031	0,0599	0,0150	0,61%	16	2,4715	2,4863	4,47	4,19	4,76	
			225	2,5090	2,5107	2,4947	2,5198	0,0251	0,0105	0,42%	4	2,4987	2,5193	3,31	2,92	3,71	

Tab. A.1-0-1: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 S und eine Prüfkörperhöhe von 25 mm - Laborprüfkörper

Mischgutart	PK-Höhe [mm]	Verfahren	Ø [mm]	Raumdichte [g/cm ³]								Vertrauensbereich		Hohlraumgehalt [Vol.-%]		
				Mittelwert	Median	kleinster Wert	größter Wert	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anzahl ohne Ausreißer	Min	Max	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert
SMA 8 S	50	B	100	2,5080	2,5081	2,5033	2,5130	0,0097	0,0042	0,17%	5	2,5044	2,5116	3,35	3,21	3,49
			150	2,5241	2,5255	2,5101	2,5440	0,0339	0,0075	0,30%	17	2,5205	2,5277	2,73	2,59	2,87
			225	2,5188	2,5191	2,5174	2,5198	0,0024	0,0012	0,05%	3	2,5174	2,5202	2,94	2,88	2,99
		C	150	2,5368	2,5370	2,5364	2,5370	0,0006	0,0003	0,01%	3	2,5364	2,5372	2,24	2,23	2,26
		D	100	2,4791	2,4777	2,4687	2,4903	0,0216	0,0096	0,39%	5	2,4707	2,4875	4,46	4,14	4,79
			150	2,4885	2,4867	2,4687	2,5058	0,0371	0,0103	0,41%	19	2,4838	2,4931	4,11	3,93	4,28
			225	2,4950	2,4906	2,4825	2,5164	0,0339	0,0152	0,61%	4	2,4801	2,5099	3,85	3,28	4,43
		TP A 82	100	2,5173	2,5173	2,5142	2,5204	0,0062	0,0027	0,11%	5	2,5149	2,5197	2,99	2,90	3,09
			150	2,5307	2,5327	2,5180	2,5393	0,0213	0,0095	0,38%	4	2,5213	2,5400	2,48	2,12	2,84
			225	2,5277	2,5279	2,5259	2,5290	0,0031	0,0014	0,06%	4	2,5263	2,5291	2,59	2,54	2,65
		Radio.	150 (0-4)	2,5440	2,5435	2,5373	2,5516	0,0142	0,0058	0,23%	4	2,5383	2,5497	1,97	1,75	2,19
			150 (1-4)	2,5428	2,5435	2,5412	2,5436	0,0024	0,0014	0,05%	3	2,5412	2,5443	2,01	1,95	2,07
		Laser	150	2,5331	2,5331	2,5297	2,5365	0,0068	0,0031	0,12%	4	2,5301	2,5362	2,38	2,27	2,50
		ASTM	100	2,4794	2,4791	2,4730	2,4860	0,0130	0,0047	0,19%	5	2,4754	2,4835	4,45	4,30	4,61
			150	2,4953	2,4941	2,4681	2,5159	0,0479	0,0099	0,40%	19	2,4908	2,4997	3,84	3,67	4,01
225	2,5065		2,5042	2,4944	2,5234	0,0291	0,0134	0,53%	4	2,4934	2,5197	3,41	2,90	3,91		

Tab. A.1-0-2: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 S und eine Prüfkörperhöhe von 50 mm - Laborprüfkörper

