

---

# Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand

---

Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen  
Straßenbau Heft S 205

---

# **Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand**

---

von

Ralf Roos, Plamena Plachkova-Dzhurova, Simon Schwarzmann

Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen,  
Karlsruher Institut für Technologie

---

Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen  
Straßenbau Heft S 205

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.

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 07.0302  
Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten  
hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand

Fachbetreuung:  
Oliver Ripke

Referat:  
Nachhaltiges Bauen und Erhalten von Straßen

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

Redaktion:  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:  
MedienMélange: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](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323 | ISBN 978-3-95606-808-9 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s205>

Bergisch Gladbach, November 2024

# Kurzfassung-Abstract

## Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand

Das Ziel des Projektes war es, zuverlässige Kenngrößen für die Praxis abzuleiten, um Volumeneigenschaften wie Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand von offenporigen Asphalten treffsicher zu bestimmen und damit das Mischgut zielgerichteter zu konzipieren und genauer beschreiben zu können. Dafür wurde ein entsprechendes Untersuchungsprogramm aufgestellt, um zum einen das bisher nach Regelwerk für offenporigen Asphalt anzuwendende Ausmessverfahren nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 zu evaluieren, sowie alternative Verfahren zur Raumdichtebestimmung weiterzuentwickeln respektive auf deren Praxistauglichkeit hin zu überprüfen. Dabei sollten vor Allem die Einflüsse aus der Oberflächenbeschaffenheit, der Prüfdicke aber auch der Art der Probekörperherstellung berücksichtigt werden.

Für die Untersuchungen wurden sechs Asphaltmischgüter PA 8 aus Baumaßnahmen in den Jahren 2020 und 2021 einbezogen. Um Einflüsse aus der Oberfläche (Rauheit) und aus der Dicke der Probekörper abschätzen zu können, wurden sowohl zylindrische Probekörper aus walzsektor-verdichteten Asphalt-Probepplatten, als auch Marshall-Probekörper und Bohrkernproben aus der fertigen Schicht mit unterschiedlich geschliffenen Oberflächen sowie in variierenden Dicken hergestellt und verglichen. Durch die Einbeziehung der Bohrkernproben konnte ein direkter Vergleich zu den Verhältnissen in situ erfolgen. Neben der konventionellen Bestimmung der Raumdichte mittels Verfahren D nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 wurden folgende alternative Prüfungen durchgeführt:

- ASTM D6752/D6752M-18, Bestimmung der Raumdichte durch Vakuumabdichtung.
- Bestimmung der Raumdichte durch 3-D Scan („HandyScan“)
- TP Asphalt-StB Teil 19, Durchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern

Das Ausmessverfahren hat einige Nachteile: neben möglicher Messungenauigkeiten beim Anlegen des Messschiebers beeinflussen die Form, die Geometrie und die Beschaffenheit des Probekörpers die Raumdichte. Äußere, herstellungsbedingte Hohlräume können nicht ausgeschlossen werden und verfälschen das Ergebnis. Bei dem Verfahren nach dem US-amerikanischen Regelwerk ASTM D6752/D6752M-18 wird ein Asphaltprobekörper unter Vakuum in einem Kunststoffbeutel luftdicht verpackt und im Wasserbad gewogen. Über das sog. spezifische Raumgewicht unter Wasser kann die Raumdichte des Probekörpers bestimmt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht unter anderem darin, dass sich die Kunststoffolie um die äußeren Hohlräume legt, so dass diese hier berücksichtigt werden können. Das Verfahren mit Vakuumabdichtung ist potentiell auch weniger anfällig für Messungenauigkeiten, was sich auch in den unter Wiederholbedingungen ermittelten niedrigen Spannweiten widerspiegelt.

Die Raumdichten, die nach ASTM bestimmt werden, sind grundsätzlich größer als die aus dem Ausmessverfahren, da das berücksichtigte Volumen auf Grund des Ausschlusses der Oberflächenhohlräume kleiner gemessen wird als beim Ausmessen. Eine Abhängigkeit von der Probekörperhöhe und der Rauigkeit wurde im Rahmen von Regressionsanalysen für die verschiedenen Probekörperarten bestätigt. Das Verfahren nach ASTM ist dabei deutlich robuster gegenüber variierenden Abmessungen und wechselnden Probekörpertexturen.

Die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit nach den TP Asphalt-StB, Teil 19 erwies sich als sehr aufwendig im Sinne der benötigten Zeit und des eingesetzten Materials. Es ergaben sich im Rahmen von statistischen Auswertungen große Streuungen zwischen den unterschiedlichen Probekörpern und keine systematischen Zusammenhänge. Dadurch ist das Verfahren auch nicht geeignet, um indirekt den

Hohlraumgehalt bei offenporigen Asphalten respektive die Raumdichte oder den Verdichtungszustand anzusprechen. Dadurch zeigt sich noch mal deutlich, dass die Hohlraumstruktur von Probekörpern verschieden sein kann und somit auch das Durchflussverhalten abweicht.

Die Bestimmung der Raumdichte durch 3D-Scans an ausgewählten Probekörpern hat gezeigt, dass die Morphologie der Probekörper grundsätzlich gut erfasst werden kann, jedoch dass die Auswertung der Daten sehr zeitaufwendig und aktuell noch fehleranfällig ist. Der 3D-HandyScan kann zukünftig ein hilfreiches Verfahren sein, ist jedoch für den regelmäßigen Einsatz in der Praxis aktuell noch nicht ausgereift.

Als wichtige Empfehlungen für die zukünftige Bestimmung der Raumdichte werden eine einheitliche Dicke der Probekörper von z. B. 30 mm, die Herstellung von Probekörpern aus WSV-Platten sowie die Implementierung der Raumdichtebestimmung nach ASTM ins nationale Regelwerk vorgeschlagen.

### **Alternative methods for the assessment of porous asphalt wearing courses with regard to void content and compaction condition**

The aim of the project was to derive reliable parameters for practical use in order to accurately determine volume properties such as bulk density, void content and compaction state of porous asphalts and thus to design the mix in a more targeted manner and to be able to describe it more precisely. For this purpose, a corresponding investigation program was set up in order to evaluate the measuring method according to the TP Asphalt-StB, Teil 6, which has been applied so far according to the regulations for porous asphalt, as well as to further develop alternative methods for determining the density and to check their suitability in practice. In particular, the influences of the surface condition, the thickness of the specimens and the type of specimen production should be taken into account.

Six PA 8 asphalt mixes from construction projects in 2020 and 2021 were included for the investigations. In order to be able to estimate influences from the surface (roughness) and from the thickness of the test specimens, cylindrical test specimens were produced from asphalt test plates compacted in the rolling sector, as well as Marshall test specimens and drill core samples from the finished layer with differently ground surfaces and in varying thicknesses and compared. By including the drill core samples, a direct comparison to the conditions in situ could be made. In addition to the conventional determination of the bulk density by means of Verfahren D according to the TP Asphalt-StB, Teil 6, the following alternative tests were carried out:

- ASTM D6752/D6752M-18, Determination of bulk density by vacuum sealing.
- TP Asphalt-StB Teil 19, Permeability of asphalt test specimens
- Determination of space density by 3-D scan ("HandyScan")

The measuring method has some disadvantages: in addition to possible measurement inaccuracies when applying the caliper, the shape, geometry and condition of the specimen influence the density. External cavities caused by manufacturing cannot be excluded and falsify the result. In the procedure according to the U.S. standard ASTM D6752/D6752M-18, an asphalt specimen is packed airtight in a plastic bag under vacuum and weighed in a water bath. The bulk density of the specimen can be determined via the so-called specific gravity under water. The advantage of this method is, among other things that the plastic film lays down in the outer cavities, so that these can be taken into account here. The method with vacuum sealing is also potentially less susceptible to measurement inaccuracies, which is also reflected in the low spans determined under repeatability conditions.

The densities determined according to ASTM standard are generally greater than those obtained by the measurement method, since the volume taken into account is smaller than that obtained by the measurement method due to the exclusion of surface voids. A dependence on specimen height and roughness was confirmed in regression analyses for the different specimen types. The ASTM method is clearly more robust to varying dimensions and changing specimen textures.

The water permeability test according to the TP Asphalt-StB, Teil 19, proved to be very costly in terms of the time required and the material used. Statistical evaluations revealed large scattering between the different specimens and no systematic correlations. As a result, the method is not suitable for indirectly addressing the void content of porous asphalts or the density or compaction state. This again clearly shows that the void structure can differ from specimens and thus also the flow behaviour.

The determination of the bulk density by 3D scans on selected specimens has shown that the morphology of the specimens can basically be recorded well, but that the evaluation of the data is very time-consuming and currently still prone to errors. The 3D-HandyScan can be a helpful method in the future, but it is not yet mature enough for regular use in practice.

As important recommendations for the future determination of the bulk density, a uniform thickness of the test specimens of e.g. 30 mm, the production of test specimens from asphalt test plates compacted in the rolling sector sheets as well as the implementation of the bulk density determination according to ASTM standard into the national regulations are proposed.

# Summary

## Alternative methods for the assessment of porous asphalt wearing courses with regard to void content and compaction condition

### Inducement and goal

Asphalt wearing courses made of porous asphalt (OPA) very effectively reduce tire-road noise and, as a side effect, reduce spray plumes during rain. To achieve these properties, the asphalt must have a correspondingly high void content of  $\geq 22\%$  by volume. At the same time, however, the longest possible service life is to be achieved, for which the void content is limited to 28 % by volume according to ZTV Asphalt-StB and the degree of compaction must be more than 97 %.

In order to meet these requirements, it is necessary to determine the void content and the state of compaction as accurately as possible. Due to the open-pored structure, the measuring Method (Method D) according to TP Asphalt-StB, Teil 6 is currently used. This method has some disadvantages: in addition to possible measurement inaccuracies when applying the caliper gauge, the shape, geometry and condition of the specimen influence the density. External, production-related voids cannot be excluded and falsify the result.

The aim of the project was therefore to derive reliable parameters for practical use in order to accurately determine volume properties such as bulk density, void content and compaction state of porous asphalts and thus to design the mix in a more targeted manner and to describe it more precisely. To this end, the investigation program was set up in such a way that, on the one hand, the measurement method previously used for porous asphalt according to the regulations was evaluated, and, on the other hand, alternative methods for determining the density were further developed and tested for their suitability in practice. In particular, the influences of the surface condition, the test thickness and the type of specimen production were to be taken into account.

Six PA 8 asphalt mixes from construction projects in 2020 and 2021 were included for the investigations. In order to be able to estimate influences from the surface (roughness) and from the thickness of the specimens, cylindrical specimens from rolled sector compacted asphalt specimen plates (WSV-PK), as well as Marshall specimens (MPK) and drill core specimens from

the finished layer (BK) were produced and compared. The specimens show differences in the ground surfaces (top/bottom, mantle surface) and variations in thickness. For this reason, these were examined in several processing stages (stage WSV, 0 to 4). By grinding off the bottom or top surface, the roughness and also the specimen height were reduced step by step accordingly. By including the drill core samples, a direct comparison to the conditions in situ could be made. In addition to the conventional determination of the bulk density by means of Method D according to TP Asphalt-StB, Teil 6, the following alternative tests were carried out:

- ASTM D6752/D6752M-18 standard, Determination of density by vacuum sealing
- Determination of space density by 3-D scan ("HandyScan")
- TP Asphalt-StB Teil 19, Permeability of asphalt test specimens

### Results space density method

As expected, different parameters were determined for the different specimen types due to the compaction. The scatter of the results themselves as well as their change over the stages is also different and changes within the six variants. A fixed ranking of the specimens based on the manufacturing method was not evident. In Figure 1 the bulk densities of variant V1 are shown as examples in the form of box plots. The statistical parameters minimum (lower end of the antenna), 25 % quantile / lower quartile (lower end of the box), 75 % quantile / upper quartile (upper end of the box), maximum (upper end of the antenna or last point, if present), outliers (individual points above or below the antennas), median (cross bar in the box) and mean (cross) are directly recognizable.