Mischgutart	PK-Höhe [mm]	Verfahren	Ø [mm]	Raumdichte [g/cm³]								Vertrauensbereich		Hohlraumgehalt [Vol.-%]		
				Mittelwert	Median	kleinster Wert	größter Wert	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anzahl ohne Ausreißer	Min	Max	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert
SMA 8 LA	25	B	100	2,2925	2,2933	2,2905	2,2936	0,0031	0,0017	0,07%	3	2,2905	2,2944	8,52	8,44	8,60
			150	2,2746	2,2764	2,2222	2,2969	0,0747	0,0200	0,88%	16	2,2648	2,2844	9,23	8,84	9,62
			225	2,2560	2,2545	2,2427	2,2723	0,0296	0,0125	0,55%	4	2,2438	2,2682	9,98	9,49	10,46
		C	150	2,3179	2,3178	2,3173	2,3187	0,0014	0,0007	0,03%	3	2,3171	2,3187	7,50	7,47	7,54
		D	100	2,2040	2,2023	2,1731	2,2357	0,0626	0,0226	1,03%	5	2,1842	2,2238	12,05	11,26	12,84
			150	2,1630	2,1635	2,1353	2,1961	0,0608	0,0201	0,93%	16	2,1532	2,1728	13,69	13,29	14,08
			225	2,1982	2,1969	2,1936	2,2040	0,0104	0,0053	0,24%	3	2,1922	2,2042	12,28	12,04	12,52
		TP A 82	100	2,3212	2,3217	2,3180	2,3236	0,0056	0,0023	0,10%	4	2,3189	2,3235	7,37	7,28	7,46
			150	2,3075	2,3075	2,3039	2,3109	0,0070	0,0030	0,13%	4	2,3045	2,3104	7,92	7,80	8,04
			225	2,3246	2,3250	2,3214	2,3270	0,0056	0,0024	0,10%	4	2,3222	2,3270	7,24	7,14	7,33
		Radio.	150 (0-2)	2,2583	2,2543	2,2359	2,2887	0,0528	0,0238	0,0106	4	2,2349	2,2817	9,88	8,95	10,82
			150 (1-2)	2,2345	2,2323	2,2130	2,2603	0,0473	0,0210	0,0094	4	2,2139	2,2551	10,84	10,01	11,66
		Lasert	150	2,2592	2,2606	2,2418	2,2739	0,0321	0,0154	0,68%	4	2,2442	2,2743	9,85	9,24	10,45
		ASTM	100	2,2257	2,2298	2,2041	2,2500	0,0460	0,0198	0,89%	5	2,2083	2,2430	11,19	10,49	11,88
			150	2,2105	2,2103	2,1757	2,2502	0,0745	0,0186	0,84%	16	2,2013	2,2196	11,79	11,43	12,16
			225	2,2276	2,2296	2,2213	2,2318	0,0104	0,0055	0,25%	3	2,2213	2,2338	11,11	10,86	11,36

Tab. A.1-0-3: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 LA und eine Prüfkörperhöhe von 25 mm - Laborprüfkörper

Mischgutart	PK-Höhe [mm]	Verfahren	Ø [mm]	Raumdichte [g/cm ³]								Vertrauensbereich		Hohlraumgehalt [Vol.-%]		
				Mittelwert	Median	kleinster Wert	größter Wert	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anzahl ohne Ausreißer	Min	Max	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert
SMA 8 LA	50	B	100	2,2490	2,2450	2,2364	2,2625	0,0261	0,0117	0,52%	5	2,2387	2,2592	10,26	9,85	10,67
			150	2,2711	2,2738	2,2480	2,2917	0,0437	0,0119	0,52%	20	2,2659	2,2763	9,37	9,17	9,58
			225	2,2609	2,2615	2,2560	2,2645	0,0085	0,0036	0,16%	4	2,2573	2,2644	9,78	9,64	9,92
		C	150	2,2984	2,2992	2,2894	2,3056	0,0162	0,0071	0,31%	4	2,2913	2,3054	8,29	8,01	8,57
		D	100	2,2106	2,2164	2,1865	2,2315	0,0450	0,0174	0,79%	5	2,1953	2,2258	11,79	11,18	12,40
			150	2,1875	2,1825	2,1496	2,2604	0,1108	0,0286	1,31%	20	2,1750	2,2000	12,71	12,21	13,21
			225	2,2186	2,2130	2,1931	2,2552	0,0621	0,0262	1,18%	4	2,1929	2,2442	11,47	10,45	12,49
		TP A 82	100	2,3031	2,3040	2,2920	2,3131	0,0211	0,0077	0,33%	5	2,2964	2,3099	8,09	7,83	8,36
			150	2,3262	2,3269	2,3224	2,3285	0,0061	0,0027	0,11%	4	2,3236	2,3288	7,18	7,07	7,28
			225	2,3241	2,3248	2,3176	2,3293	0,0117	0,0053	0,23%	4	2,3189	2,3293	7,26	7,05	7,46
		Radio.	150 (0-4)	2,2419	2,2433	2,2283	2,2529	0,0245	0,0125	0,56%	4	2,2297	2,2542	10,54	10,05	11,03
			150 (1-4)	2,2367	2,2366	2,2199	2,2536	0,0338	0,0153	0,68%	4	2,2217	2,2517	10,75	10,15	11,34
		Laser	150	2,2457	2,2456	2,2370	2,2546	0,0176	0,0098	0,44%	4	2,2360	2,2553	10,39	10,00	10,77
		ASTM	100	2,2205	2,2155	2,2069	2,2374	0,0306	0,0139	0,63%	5	2,2083	2,2327	11,39	10,90	11,88
			150	2,2149	2,2126	2,1898	2,2701	0,0803	0,0215	0,97%	19	2,2052	2,2246	11,61	11,23	12,00
			225	2,2592	2,2584	2,2526	2,2674	0,0148	0,0072	0,32%	4	2,2522	2,2663	9,85	9,57	10,13

Tab. A.1-0-4: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte SMA 8 LA und eine Prüfkörperhöhe von 50 mm - Laborprüfkörper

Mischgutart	PK-Höhe [mm]	Verfahren	Ø [mm]	Raumdichte [g/cm ³]								Vertrauensbereich		Hohlraumgehalt [Vol.-%]		
				Mittelwert	Median	kleinster Wert	größter Wert	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anzahl ohne Ausreißer	Min	Max	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert
PA 8	25	B	100	2,1671	2,1698	2,1453	2,1833	0,0380	0,0180	0,83%	4	2,1494	2,1847	11,69	10,97	12,41
			150	2,0965	2,1047	2,0190	2,1576	0,1386	0,0628	3,00%	4	2,0349	2,1581	14,57	12,06	17,08
			225	2,1123	2,1109	2,1098	2,1161	0,0063	0,0034	0,16%	3	2,1085	2,1161	13,93	13,77	14,08
		C	150	2,2276	2,2305	2,2014	2,2479	0,0465	0,0193	0,87%	4	2,2087	2,2464	9,23	8,46	10,00
		D	100	1,7732	1,7759	1,7619	1,7819	0,0200	0,0103	0,58%	3	1,7616	1,7848	27,74	27,27	28,21
			150	1,7974	1,8000	1,7489	1,8374	0,0885	0,0256	1,42%	21	1,7864	1,8083	26,76	26,31	27,20
			225	1,8080	1,8089	1,7999	1,8145	0,0146	0,0064	0,35%	4	1,8018	1,8143	26,32	26,07	26,58
		TP A 82	150	2,2118	2,2131	2,2020	2,2203	0,0183	0,0092	0,42%	3	2,2014	2,2222	9,87	9,44	10,29
		Radio.	150 (0-2)	1,8527	1,8503	1,8498	1,8581	0,0083	0,0047	0,25%	3	1,8475	1,8580	24,50	24,29	24,72
			150 (1-2)	1,8325	1,8397	1,7947	1,8559	0,0613	0,0264	1,44%	4	1,8066	1,8584	25,33	24,27	26,38
		Laser	150	1,9225	1,9253	1,9059	1,9333	0,0274	0,0123	0,64%	4	1,9105	1,9345	21,66	21,17	22,15
		ASTM	100	1,8460	1,8480	1,8292	1,8587	0,0295	0,0128	0,69%	4	1,8335	1,8585	24,78	24,27	25,29
			150	1,8803	1,8810	1,8382	1,9176	0,0794	0,0191	1,01%	21	1,8721	1,8884	23,38	23,05	23,71
			225	1,8019	1,8012	1,8012	1,8034	0,0023	0,0013	0,07%	3	1,8004	1,8034	26,57	26,51	26,63

Tab. A.1-0-5: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte PA 8 und eine Prüfkörperhöhe von 25 mm - Laborprüfkörper