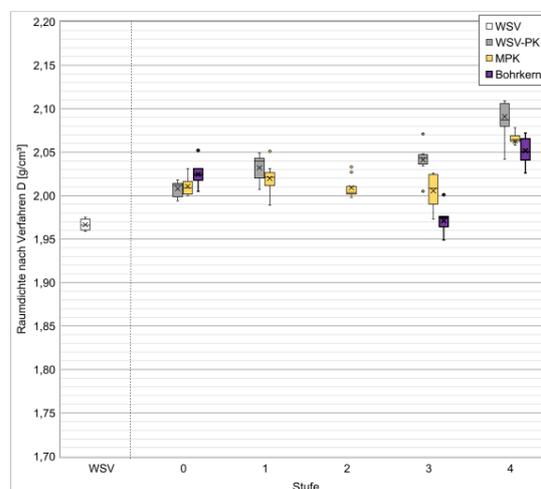


Figure 1: Bulk densities according to Method D (V1)

The bulk densities determined with the ASTM are basically at a higher level than the bulk densities determined with the Method D, and the scatter is (significantly) smaller. These findings indicate that the reduction in the influence of surface roughness aimed at by the method is actually achieved. The order of the specimen types is different for the individual variants and in some cases different from the spatial density according to Method D. In Figure 2 the results of V1 are shown as an example.

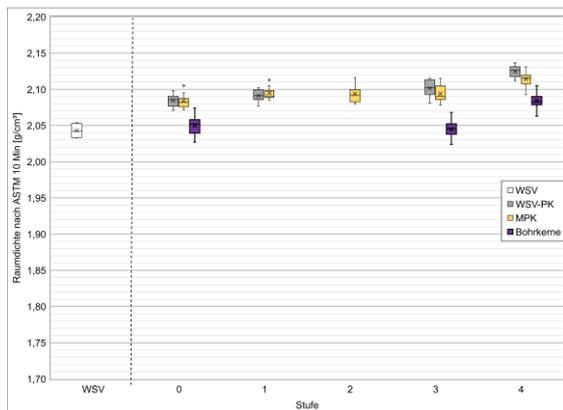


Figure 2: Densities according to ASTM (V1)

A direct comparison of the two methods again clearly shows that the bulk densities according to Method D are fundamentally smaller than the bulk densities calculated according to ASTM. This observation applies to all specimen types. The reason for this is that the caliper method always determines larger volumes because the caliper generally overmeasures the cavities near the surface. In the ASTM method, the applied vacuum causes the foil to fit into the cavities near the surface, so that these are not counted as part of the volume.

In Figure 3 the relationships between the densities according to Method D and those according to the ASTM method are shown graphically for the Marshall specimens of variant V2. The individual stages 0 to 4 are marked in color. It can be seen that there is a good correlation between the two methods.

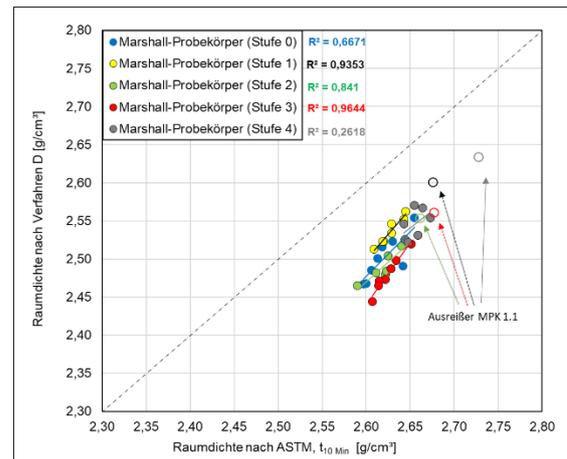


Figure 3: Bulk densities at the MPK according to Method D above the bulk density according to ASTM (V2).

The correlations were also confirmed for the other variants and specimen types. The determined coefficients of determination show that the correlations for the Marshall specimens and for the WSV specimens are fundamentally better than those for the cores. This seems plausible, since a more reproducible void structure is achieved with the specimens in the laboratory than in situ. In most cases, moreover, there is an improvement from stage 0 to stage 1. A possible explanation may be the grinding of the underside of the specimens - this reduces the macro-roughness and thus its influence on the results of Method D. The poorest correlations are generally seen in stage 4, since the height of the specimens is very low at 20 mm and corresponding fluctuations in the measurement of the volume have a strong effect on the result.

The measurements carried out under repeat and comparison conditions showed that the scatter of the vacuum method according to ASTM tends to be smaller than that of Method D. The vacuum method according to ASTM has also proved to be reproducible and less prone to error. It can be carried out reliably and comparably with appropriate instruction and working instructions.

An even better detection of the cavities close to the surface can only be achieved by scanning methods such as the 3D-HandyScan used in this research project. It has been shown that the surface is scanned very well and a real image of the morphology is obtained, but the mathematical modeling is not yet sufficiently adapted to asphalt specimen structures, so that there is still a great susceptibility to error. In addition, there is still a lack of sufficient reference mea-

surements to ensure the plausibility of the method. This still entails very time-consuming post-processing with CAD programs and a relatively large influence of the corresponding user. The 3D-HandyScan can be a helpful method in the future, but it is not yet mature enough for regular use in practice.

### Results water permeability

The basic expectation for water permeability is that permeability is in some way related to void content and thus automatically related to bulk density. As a rule, high void contents should also result in high permeabilities. However, it should also be noted when evaluating the results that the void structure need not be continuous per se. This means that some of the voids that were calculated do not have a continuous connection and thus do not perform a water-permeable function.

In Figure 4 the vertical permeability TP(V) of V1 is plotted against the void content from the bulk density according to vacuum sealing (ASTM) and void contents calculated according to TP Asphalt-StB, Teil 6. It can be seen that the Marshall specimens show by far the highest vertical permeability and the increasing trend can also be represented by a linear regression with a coefficient of determination of more than 70 %. After the MPCs, the WSV specimens show a similar trend, albeit with much poorer coefficients of determination of 41 and 65 %, respectively. The results of the cores lie as point clouds in the diagram and do not yield any meaningful correlation.

Overall, no systematic correlations of the permeability coefficients in the horizontal and vertical directions with the void content or the bulk density could be determined within the framework of the statistical evaluations. Regardless of the specimen type, plausible and well-determined correlations were found in some cases, but they could not be determined systematically.

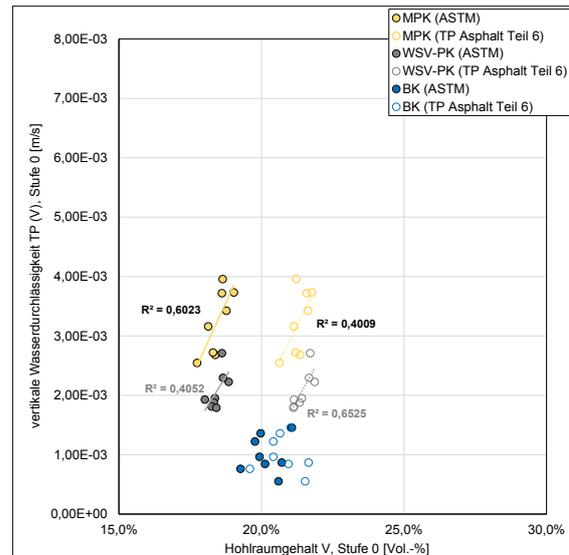


Figure 4: Vertical water permeability TP(V) versus void content V according to TP Asphalt-StB and ASTM of variant V1.

In summary, it can be stated that water permeability testing as an indirect method for determining or assessing the bulk density or void content has not proven to be effective. It is very time-consuming and requires a large input of tap water. The values determined on one specimen are very reproducible when determined four times, but when testing other specimens from the same sampling point, large scattering in the results can be observed. The water permeability is generally greater in the vertical direction than horizontally. A fixed ranking depending on the specimen shape or other systematic correlations could not be determined. This is attributed to the internal cavity structure, which is in part already dependent on the respective specimen and probably has the greatest influence on the flow or permeability behavior. Even in the case of identical test specimens with the same void content, the determined water permeability may differ, since the void structure towards the outside does not have to be coherent per se and thus water-bearing. Rolled sector compacted slabs cannot be tested according to the regulations from TP-Asphalt, because the flow of water is too large to reach the required water level, even if several water pipes are used simultaneously to try to reach the water level. If WSV slabs are to be tested, a method with decreasing water level must be used with the aid of a vacuum.

## Influences on the results

Depending on the specimen type (Marshall specimens, drill core and WSV specimens) and the stage, the outer surfaces of the specimens are correspondingly different in roughness. Therefore, the so-called "roughness index" was introduced to assess the influence of the production-

related macro-roughness on the determined bulk density. Based on the preliminary considerations, the bulk density according to Method D should be smaller with a high roughness index than with a low index. This is because the greater the proportion of rough surface, the greater the volume covered. In the procedures according to ASTM, the influence on the determined

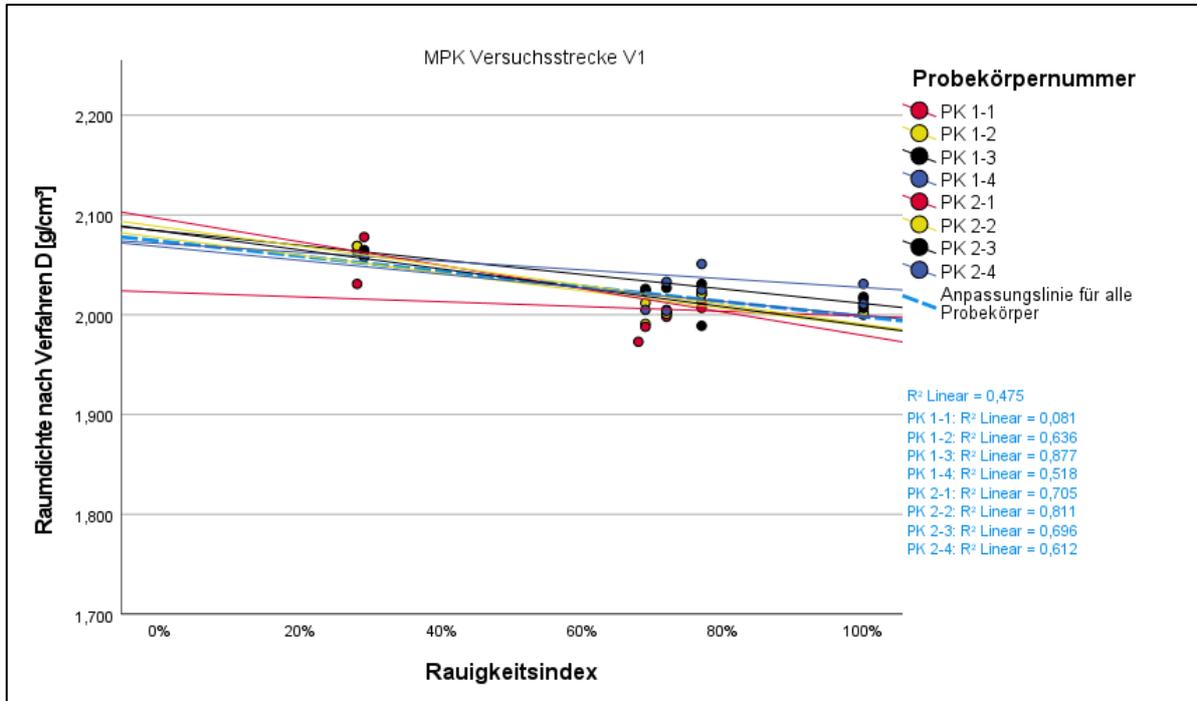


Figure 5: Change in density according to Method D as a function of roughness index (V1, MPK)

densities will be less pronounced, since the surface structure is more accurately captured by the close-fitting plastic film.

The statistical evaluations have confirmed the influence of specimen height and roughness on the space densities according to Method D. Using the example of the Marshall specimens of V1 in Figure 5 it can be noted that at the beginning they are rough on all sides, i.e. they have a roughness index of 100 %, and at the end only the lateral surface is rough, i.e. the roughness index is 28 %. The other values lie between 77 and 68 % and are thus close to each other. The lower face is always smooth and the rest rough. Here, plausible linear relationships can be seen both for the density values calculated according to Method D and for the density values calculated according to ASTM standard. The slopes of the regression lines are generally smaller for the ASTM Method than for Method D, which indicates that the influence of roughness is smaller for

the vacuum method than for the gauging method (see Table 1).

The influence of the compaction type can be seen in two ways: on the one hand, the results are partly at a different level and, on the other hand, the scatter varies - due to the surface properties of the Marshall specimen, for example, the statistical evaluations show inhomogeneous results with regard to the influences of specimen height and roughness. At this point, the WSV specimens allow unerring conclusions to be drawn about the mixed material properties of a sampling point.

Einfluss Rauigkeit		Verfahren D			ASTM		
Stelle	Probekörper	m	n	R <sup>2</sup>	m	n	R <sup>2</sup>
1	PK 1-1	-0,024	2,023	0,081	-0,014	2,095	0,390
	PK 1-2	-0,089	2,077	0,636	-0,047	2,123	0,937
	PK 1-3	-0,073	2,084	0,877	-0,026	2,124	0,898
	PK 1-4	-0,044	2,072	0,518	-0,036	2,141	0,994
2	PK 2-1	-0,117	2,097	0,705	-0,062	2,135	0,984
	PK 2-2	-0,098	2,088	0,811	-0,056	2,128	0,881
	PK 2-3	-0,095	2,084	0,696	-0,064	2,145	0,956
	PK 2-4	-0,069	2,068	0,612	-0,031	2,111	0,467

Table 1: Overview of the regression coefficients as a function of the spatial density method and the MPK of variant V1 (marked: R<sup>2</sup> ≥ 80%).

## Recommendations

The results clearly show that the specimen height and the surface finish have an influence on the determined bulk density. A change does not necessarily lead to smaller scatter, but can significantly change the level of the values and thus the evaluation. It is therefore important to establish a uniform specimen height. The 30 mm investigated in stage 3 is very suitable for this purpose, since it can also be obtained well from cores if a SAMI layer is used as a seal and a lot of material has to be removed from the underside accordingly.

In order to reduce the influence of the surface condition, the reference density should be determined in the laboratory on appropriately prepared WSV test specimens to determine the degree of compaction. Due to the manufacturing process, these have a smooth surface, analogous to the cores from the road. After sawing or grinding to a height of 30 mm, the underside becomes smooth and the roughness is thus exactly the same as for the specimens in situ. In addition, the specimens from the WSV plates are more comparable to the cores due to the compaction regime. The compaction regime should be chosen according to M OPA or be subject to further optimization. However, for this purpose, further investigations should be carried out with mixed material taken during paving and compacted with varying regime options in the laboratory. The Marshall specimens, which are currently used to determine the reference density, are not suitable for this purpose due to the geometry, the compaction method and the partially inhomogeneous correlations in the multiple regression analyses.

The evaluation of the applied test procedures results in the following recommendations:

It was found that the methods for determining water permeability are not suitable as an indirect test of void content or bulk density. It is recommended to refrain from water permeability tests in connection with the determination of

the density of porous asphalt mixes in the future.

The results of the vacuum method according to ASTM D6752M-18 show that the method has some advantages and is significantly more robust against the influence of different specimen geometries than Method D. It is therefore recommended to pursue this approach further and to implement the test according to ASTM D6752/D6752M-18 into the national regulations for future bulk density determinations on porous asphalt types. This would make it possible to evaluate the density and also the degree of compaction more accurately in practice. For this purpose, appropriate working instructions should be worked out and comparative tests carried out in several laboratories. Particular attention should be paid to the film thickness and the reading time. Based on the experience gained in the project, it is recommended that the film thickness be set at the fixed value of 150 µm and the reading time at 10 minutes after insertion into the water bath. In comparison with Method D, no major additional work is to be expected. On the contrary, once the personnel have been instructed, significantly fewer sources of error can be expected. It should be borne in mind that the void contents currently valid and to be complied with according to the rules and regulations were determined on the basis of densities according to Method D. The void contents of the water bath can be determined using the vacuum method. When using the vacuum method according to ASTM, the limit values for the void contents must also be comparatively redetermined and redefined.

# Inhalt

1.	Einführung in das Forschungsvorhaben	13
1.1.	Veranlassung	13
1.2.	Ziel	13
1.3.	Vorgehensweise	13
2.	Stand der Technik	14
2.1.	Allgemeines zum Hohlraumgehalt	14
2.2.	Volumetrische Kennwerte von PA nach den TP Asphalt-StB	14
2.3.	Alternative Ermittlung der Raumdichte - Vakuumabdichtungsverfahren	16
2.4.	Durchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern	17
2.4.1.	Vertikale Durchlässigkeit	17
2.4.2.	Horizontale Durchlässigkeit	18
2.5.	Alternativen Verfahren zur Bestimmung der volumetrischen Kenngrößen (3D-Scan)	19
2.5.1.	Bestimmung des Hohlraumgehaltes mittels Computertomografie (CT)	19
3.	Untersuchungsmethodik	23
3.1.	Auswahl der Untersuchungsstrecken	23
3.2.	Probenahme	24
3.3.	Untersuchungsprogramm im Labor	25
3.4.	Versuchsdurchführung	27
3.4.1.	Bestimmung der Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt, Teil 6	27
3.4.2.	Bestimmung der Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18	27
3.4.3.	Prüfung der Wasserdurchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern	27
3.4.4.	Raumdichte mittels 3D-HandyScan	30
3.5.	Grundlagen der statistischen Auswertung	31
4.	Untersuchungsergebnisse	32
4.1.	Allgemeines	32
4.2.	Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt-StB, Teil 6	32
4.2.1.	Gesamtbetrachtung der Raumdichte nach Verfahren D	32
4.2.2.	Variantspezifische Ergänzungen zur Betrachtung der Raumdichte nach Verfahren D	33
4.3.	Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18	38

4.3.1. Gesamtbetrachtung der Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18	38
4.4. Prüfung der vertikalen Wasserdurchlässigkeit	41
4.4.1. Gesamtbetrachtung der vertikalen Wasserdurchlässigkeit	41
4.4.2. Variantenspezifische Ergänzungen zur Betrachtung der vertikalen Wasserdurchlässigkeit	42
4.5. Prüfung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit	44
4.5.1. Gesamtbetrachtung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit	44
4.5.2. Variantenspezifische Ergänzungen zur Betrachtung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit	45
4.6. Ergebnisse der Raumdichte mittels Laserabtastungsverfahren (3D-Scan)	48
5. Auswertung und Evaluation der Ergebnisse	49
5.1. Vergleich der Verfahren zur Raumdichtebestimmung	49
5.2. Analyse des Zusammenhangs zwischen der Raumdichte und der Wasserdurchlässigkeit	54
5.3. Einflussfaktoren auf die Raumdichte	55
5.3.1. Einfluss der Makrorauheit	55
5.3.2. Einfluss der Probekörperhöhe	60
5.3.3. Wechselwirkungen zwischen dem Rauigkeitsindex und der Probekörperhöhe	64
6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	68
7. Empfehlungen und Ausblick	70
Literatur	71
Tabellen	73
Bilder	74

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen  
 BAST-Archiv ELBA unter: <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

# 1 Einführung in das Forschungsvorhaben

## 1.1 Veranlassung

Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt (OPA) reduzieren sehr effektiv die Reifen-Fahrbahn-Geräusche und reduzieren in einem Nebeneffekt die Sprühhäfen bei Regen. Damit diese Eigenschaften erreicht werden, muss der Asphalt einen entsprechend hohen Hohlraumgehalt von  $\geq 22$  Vol.-% aufweisen. Gleichzeitig sollen jedoch auch möglichst lange Nutzungsdauern erreicht werden, wofür der Hohlraumgehalt wiederum nach ZTV Asphalt-StB [25] auf 28 Vol.-% beschränkt ist und der Verdichtungsgrad mehr als 97 % betragen muss.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden ist es notwendig, den Hohlraumgehalt und den Verdichtungsgrad möglichst genau zu bestimmen. Dazu muss zuerst die Raumdichte sowohl an Marshall-Probekörpern als auch an Asphalt-Probekörpern und an Bohrkernen ermittelt werden. Auf Grund der offenporigen Struktur wird aktuell das Ausmessverfahren (Verfahren D) nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 [18] angewendet. Dabei ist jedoch eine gewisse Messgenauigkeit durch das Aufsetzen des Messschiebers, die Rauheit und die Form der Probekörper nicht zu vermeiden. An makrorauen Probekörpern werden grundsätzlich größere Hohlraumgehalte als an Probekörpern mit gesägten Flächen bestimmt. Dabei können bereits wenige Zehntel Millimeter Abweichung bei der Messung einen erheblichen Einfluss auf den errechneten Hohlraumgehalt haben. Eine zuverlässige Bestimmung mit hoher Genauigkeit ist für die Baupraxis jedoch von enormer Bedeutung. Nur so können die gestellten Anforderungen auch zielsicher eingehalten und kontrolliert werden. Auf nationaler Ebene steht neben dem Ausmessverfahren bislang kein weiteres evaluiertes und durch Prüfvorschriften geregeltes Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte an Probekörpern mit offenporiger Asphaltstruktur zu Verfügung.

Im Rahmen der Technischen Prüfvorschrift TP Asphalt-StB, Teil 19 kann die Wasserdurchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern bestimmt werden. Das Prüfverfahren erlaubt zwar keine direkte Bestimmung der Raumdichte, liefert jedoch eine wichtige Kenngröße zur indirekten Ansprache des Hohlraumgefüges.