Mischgutart	PK-Höhe [mm]	Verfahren	Ø [mm]	Raumdichte [g/cm ³]								Vertrauensbereich		Hohlraumgehalt [Vol.-%]		
				Mittelwert	Median	kleinster Wert	größter Wert	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anzahl ohne Ausreißer	Min	Max	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert
PA 8	50	B	100	2,1154	2,1150	2,1001	2,1316	0,0315	0,0149	0,70%	4	2,1008	2,1300	13,80	13,20	14,39
			150	2,1095	2,1087	2,0946	2,1259	0,0313	0,0141	0,67%	4	2,0956	2,1233	14,04	13,48	14,60
			225	2,1084	2,1069	2,1006	2,1192	0,0186	0,0078	0,37%	4	2,1007	2,1161	14,08	13,77	14,40
		C	150	2,2222	2,2169	2,1925	2,2625	0,0700	0,0295	1,33%	4	2,1932	2,2511	9,45	8,27	10,63
		D	100	1,8672	1,8654	1,8530	1,8851	0,0321	0,0133	0,71%	4	1,8542	1,8802	23,91	23,38	24,44
			150	1,8229	1,8228	1,7691	1,8629	0,0938	0,0245	1,35%	22	1,8127	1,8332	25,72	25,30	26,13
			225	1,8968	1,8947	1,8876	1,9104	0,0228	0,0107	0,56%	4	1,8864	1,9073	22,70	22,28	23,13
		TP A 82	150	2,1862	2,1830	2,1780	2,2009	0,0229	0,0104	0,48%	4	2,1760	2,1965	10,91	10,49	11,33
		Radio.	150 (0-4)	1,8650	1,8634	1,8631	1,8684	0,0052	0,0029	0,16%	3	1,8616	1,8683	24,00	23,87	24,14
			150 (1-4)	1,8720	1,8727	1,8684	1,8743	0,0058	0,0025	0,14%	4	1,8696	1,8745	23,71	23,61	23,82
		Laser	150	1,9309	1,9305	1,9248	1,9379	0,0131	0,0057	0,30%	4	1,9253	1,9365	21,32	21,09	21,54
		ASTM	100	1,8894	1,8886	1,8833	1,8973	0,0141	0,0060	0,32%	4	1,8835	1,8953	23,01	22,77	23,25
			150	1,8869	1,8893	1,8547	1,9295	0,0748	0,0185	0,98%	21	1,8790	1,8948	23,11	22,79	23,43
			225	1,9133	1,9121	1,9107	1,9172	0,0065	0,0034	0,18%	3	1,9094	1,9172	22,03	21,87	22,19

Tab. A.1-0-6: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Mischgutsorte PA 8 und eine Prüfkörperhöhe von 50 mm – Laborprüfkörper

Mischgutart	PK-Höhe [mm]	Verfahren	Ø [mm]	Raumdichte [g/cm³]								Vertrauensbereich		Hohlraumgehalt [Vol.-%]		
				Mittelwert	Median	kleinster Wert	größter Wert	Spannweite	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Anzahl ohne Ausreißer	Min	Max	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert
SMA 8 S	35	B	150	2,4843	2,4856	2,4564	2,5076	0,0512	0,0152	0,61%	18	2,4773	2,4913	4,27	4,00	4,54
		D	150	2,4099	2,41285	2,3363	2,4796	0,1433	0,0338	1,40%	20	2,3950	2,4247	7,13	6,56	7,71
		Radio.	150 (0-3)	2,5544	2,5547	2,5501	2,5581	0,0080	0,0033	0,13%	4	2,5512	2,5577	1,56	1,44	1,69
			150 (1-3)	2,5502	2,5498	2,5479	2,5533	0,0054	0,0022	0,09%	4	2,5480	2,5524	1,73	1,64	1,81
		Laser	150	2,5397	2,5397	2,5392	2,5401	0,0009	0,0005	0,02%	3	2,5391	2,5402	2,13	2,11	2,15
		ASTM	150	2,4443	2,4476	2,4092	2,4746	0,0654	0,0168	0,69%	18	2,4365	2,4520	5,81	5,51	6,11
SMA 8 S	35	B	150	2,2257	2,2239	2,2018	2,2516	0,0498	0,0162	0,73%	20	2,2186	2,2328	11,19	10,90	11,47
		D	150	2,1278	2,1296	2,0814	2,1733	0,0919	0,0314	1,48%	20	2,1140	2,1416	15,09	14,54	15,64
		Radio.	150 (0-3)	2,2583	2,2543	2,2359	2,2887	0,0528	0,0238	1,06%	4	2,2349	2,2817	9,88	8,95	10,82
			150 (1-3)	2,2345	2,2323	2,2130	2,2603	0,0473	0,0210	0,94%	4	2,2139	2,2551	10,84	10,01	11,66
		Laser	150	2,2592	2,2606	2,2418	2,2739	0,0321	0,0154	0,68%	4	2,2442	2,2743	9,85	9,24	10,45
		ASTM	150	2,1649	2,1618	2,1262	2,2024	0,0762	0,0222	1,02%	20	2,1552	2,1746	13,61	13,22	14,00
PA 8	35	B	150	2,0511	2,0511	2,0366	2,0713	0,0347	0,0076	0,37%	21	2,0478	2,0544	16,42	16,28	16,55
		D	150	1,8745	1,8722	1,8433	1,9181	0,0748	0,0164	0,88%	20	1,8673	1,8817	23,61	23,32	23,91
		Radio.	150 (0-3)	1,8527	1,8503	1,8498	1,8581	0,0083	0,0047	0,25%	3	1,8475	1,8580	24,50	24,29	24,72
			150 (1-3)	1,8325	1,8397	1,7947	1,8559	0,0613	0,0264	1,44%	4	1,8066	1,8584	25,33	24,27	26,38
		Laser	150	1,9225	1,9253	1,9059	1,9333	0,0274	0,0123	0,64%	4	1,9105	1,9345	21,66	21,17	22,15
		ASTM	150	1,9463	1,9470	1,9369	1,9558	0,0189	0,0052	0,27%	21	1,9441	1,9485	20,69	20,60	20,78