In den Vereinigten Staaten von Amerika wird im Rahmen der ASTM D6752/D6752M-18 [3] die Raumdichte an Probekörpern aus offenporigem Asphalt mit Hilfe von einer Vakuumabdichtung bestimmt. Dabei werden die Probekörper in Kunststofftüten vakuumiert und deren spezifisches Gewicht unter Wasser bestimmt. Damit ist es möglich, die Masse der Probe ohne die in den Poren vorhandene Luft zu wägen, und darüber eine Information über die Raumdichte und damit den Hohlraumgehalt zu bekommen.

## 1.2 Ziel

Das Ziel dieses Projektes ist die Ableitung von zuverlässigen Kenngrößen, um Volumeneigenschaften wie Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad von offenporigen Asphalten treffsicher zu bestimmen und damit das Mischgut zielgerichteter zu konzipieren und genauer beschreiben zu können. Dafür sollen alternative Verfahren (weiter)entwickelt, geprüft und evaluiert werden. In diesem Zusammenhang sollen auch die Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Prüfdicke, aber auch der Art der Probekörperherstellung auf die Ergebnisse systematisch untersucht werden.

## 1.3 Vorgehensweise

Für die Untersuchungen werden sechs Asphaltmischgüter PA 8 aus aktuellen Baumaßnahmen einbezogen. Um Einflüsse aus der Oberfläche (Rauheit) und aus der Dicke der Probekörper abschätzen zu können, werden sowohl zylindrische Probekörper aus Asphalt-Probekörpern als auch Marshall-Probekörper (MPK) und Bohrkernproben aus der fertigen Schicht verglichen. Die Probekörper weisen Unterschiede in den geschliffenen Flächen (Ober-/Unterseite, Mantelfläche) und Variationen der Dicke auf. Durch die Einbeziehung der Bohrkernproben kann ein direkter Vergleich zu den Verhältnissen in situ erfolgen. Neben den konventionellen Prüfverfahren sind innerhalb dieses Forschungsprojektes auch alternative Verfahren vorgesehen, die, wie die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit, nur indirekt den Hohlraumgehalt ansprechen oder aber auch Verfahren, die nicht standardmäßig im Straßenbau vorgehensehen sind. Es werden folgende Prüfungen durchgeführt:

- TP Asphalt-StB, Teil 6, Raumdichte von Asphalt-Probekörpern, Ausmessverfahren (Verfahren D) [18]

- ASTM D6752/D6752M-18, Bestimmung der Raumdichte durch Vakuumabdichtung [3].
- TP Asphalt-StB Teil 19, Durchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern
- 3D-Scans von Asphalt-Probekörpern

Die o.g. Vorgehensweise wird an Proben von Baumaßnahmen systematisch durchgeführt, ausgewertet und gegenübergestellt. Die Probekörperform und -beschaffenheit wird mittels unterschiedlicher Probekörpervorbereitung berücksichtigt.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Allgemeines zum Hohlraumgehalt

Der Einbau von PA als Asphaltdeckschicht kommt im Rahmen von Lärmvorsorge oder Lärmsanierung zum Einsatz. Durch die offenporige Asphaltstruktur können die Schallemissionen (Reifenabrollgeräusche) reduziert werden [14, 16]. Die Anforderungen an offenporige Asphaltmischgüter sowie an den daraus hergestellten Asphaltdeckschichten sind in den TL Asphalt-StB [17] und in den ZTV Asphalt-StB [25] geregelt. Zusätzlich gibt das Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt (M OPA) [10] Empfehlungen für die Planung, die Ausschreibung, den Bau und die betriebliche und bauliche Erhaltung.

Die zentrale volumetrische Kenngröße von offenporigem Asphalt ist der Hohlraumgehalt. Um die erforderliche Schallreduzierung zu erreichen, muss der OPA einen besonders hohen Gehalt an Hohlräumen aufweisen. Gemäß den ZTV Asphalt-StB [25] sind für den einschichtigen Einbau von PA 8 22,0 Vol.-% bis 28,0 Vol.-% Hohlraumgehalt obligatorisch.

Der Hohlraumgehalt einer Asphaltschicht beeinflusst unmittelbar die Durchlässigkeit von Luft und Wasser. Asphalte gelten ab einem Hohlraumgehalt von  $\geq 15$  Vol.-% als wasserundurchlässig [1]. Dabei sind sowohl das Porenvolumen als auch die Hohlraumstruktur entscheidend. In der verdichteten Asphaltschicht sind mehrere Typen von Hohlräumen anzunehmen. Im Wesentlichen wird zwischen zusammenhängenden und nicht zugänglichen Hohlräumen unterschieden. In Bild 1 sind die einzelnen Hohlraumtypen dargestellt. Die Hohlräume des Typs A ermöglichen einen unmittelbaren Durchfluss von Luft und Wasser von der Oberseite durch die

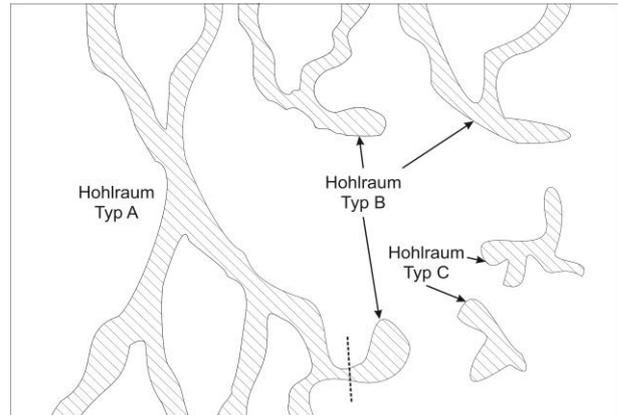


Bild 1: Hohlraumtypen in Anlehnung an LIN [1]

Konstruktion. Die Hohlräume des Typs C hingegen werden zwar durch das Porenvolumen berücksichtigt, haben aber auf Grund der fehlenden Zugänglichkeit keinen Einfluss auf die Durchlässigkeit von Luft und Wasser. Die Hohlräume des Typs B führen zwar nicht zum unmittelbaren Abfluss von Wasser, bieten aber durch ihre Zugänglichkeit Stauraum für anfallendes Wasser. Daher gewährleisten vor allem die Hohlraumtypen A und B das Drainagevermögen von Wasser oder den Abbau von Luftschalldruck bei offenporigen und wasserundurchlässigen Asphalten [15].

In Laborversuchen ist feststellbar, dass selbst bei nahezu gleichem Hohlraumgehalt die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte deutliche Unterschiede aufzeigen. Dies ist mutmaßlich darauf zurückzuführen, dass die Hohlraumstruktur nicht immer durchgehend vorliegt und nicht alle Hohlräume für Wasser zugänglich sind bzw. sie sich auch in ihrer Form und Größe unterscheiden [1, 15].

Der Hohlraumgehalt hängt unter anderem von der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches als auch der Kornform ab. Ungünstige Kornformen, bei denen das Verhältnis von

Länge zu Dicke größer drei beträgt, können zu vermehrt auftretenden Kornzertrümmerungen führen, die tendenziell geringere Hohlraumgehalte begünstigen können, als das bei günstigen Kornformen der Fall ist [1].

### 2.2 Volumetrische Kennwerte von PA nach den TP Asphalt-StB

Der Hohlraumgehalt  $V$  errechnet sich nach den TP Asphalt-StB, Teil 8 [19] aus der Rohdichte des Asphaltmischgutes und der Raumdichte des entsprechenden Probekörpers:

$$V = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100 \text{ [Vol.-%]}$$

mit  $\rho_m$ : Rohdichte des Asphaltmischgutes in  $\text{g/cm}^3$

$\rho_b$ : Raumdichte des Probekörpers oder der Ausbauprobe in  $\text{g/cm}^3$

Der Verdichtungsgrad bestimmt sich aus dem Quotienten der Raumdichte von Bohrkern und MPK wie folgt:

$$k = \frac{\rho_{b,c}}{\rho_{b,i}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

mit  $\rho_{b,c}$ : Raumdichte der Ausbauprobe in  $\text{g/cm}^3$

$\rho_{b,i}$ : Raumdichte des Marshall-Probekörpers in  $\text{g/cm}^3$

Der Verdichtungsgrad muss nach den ZTV Asphalt-StB [25] bei Asphaltdeckschichten aus offenporigem Asphalt  $\geq 97 \%$  sein.

Die Aussagekraft des Hohlraumgehaltes und des Verdichtungsgrades erfordert eine zuverlässige Ermittlung der Raumdichten, da sich etwaige Messfehler automatisch darauf auswirken. Die Bestimmung der Raumdichte erfolgt nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 [18]. Bei Probekörpern mit offenporiger Asphaltstruktur wird gemäß der Festlegung nach der DIN EN 13108-20 [6] das Verfahren D (Ausmessverfahren) angewendet. Grundsätzlich bestimmt sich die Raumdichte aus dem Quotienten der Masse des trockenen Probekörpers und dem berechneten Volumen. Dieses wird mit Hilfe von Messungen an vier Punkten am Probekörper bestimmt. Die Abmessungen wie Höhe und Durchmesser werden dabei durch die Labormitarbeiter mit einem Messschieber bestimmt.

Für zylindrische Probekörper berechnet sich die Raumdichte mit

$$\rho_{\text{bdim}} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

mit  $m_1$ : Masse des trockenen Probekörpers in g

h: Höhe des Probekörpers in mm

d: Durchmesser des Probekörpers in mm

Die Raumdichte durch Ausmessen an rechteckigen Probekörpern wird durch folgende Formel berechnet:

$$\rho_{\text{bdim}} = \frac{m_1}{h \cdot l \cdot w} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

mit  $m_1$ : Masse des trockenen Probekörpers in g

h: Höhe des Probekörpers in mm

l: Länge des Probekörpers in mm

w: Breite des Probekörpers in mm

Neben möglicher Messungenauigkeiten beim Anlegen des Messschiebers, beeinflussen die Form, die Geometrie und die Beschaffenheit des Probekörpers die Raumdichte. Bei Untersuchungen zu PA durch RENKEN [12] wurde aufgezeigt, dass bereits einige zehntel Millimeter Abweichung erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die kleinen Abweichungen können dann wiederum zu einer erheblichen Schwankung von mehreren Prozentpunkten beim Hohlraumgehalt führen. In ungünstigen Fällen ist es auch möglich, dass sich Fehlmessungen der Höhe und des Durchmessers zu einem Gesamtfehler addieren. Dabei sind auch Abweichungen beim Hohlraumgehalt von bis zu 3 Vol.-% denkbar [12]. Für die Prüfung von PA werden verschiedene Probekörperformen herangezogen. Als Beispiel dient der Verdichtungsgrad, der sowohl mit der Raumdichte des Bohrkerns auch als mit der Bezugsraumdichte des Marshall-Probekörpers bestimmt wird. Der MPK ist nach der Herstellung allseitig makrorau, der Bohrkern aber mit Ausnahme der oberen Stirnfläche glatt. Dies führt dazu, dass beim Ausmessen des MPK auch die außenliegenden Hohlräume bzw. bitumenumhüllten Splittkörner (sog. Umhüllende) erfasst werden (Bild 2). Das Volumen und somit auch der Hohlraumgehalt wird daher an Probekörpern mit gesägten Flächen immer kleiner bestimmt als an allseitig makrorauen Probekörpern. Gleichbedeutend werden beim MPK auf Grund des größeren Volumens systematisch kleinere Raumdichten bestimmt und führen zu größeren Hohlraumgehalten als an gesägten oder geschliffenen Probekörpern. In Bild 2 sind die Unterschiede der Probekörperbeschaffenheit zwischen allseitig makrorauen und geschliffenen Asphalt-Probekörpern aus PA grafisch dargestellt [12].

Die Einhüllende beschreibt das auf Grund der Makrorauheit größte anzunehmende Volumen. Das Volumen von geschliffenen Probekörpern weicht von der Einhüllenden makrorauer Oberflächen ab und

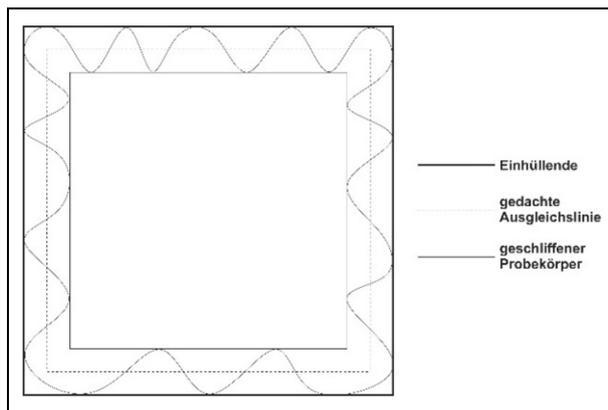


Bild 2: Einhüllende von PA Probekörpern nach RENKEN [12]

ist unabhängig von der Zahl der Seiten, die geschliffen oder gesägt wurden. Die Annahme, dass es zweckmäßig sein könnte den Schenkel des Messschiebers teilweise in die Poren zu legen (gedachte Ausgleichlinie), führt fälschlicherweise zu größeren berechneten Raumdichten und damit auch zu kleineren bestimmten Verdichtungsgraden und Raumdichten [12].

### 2.3 Alternative Ermittlung der Raumdichte - Vakuumabdichtungsverfahren

Offenporige Asphaltprobekörper sind auf Grund ihrer Hohlraumstruktur nicht für die Raumdichtebestimmung mittels Tauchwägung nach dem Verfahren B der TP Asphalt-StB, Teil 6 [18] im Wasserbad geeignet. Die offenporige Struktur führt dazu, dass das Wasser im Probekörper, das dem eigentlichen Volumen zugeschrieben werden soll, zu schnell abfließt und daher bei einer Wägung außerhalb des Wasserbads nicht berücksichtigt werden kann. Eine Möglichkeit dieses Problem zu Umgehen ist das Verfahren zur Raumdichtebestimmung mittels Vakuumabdichtung nach ASTM D6752/D6752M-18. Für die Prüfung sind nach dieser Norm zylindrische Probekörper zwischen 100 und 150 mm Durchmesser, wie auch kubische Probekörper, vorgesehen. In den Anwendungsbereich fallen Mischgutsorten mit poröser Hohlraumstruktur, grober Oberflächentextur sowie Asphaltmischgut mit grober und abgestufter Gesteinskörnung.

Bei dem Verfahren werden die PA-Probekörper in dreiseitig geschlossene Kunststoffbeutel mit einer Foliendicke zwischen 127 µm und 178 µm gelegt. Das Vakuumgerät muss die Probekörper dann in einem einzigen Schritt vakuumieren und versiegeln.



Bild 3: Vakuumgerät

Dazu ist ein leistungsstarkes Gerät mit einer Pumpe (0,93 kW) notwendig, die einen Mindestdruck von 133 hPa in weniger als 60 Sekunden herstellt. Ein entsprechendes Standgerät ist in Bild 3 dargestellt.

Dieses Vorgehen ermöglicht im Anschluss an das Vakuumieren eine Tauchwägung, ohne den Probekörper direkt mit Wasser in Kontakt zu bringen. Über diese Methode lässt sich die spezifische Dichte (sog. bulk specific gravity) nach der folgenden Formel rechnerisch bestimmen:

$$\rho_{SPEC} = \frac{A}{[C+(B-A)]-E-\frac{B-A}{F_t}} \quad [-]$$

mit A: Masse des trockenen Probekörpers in g

B: Masse des vakuumierten Probekörpers in g  
(A + Masse des Kunststoffbeutels) in g

C: Masse des Probekörpers nach Entfernung des Kunststoffbeutels in g

E: Masse des vakuumierten Probekörpers unter Wasser in g

F<sub>t</sub>: Spezifische Dichte (F<sub>t</sub> = ρ<sub>Kunststoff</sub>/γ<sub>w</sub>) des Kunststoffbeutels bei 25°C; Angabe des Herstellers

Die Raumdichte kann dann mit Hilfe der spezifischen Dichte und der Dichte von Wasser bei 25 °C ermittelt werden:

$$\rho_{\text{VAC}} = \gamma_w \cdot \rho_{\text{SPEC}} \quad [\text{g/cm}^3]$$

mit  $\rho_{\text{SPEC}}$ : spezifische Dichte [-]

$\gamma_w$ : Dichte des Wassers bei 25°C (0,997 g/cm<sup>3</sup>)

Alvarez et. al. [2] stellten im Rahmen eines Projekts einen Vergleich zwischen den Raumdichten durch Ausmessen und nach Vakuumabdichtung an. Dabei wurde festgestellt, dass die Raumdichten durch das Ausmessen systematisch kleiner bestimmt werden als nach Vakuumabdichtung. Im Umkehrschluss wird auch der Hohlraumgehalt durch das Ausmessen systematisch größer geschätzt. Da sich im Gegensatz zum Ausmessen der Kunststoffbeutel während des Vakuums an den Probekörper anschmiegt, werden die Poren an der Oberfläche aus der Berechnung ausgeschlossen. Diese haben, vor allem bei den MPKs, viel mehr mit dem Probekörperherstellungsprozess als mit dem inneren Hohlraumvolumen zu tun, sodass die Ergebnisse dadurch realistischer sind.

Laut einer Studie, die sich mit dem Vergleich der Raumdichtebestimmung nach Vakuumabdichtung wie auch nach Wassersättigung beschäftigt hat, ist die Standardabweichung beim Verfahren mit Vakuumabdichtung geringer, da der Einfluss des Labo- ranten im Rahmen der Versuchsdurchführung kleiner ist. Untersucht wurden neben grobkörnig abgestuften Asphalten auch dichtere Asphalte mit höheren Anteilen an feiner Gesteinskörnungen als Vergleich [9]. Auch Cooley et. al. [4] stellten fest, dass die Methode der Vakuumabdichtung nicht zu einer Überbewertung der Raumdichten führt und somit für Asphalte mit hohem Hohlraumgehalt besser geeignet ist als z. B. Verfahren, bei denen die Probekörper wassergesättigt geprüft werden.

## 2.4 Durchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern

Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von zylindrischen Asphalt-Probekörpern wird in den TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] geregelt, welche auf der DIN EN 12697-19 [5] basiert. Dabei wird der Durchfluss durch einen wassergesättigten Asphaltprobekörper bei konstanter Druckhöhe in einer bestimmten Zeitspanne gemessen. Es wird zwischen verti-

kaler (von oben durch die Grundfläche) und horizontaler (von oben durch die Mantelfläche) Durchlässigkeit unterschieden. Es werden folgende Probekörper geprüft:

- Marshall-Probekörper die mit dem Marshall-Verdichtungsgerät nach den TP Asphalt-StB, Teil 30 [22] hergestellt worden sind.
- Probekörper die aus mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV) hergestellten Asphalt-Probekörpern (TP Asphalt- StB, Teil 33 [23]) ausgebohrt worden sind.
- Bohrkernproben die nach den TP Asphalt-StB, Teil 27 [21] aus der Konstruktion entnommen worden sind.

Die Abmessungen richten sich nach der Nennweite des Größtkorns. Für Asphaltvarianten, die im Rahmen des Projektes untersucht werden, ergeben sich daher ein Durchmesser von 100 mm und eine Mindesthöhe von 25 mm.

### 2.4.1 Vertikale Durchlässigkeit

Die vertikale Durchlässigkeit eines Asphaltprobekörpers nach den TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] beschreibt die Menge an Wasser pro Zeit, die durch die untere Stirnfläche durch einen Asphaltprobekörper durchfließt und entspricht dem Ableitungsvermögen durch die Hohlraumstruktur in vertikaler Richtung.

In Bild 4 ist das Prüfgerät als auch das Prüfprinzip für die Messung der vertikalen Durchlässigkeit nach den Technischen Prüfvorschriften dargestellt. Dabei ist ein Rohr auf den Probekörper zu stellen und die Mantelfläche so abzudichten, dass kein Wasser seitlich aus dem Probekörper austreten kann. Der Außendurchmesser muss dabei größer als der Durchmesser des Probekörpers sein, wobei die Dicke der Wandung 5 mm nicht überschreiten darf. Der Probekörper liegt auf einer gelochten und höhenverstellbaren Platte und ist in der Höhe so auszurichten, dass sich seine Oberseite auf demselben Niveau wie der Wasserspiegel im Behälter und damit auch dem Abfluss befindet. Die seitliche Abdichtung wird z. B. über Manschetten oder Gewebe-Klebeband sichergestellt. Geprüft werden Probekörper, die für mindestens 10 Minuten unter Wasser gesättigt wurden. Sobald die Wassersäule von 300 mm erreicht ist, muss der Probekörper mindestens einer Minute lang mit Wasser durchströmt werden.

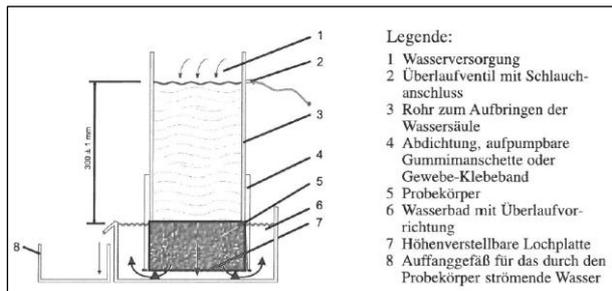


Bild 4: Prüfprinzip der vertikalen Durchlässigkeit gem. TP Asphalt-StB, Teil 19 [20]

Erst dann beginnt der eigentliche Messdurchgang, bei dem über eine Zeitdauer von mindestens 60 Sekunden das Wasser, das durch den Probekörper strömt, mit einem separaten Auffangbehälter aufgefangen wird. Das Messprinzip besteht darin, dass die Masse des über die festgelegte Zeitdauer aufgefangenen Wassers bestimmt wird und über die Dichte des Wassers nach der folgenden Formel in den Durchfluss  $Q_v$  umgerechnet werden kann:

$$Q_v = \frac{(m_1 - m_2)}{t \cdot \rho_w} \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

mit  $m_2$ : Masse des leeren Auffangbehälters in g

$m_1$ : Masse des mit Wasser gefüllten Auffangbehälters in g

t: Zeit, in der Wasser aufgefangen wird in s

$\rho_w$ : Dichte des Wasser bei 25°C in g/cm<sup>3</sup>

Mit Hilfe des Durchflusses wird die Durchlässigkeit  $K_v$  bestimmt.

$$K_v = \frac{4 \cdot Q_v \cdot l}{h \cdot \pi \cdot D^2} \quad [\text{m/s}]$$

mit  $Q_v$ : Durchfluss in vertikaler Richtung in m<sup>3</sup>/s

l: Dicke des Probekörpers in m

D: Durchmesser des Probekörpers in m

h: tatsächliche Höhe der Wassersäule in m

Die Messung wird an einem Probekörper zwei Mal wiederholt. Das Ergebnis stellt das arithmetische Mittel aus den zwei Einzelwerten dar.