Tab. A.1-0-7: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Prüfkörper aus eingebauten Schichten

Labor	Laborant	Prüfkörper-Nr.	Verfahren B		Verfahren D	
			Forschungsnehmer	Vergleichsuntersuchung	Forschungsnehmer	Vergleichsuntersuchung
1	A	8	2,4690	2,4636	2,3676	2,4332
1	A	3	2,4099	2,4224	2,2953	2,3591
1	A	13	2,4353	2,4378	2,3218	2,3768
1	A	10	2,4266	2,4149	2,3067	2,3622
2	A	6	2,4642	2,4756	2,3755	2,4172
2	A	20	2,4155	2,4386	2,2685	2,3083
2	A	7	2,4347	2,4578	2,3181	2,3510
2	A	15	2,4228	2,4325	2,3017	2,3328
2	B	6	2,4642	2,4801	2,3755	2,4062
2	B	20	2,4155	2,4432	2,2685	2,3085
2	B	7	2,4347	2,4628	2,3181	2,3492
2	B	15	2,4228	2,4398	2,3017	2,3278
3	A	17	2,4502	2,4734	2,3538	2,3756
3	A	1	2,4138	2,4429	2,3018	2,3224
3	A	5	2,4287	2,4570	2,3088	2,3518
3	A	18	2,4194	2,4470	2,3097	2,3377
4	A	9	2,4407	2,4247	2,3139	2,3306
4	A	19	2,4206	2,4284	2,3087	2,3280
4	A	14	2,4362	2,4342	2,3047	2,3430
4	A	12	2,4175	2,4073	2,2999	2,3299
5	A	2	2,4472	2,4729	2,3442	2,3656
5	A	11	2,4266	2,4466	2,2897	2,3175
5	A	4	2,4427	2,4658	2,3313	2,3599
5	A	16	2,4167	2,4434	2,2961	2,3286
5	B	2	2,4472	2,4830	2,3442	2,3573
5	B	11	2,4266	2,4536	2,2897	2,3268
5	B	4	2,4427	2,4748	2,3313	2,3552
5	B	16	2,4167	2,4528	2,2961	2,3286

Tab. A.1-0-8: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Prüfkörper aus der Vergleichsuntersuchung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

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

S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

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

S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

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

S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost € 15,50

S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser € 16,50

S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: Entwicklung eines spannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

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

S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

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

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

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

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

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

2020

S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

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

S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

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

S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

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

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

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

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

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

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze Klein, Gehlen, Kränkel

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

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

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

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirsakawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

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

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

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

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

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

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

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

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

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

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

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

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

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

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß, Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

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

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

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

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder, Riwe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbaumasphalt

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

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

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

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

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

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

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

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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.