#### 2.4.2 Horizontale Durchlässigkeit

Die horizontale Durchlässigkeit eines Asphaltprobekörpers nach den TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] beschreibt die Menge an Wasser pro Zeit, die durch die Mantelfläche eines Asphaltprobekörpers strömt und entspricht dem Ableitungsvermögen durch die Hohlraumstruktur in horizontaler Richtung.

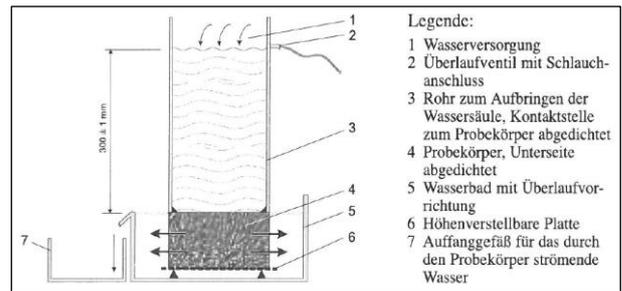


Bild 5: Prüfprinzip der horizontalen Durchlässigkeit gem. TP Asphalt-StB, Teil 19 [20]

In Bild 5 ist das Prüfgerät als auch das Prüfprinzip beim Aufbau für die Messung der horizontalen Durchlässigkeit nach den Technischen Prüfvorschriften dargestellt. Dabei ist ein Rohr auf den Probekörper zu stellen und die Unterseite des Probekörpers so abzudichten, dass kein Wasser über die Unterseite aus dem Probekörper austreten kann. Der Außendurchmesser muss dem Durchmesser des Probekörpers entsprechen. Der Probekörper liegt auf einer gelochten und höhenverstellbaren Platte und ist in der Höhe so auszurichten, dass sich seine Oberseite auf demselben Niveau wie der Wasserspiegel im Behälter und damit auch dem Abfluss befindet. Die vertikale Abdichtung wird z. B. mittels Paraffin oder eine Moosgummiabdichtung an der Unterseite zwischen Probekörper und Lochplatte sichergestellt. Zur Abdichtung und Sicherung der Verbindungstelle zwischen Rohr und Probekörper muss das Rohr durch eine innenliegende Kehle aus Silikon verklebt werden. Die Verklebung verhindert das unkontrollierte Austreten von drückendem Wasser zwischen Oberseite des Probekörpers und Ende des Rohrs. Geprüft werden Probekörper, die für mindestens 10 Minuten unter Wasser gesättigt wurden. Sobald die Wassersäule von 300 mm erreicht ist, muss der Probekörper mindestens einer Minute lang mit Wasser durchströmt werden. Erst dann beginnt der eigentliche Messdurchgang, bei dem über eine Zeitdauer von mindestens 60 Sekunden das Wasser, das durch den Probekörper strömt, mit einem separaten Auffangbehälter aufgefangen wird. Das Messprinzip besteht darin, dass die Masse des über die festgelegte Zeitdauer aufgefangenen Wassers bestimmt wird und über die Dichte des Wassers in den Durchfluss  $Q_h$  nach der folgenden Formel umgerechnet werden kann:

$$Q_h = \frac{(m_1 - m_2)}{t \cdot \rho_w} \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

mit  $m_2$ : Masse des leeren Auffangbehälters in g

$m_1$ : Masse des mit Wasser gefüllten Auffangbehälters in g

t: Zeit, in der Wasser aufgefangen wird in s

$\rho_w$ : Dichte des Wasser bei 25°C in g/cm<sup>3</sup>

Mit Hilfe des Durchflusses wird die Durchlässigkeit  $K_h$  bestimmt.

$$K_h = \frac{Q_h \cdot l}{(H + 0,5 \cdot l) \cdot (\pi \cdot D \cdot l)} \quad [\text{m/s}]$$

mit  $Q_h$ : Durchfluss in horizontaler Richtung durch den Probekörper in m<sup>3</sup>/s

l: Dicke des Probekörpers in m

(H + 0,5 · l): tatsächliche Höhe der Wassersäule in m

H: Abstand des Ablaufes zur Oberfläche des Probekörpers in m

( $\pi \cdot D \cdot l$ ): vertikale Fläche des Probekörpers (Ausflussfläche) in m<sup>2</sup>

D: Durchmesser des Probekörpers in m

Die Messung wird an einem Probekörper zwei Mal wiederholt. Das Ergebnis stellt das arithmetische Mittel aus den zwei Einzelwerten dar.

## 2.5 Alternativen Verfahren zur Bestimmung der volumetrischen Kenngrößen (3D-Scan)

Innerhalb dieses Projektes sollen außerdem alternative Verfahren zur Bestimmung volumetrischer Kenngrößen auszugsweise getestet werden. Dabei soll das Volumen einer Probe mittels eines Lasers über ein 3D-Modell erfasst werden, woraus der Hohlraumgehalt bestimmt werden kann. Der große Vorteil dabei ist, dass neben den geometrischen Abmessungen auch die Oberflächenstruktur gescannt und erfasst wird und es damit zu keiner gravierenden Überschätzung des Hohlraumgehaltes kommen sollte.

Für die Bestimmung der Raumdichte von Asphalt gibt es aktuell keinen speziell für diesen Anwendungsfall angepassten Laser. Es können jedoch Geräte verwendet werden, die ursprünglich für andere Bereiche entwickelt wurden. Ein wichtiges Kriterium für die Wahl eines Lasers ist die Genauigkeit und die Auflösung, damit Hohlräume an der Oberfläche möglichst exakt erfasst werden können. Zur Bestimmung der Raumdichte steht am KIT der HandySCAN 300™ zur Verfügung, der hochauflösende

3D-Scans erstellen kann, sowie ein Datenerfassungs- und Positionierungssystem inklusive hat. Die Visualisierung in Form eines 3D-Modells erfolgt in Echtzeit auf dem Computerbildschirm, wodurch eine optimale Überprüfung des Ergebnisses gewährleistet ist. Die Datenausgabe (VXelements) erfolgt automatisch in einem Gitternetz und ist anschließend in sämtlichen Standardformaten zu öffnen. Mit einer Genauigkeit von bis zu 0,040 mm und einer Auflösung von bis zu 0,100 mm ist eine ausreichend präzise Erfassung von physischen Objekten wie Asphalt-Probekörpern möglich. Trotz seiner einfachen Bedienbarkeit und seiner hohen Messrate liefert der handgeführte Scanner zuverlässig konstante und reproduzierbare Ergebnisse unabhängig von den Umgebungsbedingungen bzw. von Material oder Farbe des Objektes.

Während der Messung werden dabei sowohl die Stirnseiten als auch die Mantelfläche gescannt und diese zu einem 3D-Modell zusammengefügt (Bild 6). Auf Basis des gewonnenen 3D-Modells und der detailreichen Vermessung der Oberflächenstruktur des Probekörpers lässt sich das Volumen des Probekörpers und anschließend die Raumdichte und daraus der Hohlraumgehalt berechnen.

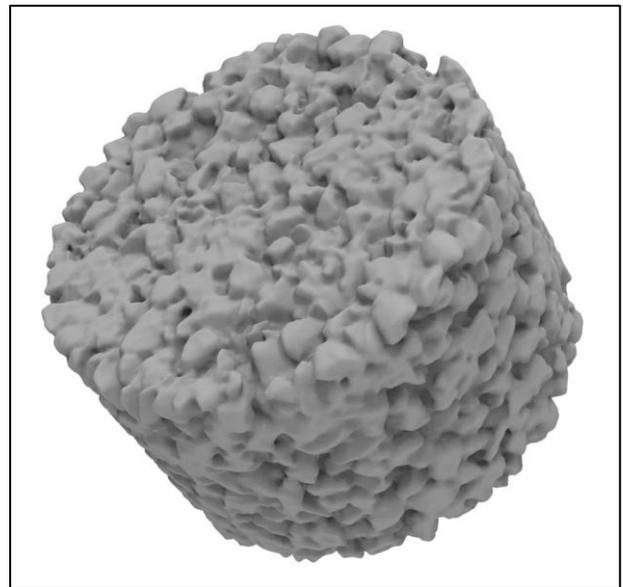


Bild 6: Rendering aus 3D-Modell eines Asphalt-Probekörpers

### 2.5.1 Bestimmung des Hohlraumgehaltes mittels Computertomografie (CT)

Für die Bestimmung des Hohlraumgehaltes können die Strukturen eines Asphalt-Probekörpers mittels Computertomografie erfasst und die Volumenbestandteile (Gesteinskörnung, Bitumen, Luft) anteils-

mäßig berechnet werden. Das grundlegende Prinzip der Röntgen-Tomografie liegt darin, Probekörper mit einer fest definierten Ausgangsstrahlungsintensität zu bestrahlen und die reflektierte Strahlungsintensität zu messen. In Abhängigkeit des vorliegenden Materials und dessen Dichte ist die Absorption der Strahlung unterschiedlich groß. Daraus lassen sich für die verschiedenen Materialien mittlere Dichten ableiten, welche nach einer Normierung auf 256 Grauwerte anschaulich dargestellt und ausgewertet werden können [11].

Für CT-Untersuchungen stehen am KIT ein Computertomograf (CT) der Firma Zeiss, Fabrikat Metrotom 800 130 kV zur Verfügung. Damit können aus der gemessenen Abschwächung der Röntgenstrahlen in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie, der Dichte des verwendeten Materials und der gefilterten Rückprojektion die Volumendaten berechnet werden. Mit einer max. Röhrenspannung von 130 kV und einem Röhrenstrom von 300  $\mu\text{A}$  gelingt eine gute Fokussierung von einem Achtel eines MPKs ( $h = 30 \text{ mm}$ ,  $r = 50 \text{ mm}$ ). Die Anzahl von  $1.536 \times 1.920$  Pixeln und die maximale Auflösung von  $3,5 \mu\text{m}$  führen zu einer besonders hohen Genauigkeit dieses CTs. Die Rekonstruktion der Objekte erfolgt mit der CT-Auswertungssoftware VG Studio, die anschließende Datenauswertung in Matlab.

Testweise wurde ein Achtel eines Marshall-Probekörpers eines offenporigen Asphalttes mittels dieses CTs untersucht. Eine beispielhafte Aufnahme der Struktur zeigt Bild 7. Dieses zweidimensionale Bild ist eines von 600 Bildern, die über eine Höhe von ca. 30 mm erzeugt wurden. Das bedeutet, dass bei einer regulären Höhe des MPKs von rund 60 mm um die 1.200 Bilder und damit Schnitte übereinander produziert werden können, anhand derer der Hohlraum anteilmäßig (Vol.-%) bestimmt werden kann. Dies zeugt von der hohen Genauigkeit dieses Gerätes. Jedoch reicht die Leistungsfähigkeit nicht aus um einen MPK mit 100 mm Durchmesser und ca. 60 mm Höhe im Ganzen zu untersuchen, da die Strahlungsintensität höher sein muss je größer die Abmessungen der Probe sind oder je höher die Auflösung des fertigen Scans werden soll. Das bedeutet das hohe Auflösungen in der Regel mit den zur Verfügung stehenden Geräten an kleineren Proben oder niedrigere Auflösungen an größeren Proben erreicht werden können.

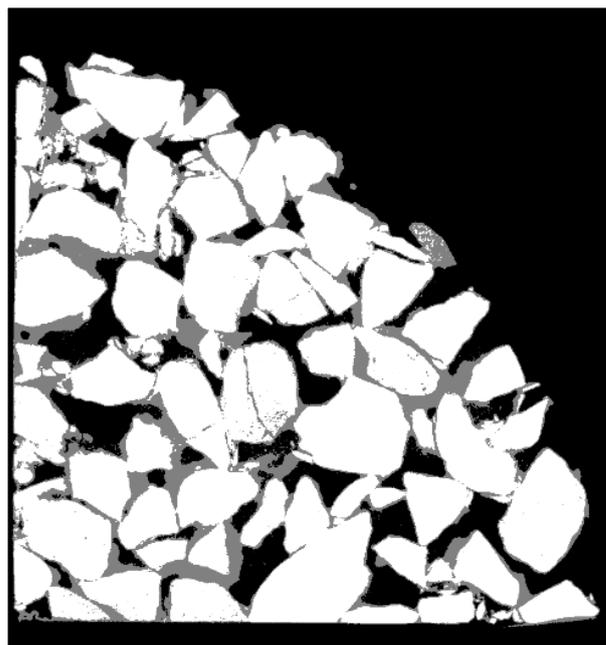


Bild 7: Computertomografie von einem Teil eines Marshall-Probekörpers

Entsprechend Gleiches gilt natürlich auch für Ausbauproben oder Probekörpern mit einem Durchmesser von 150 mm. Das führt dazu, dass die Ergebnisse mindestens vier einzelner Untersuchungsläufe gemittelt werden müssen und zur Streuung der Ergebnisse führen würden.

Untersuchungen an Asphaltprobekörpern mit einem CT-Gerät nach ZHANG [24] sehen die gleiche Problematik. In seiner Arbeit wurde der Einfluss von Oberflächenbehandlungsprodukten, die als Verjüngungsmittel auf Deckschichten aus offenporigem Asphalt wirken, untersucht. Ziel der Behandlung ist es die Liegedauer der Deckschicht zu erhöhen. Dazu wurden sowohl auf Testfeldern einer fünf Jahre alten OPA Deckschicht in situ, als auch auf Asphaltprobekörpern im Labor Verjüngungsmittel aufgetragen. Um die Wirksamkeit des Mittels festzustellen wurden unter anderem CT-Scans mit zwei unterschiedlich leistungsfähigen Geräten durchgeführt. Aus dem Testfeld wurden Bohrkernproben entnommen. Als Referenz dienten weitere Bohrkernproben die nicht mit dem Verjüngungsmittel behandelt wurden. Die volumetrischen Kenngrößen wurden mit einem weniger leistungsfähigeren Gerät bestimmt und es konnte in der Regel zwischen den behandelten und unbehandelten Bohrkernproben kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden. An Probekörpern mit kleineren Abmessungen konnte das leistungsfähigere Gerät eingesetzt werden. Die gemessene Mörtelfilmdicke war dabei einer der Kenngrößen die zur Quantifizierung des

Verjüngungsmittels herangezogen wurden. Es konnte zwar eine größere Mörtelfilmdicke an der Oberfläche nachgewiesen werden, jedoch konnte an Hand weiterer Ergebnisse keine Verjüngung nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass hochauflösende und komplexe Geräte in der Regel nicht in der Lage sind, die in der Baupraxis üblichen Probekörper mit 100 bzw. 150 mm aus den o.g. Gründen auf einmal zu scannen. Bei einfacheren Geräten ist wiederum das Auflösungsvermögen zu gering, um die gewünschten Rückschlüsse auf die einzelnen Komponenten ziehen zu können. Gerade im Bereich der feinen Gesteinskörnung und des Füllers reicht die Auflösung der einfacheren Geräte nicht aus um die Komponenten zielsicher in der Auswertung unterscheiden zu können. [24].

Im Rahmen des Verbundprojekts „Leiser Straßenverkehr 2“ [11] wurden unter anderem auch 3D-CT-Untersuchungen an Asphaltprobekörpern durchgeführt. Ziel des Teilprojekts war es herauszufinden, inwiefern der Hohlraumgehalt quantifiziert und die Hohlraumstruktur reproduziert werden können. Außerdem sollte untersucht werden, inwiefern Veränderungen im Asphaltgefüge durch Beanspruchung darstellbar sind. Um den Hohlraumgehalt mit Hilfe der CTs bestimmen zu können, muss das Auflösungsvermögen feiner bzw. mindestens der Größenordnung der Poren entsprechen [11].

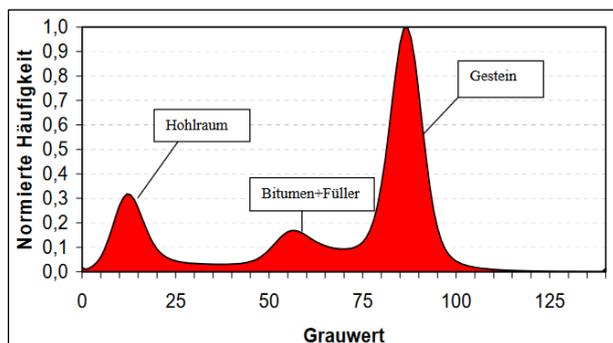


Bild 8: Schematische Darstellung eines Histogramms von gemessenen Grauwerten [8]

Werden die Häufigkeiten der Grauwerte in einem Histogramm dargestellt, können die einzelnen Phasen bzw. Bestandteile, die eine gleiche oder ähnliche mittlere Dichte aufweisen, ausgewertet werden (Bild 8). Dafür ist ein hohes Auflösungsvermögen notwendig. Erst dann zeichnen sich die entsprechenden „Phasengrenzen“ im Histogramm durch die jeweiligen Tiefpunkte zwischen zwei Maxima zielsicher ab. Die Schwellenwerte werden entweder anhand des Histogramms von dem Anwender oder

durch die Bildauswertungssoftware festgelegt. Letztere Festlegung erfolgt auf Grundlage von hinterlegten Algorithmen in der Software selbst. Anhand von OPA Proben mit einem Durchmesser von 50 bis 100 mm konnten die Hohlraumgehalte mit dem CT hinreichend genau bestimmt werden. Diese fielen grundsätzlich niedriger als bei den Mischgutuntersuchungen aus der Erstprüfung bzw. den Bohrkernen aus. Das ist soweit plausibel und wurde damit erklärt, dass die herstellungsbedingten Hohlräume in den Randbereichen mit dem Verfahren aus der Betrachtung ausgeschlossen wurden. Die Auswertung stieß in Bezug auf die Separation der einzelnen Phasen von Asphalt bei der Trennung von Bitumen und Füller dennoch auf Ihre Grenzen, da bei der Untersuchung von baupraktisch relevanten Probekörpergrößen von größer oder gleich 100 mm das Auflösungsvermögen zu klein ist [11, 8].

GOEBBELS et. al [8] stellte bei der Untersuchung von zylindrischen Asphaltprobekörpern aus offenerporigem Mischgut mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 40 mm fest, dass es mit Hilfe eines CT-Scans möglich ist den Hohlraumgehalt zu bestimmen. Jedoch wurde gleichzeitig eine verfahrensbedingte Unsicherheit von bis zu  $\pm 1,50$  Vol.-% bei dem Hohlraumgehalt festgestellt. Diese wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Zum einen ergaben sich in Abhängigkeit der Schwellenwertfestlegung im Histogramm bereits eine Standardabweichung von 0,23 %. Hinzu kommt der Einfluss des Anwenders unter Vergleichsbedingungen, der zu einer Unsicherheit von 0,23 % bis 0,53 % führte. Nicht zu vernachlässigen ist auch, dass selbst unter Wiederholbedingungen verfahrensbedingte Standardabweichungen von bis zu 0,30 % festgestellt worden sind.

Mit Hilfe des sogenannten Digital Imaging, also der computergestützten Auswertung der Röntgen Scans, können außerdem Modelle der Hohlraumstruktur nachgebildet werden und Rückschlüsse auf die Gebrauchseigenschaften (z.B. Lärmreduzierung) gezogen werden. Aussagen zum Zusammenhang der Hohlraumstruktur oder des Gesteinskörnungsgewebes können gewonnen werden, erfordern jedoch auch komplexe und computergestützte Auswertungsprozesse und die entsprechende Erfahrung mit der Software zur Modellierung und Auswertung entsprechender 3D-Modelle [11].

Als eine weitere Anwendungsmöglichkeit wurden CT-Messungen für den Nachweis der Wirksamkeit

der Lärmreduzierung bei entsprechender Verschmutzung der Hohlräume eingesetzt. Dabei wurden sowohl OPA-Proben als auch ZWOPA-Proben (zweilagige Schicht aus offenporigem Asphalt), die sauber waren, als auch Proben die künstlich und mit festgelegten Mengen an Schmutz beaufschlagt wurden, untersucht. Dabei wurde bei den OPA-Proben festgestellt, dass der Hohlraumgehalt mit Beaufschlagung von Schmutz sinkt. Der Grad der Verschmutzung steht dabei auch messbar mit dem Hohlraumgehalt in Abhängigkeit. Je größer die Verschmutzung desto niedriger auch der Hohlraumgehalt. Durch die Darstellung des höhenbezogenen Hohlraumgehalts über die Probekörperhöhe konnte sowohl bei den sauberen als auch den künstlich verschmutzten Proben eine nahezu symmetrische Streuung um den Mittelwert festgestellt werden. Bei den ZWOPA-Proben wurde beobachtet, dass die Verschmutzungen auch zu einer Abnahme des Hohlraumgehalts führen. Entgegen der OPA-Proben ist die Verschmutzung aber im Höhenprofil des Probekörpers nicht zu erkennen. Vielmehr ist vor allem in Oberflächennähe ein „Zusetzen“ der Hohlräume zu erkennen gewesen. Demnach ist es möglich mit Hilfe von CT-Messungen den Verlauf des Hohlraumgehalts über die Probekörperhöhe und damit auch die Wirksamkeit der Lärmreduzierung in Abhängigkeit verschiedener Verschmutzungsgrade zu detektieren [11], ist jedoch nach wie vor sehr zeitintensiv und mit einer komplexen Auswertung verbunden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Untersuchung mittels CT vielfältige Möglichkeiten bietet Asphalt in Bezug auf dessen Zusammensetzung, dessen Gefüge oder dessen Gebrauchseigenschaften hin zu untersuchen. Entsprechend leistungsfähige Geräte sowie auch die Durchführung und Auswertung eignen sich jedoch nicht für alltägliche Untersuchungen in der Baupraxis. Mit Hilfe von kleineren als in der Baupraxis üblichen Probekörperabmessungen können die volumetrischen Kenngrößen hinreichend genau bestimmt werden. Die Frage, ob ein Probekörper mit deutlich reduzierten Abmessungen das Asphaltgefüge von Bohrkernen oder walzsektor-verdichteten Probekörpern repräsentativ darstellen kann, ist vor allem bei offenporigem Asphalt offen und in Frage zu stellen. Neben dem Verfahren selbst führt auch die Schwellwertfestlegung und der Einfluss des Anwenders unter Vergleichsbedingungen zu Streuungen von bis zu  $\pm 1,50$  Vol.-%. Aufgrund der Vor-

untersuchungen und der Erfahrungen aus der Literatur wurde das Verfahren zum Gunsten der in Kap. 2.3 beschriebenen im Rahmen des Projektes nicht mehr weiterverfolgt.

### 3 Untersuchungsmethodik

#### 3.1 Auswahl der Untersuchungsstrecken

Für die Untersuchungen innerhalb des Projektes wurden insgesamt sechs offenporige Asphaltmischgüter PA 8 mit unterschiedlichen Zusammensetzungen einbezogen. Um regionale Unterschiede von Gesteinsvorkommen, aus den Bitumeneigenschaften und aus den aktuell am Markt eingesetzten Baustoffen und Baustoffgemischen berücksichtigen zu können, wurden die Maßnahmen soweit möglich im Bundesgebiet verteilt.

Eine Übersicht der Lage der sechs Untersuchungsstrecken ist in Bild 9 dargestellt. In Tabelle 1 sind kompositionelle Merkmale der Mischgüter aus den Erstprüfungen sowie die Soll-Schichtdicken zusammengestellt.

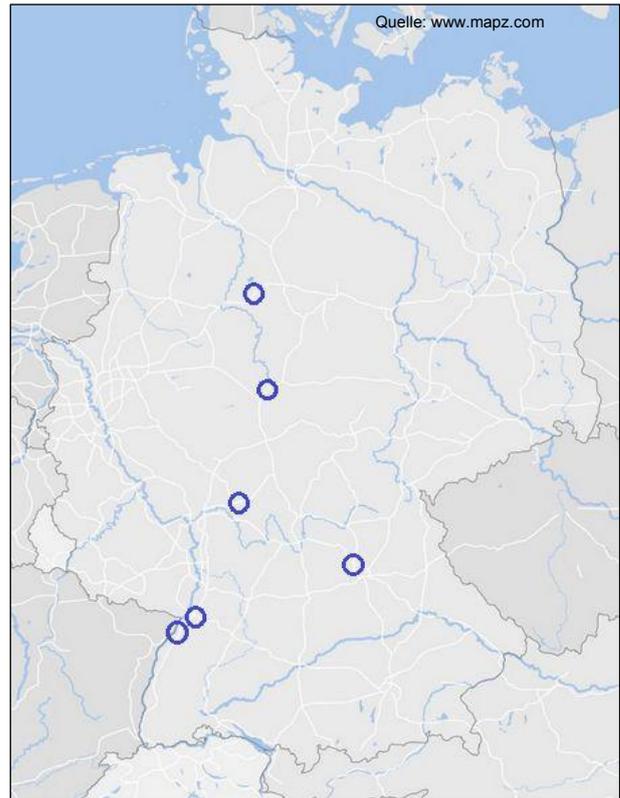


Bild 9: Übersicht der Lage der Untersuchungsstrecken

PA 8 - Variante		V1	V2	V3	V4	V5	V6
<b>Bindemittel</b>							
Zugabebindemittel		70/100	70/100	40/100-65 A	40/100-65 A	70/100	40/100-65 A
Zusätze		CTS GRM 40/20	CTS GRM 40/20	INNOCELL	VIATOP premium	33 % CTS GRM 40/20	C-Faser
Resultierendes Bindemittel		RmB G 35/70-55	GmBT 25/55-65	40/100-65 A	40/100-65 A	GmBT 25/55-65	40/100-65 A
Gesamtbindemittelgehalt [M-%]		6,7	5,8	6,5	6,5	6,6	6,4
<b>Gesteinskörnungen</b>							
Gesteinsart	Füller	Mischfüller Ka25	Kalksteinmehl	Kalkstein	Kalkstein	Kalksteinmehl	Kalkstein
	Grobe Gesteinskörnungen	Diabas	EOS	Grauwacke	Granodiorit	Moräne	Grauwacke
Massenanteile [M-%]	> 2,0 mm	92,3	94,1	94,0	94,3	94,0	93,3
	0,063 - 2,0 mm	3,4	1,1	1,4	1,5	1,1	1,0
	< 0,063 mm	4,3	4,8	4,6	4,2	4,9	4,8
<b>Mischguteigenschaften</b>							
Raumdichte [g/cm³]		1,916	2,472	1,825	1,847	1,842	1,834
Rohdichte [g/cm³]		2,551	3,870	2,433	2,482	2,433	2,426
<b>Schichteigenschaften</b>							
Soll-Schichtdicke		4,5 - 5 cm	4,5 - 5 cm	4,5 - 5 cm	4,5 - 5 cm	4,5 - 5 cm	4,5 - 5 cm
Abdichtung		MA	SAMI	SAMI	SAMI	SAMI	MA

Tabelle 1: Kompositionelle Merkmale der Mischgüter aus den Erstprüfungen sowie geplante Schichtdicken und Abdichtungsart

### 3.2 Probenahme

Die Probenahme des Mischgutes erfolgte direkt an der Verteilerschnecke des Fertigers während des Asphalteinbaus (Bild 10). Je Untersuchungsstrecke wurden zwei Entnahmestellen auf dem Standstreifen eingerichtet. Die Bohrkernentnahme fand jeweils am Folgetag statt. Dabei wurden je Entnahmestelle vier Bohrkernproben mit einem Durchmesser von 150 mm in einem Abstand von einem Meter in Fahrtrichtung gezogen (Bild 11 und Bild 12). Das Zusetzen der Hohlräume durch Bohrschlamm wurde durch ausreichende Spülung mit Wasser während des Bohrvorgangs und unmittelbar danach möglichst verhindert.

Sofern möglich und durch die jeweilige Straßenbaubehörde genehmigt, wurden die Entnahmestellen mit den Kontrollprüfungspunkten gekoppelt, um zusätzliche Vergleiche zu ermöglichen.

Eine Übersicht über die Probenmenge von Mischgut und Bohrkernen ist in Tabelle 2 dargestellt.



Bild 10: Probenahme des Mischgutes an der Verteilerschnecke



Bild 11: Bohrkernentnahme



Bild 12: Bohrkern einer Untersuchungsstrecke

Probenart	Stelle	Menge
Mischgut	1	Jeweils ca. 75 kg
	2	
Bohrkerne	1	jeweils 4 Bohrkernkerne
	2	

Tabelle 2: Probenmengen

### 3.3 Untersuchungsprogramm im Labor

Das reguläre Untersuchungsprogramm beinhaltete die Bestimmung der Mischgutzusammensetzung (Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt, Rohdichte sowie Untersuchungen am rückgewonnenen Bindemittel), die Herstellung von Probekörpern im Labor und deren Vorbereitung für verschiedene Untersuchungsstufen, in welchen dann jeweils volumetrische Kenngrößen bestimmt wurden, sowie die Validierung der Ergebnisse an den zugehörigen Bohrkernen. Aus den entnommenen Mischgutproben wurden Marshall-Probekörper (MPK) und Walzsektor verdichtete Asphalt-Probepplatten (WSV-Platten) hergestellt, die Bohrkernschichten wurden an der Schichtgrenze getrennt. Um den Einfluss der Probekörpergeometrie und der Beschaffenheit (Rauheit) herauszuarbeiten, erfolgten die Vorbereitung und Prüfung in mehreren aufeinanderfolgenden Stufen. Diese sind in Tabelle 3 schematisch dargestellt und im Folgenden erläutert:

Aus dem offenporigen Asphaltmischgut wurden pro Entnahmestelle jeweils vier MPK gemäß den TP Asphalt-StB, Teil 30 [22] und zwei WSV-Platten gemäß den TP Asphalt-StB, Teil 33 [23] hergestellt. Letztere gehören alle zur Stufe WSV. Hier wurden sie entsprechend des Prüfplans (siehe letzte Spalte in Tabelle 3) untersucht. Anschließend wurden aus jeder WSV-Platte vier Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm gewonnen. An den in situ entnommenen Bohrkernen wurden zunächst im Labor die Schichtdicken angezeichnet und vermessen. Anschließend wurden alle Lagen unterhalb der Deckschicht abgetrennt. Der Schnitt wurde entsprechend der angezeichneten Schichtgrenze so festgelegt, dass sich keine Reste der Binderschicht oder der Abdichtung an der Bohrkernscheibe befinden. Dementsprechend ergaben sich unterschiedliche Höhen.

In der Stufe 0 wurden die Probekörper aus den WSV-Platten, die MPK nach Fertigstellung und die Bohrkernen nach der Abtrennung der darunterliegenden Schichten ohne weitere Behandlung geprüft. Diese und die Stufe WSV stellten zugleich auch die Ausgangssituation dar. Sie unterschieden sich nicht nur in der Art der Herstellung, sondern auch in ihrer Form (MPK und WSV) und in ihren Abmessungen (Durchmesser und Höhe): die MPKs wiesen eine durchschnittliche Höhe von 63,5 mm, die WSV-Probekörper von ca. 40 mm auf, und die Bohrkernscheiben variierten zwischen 35 mm und 50 mm.

Auch die Oberflächen waren sehr unterschiedlich: die MPKs waren allseitig makrorau, die WSV-Probekörper an der Unter- und Oberseite makrorau und an der Mantelfläche glatt, die Bohrkernscheiben waren, bedingt durch das Ausbohren aus der Konstruktion und der Trennung der unteren Asphaltlagen, bis auf die Oberseite glatt.

Für Stufe 1 wurden die Unterseiten der WSV-Probekörper und der MPK geschliffen, um den Einfluss der rauen Unterseite zu untersuchen und zugleich die Geometrie und die Probekörperbeschaffenheit an die der Bohrkernscheiben anzunähern.

Die Höhe der MPK wurde für die Stufe 2 auf ca. 40 mm verkleinert. Dadurch haben die MPK die gleiche Höhe wie die WSV-Probekörper in Stufe 1.

Für die Untersuchungen in Stufe 3 wurden alle Probekörper auf eine Höhe von 30 mm geschliffen/gesägt, um den Einfluss der Höhe zu verdeutlichen.

Für die letzte Stufe 4 wurden jeweils die Oberseiten geschliffen. Als Ergebnis standen sowohl allseitig glatte WSV-Probekörper und Bohrkernscheiben, als auch an der Ober- und Unterseite glatte MPK mit einer immer noch makrorauen Mantelfläche.

Alle Schliffe und Sägeschnitte wurden dabei mit besonderer Vorsicht durchgeführt, um das Verschmieren bzw. Rausziehen des Bindemittels möglichst zu verhindern. Durch Verschmierung verstopfte Hohlräume beeinflussen das Durchlässigkeitsverhalten nachteilig und würde die Ergebnisse verfälschen.

In der letzten Spalte der Tabelle 3 sind die Untersuchungen für die jeweilige Stufe dargestellt. Das aufgeführte Programm gilt jeweils pro Strecke und je Entnahmestelle. In Kap. 2 sind die einzelnen Prüfverfahren und in Kap. 3.4 Einzelheiten zur Prüfungsdurchführung erläutert.

Grundsätzlich wurden an allen Probekörpern die Raumdichten mit Hilfe des Ausmessverfahrens (TP Asphalt-StB, Teil 6 [18]) und des Vakuumabdichtungsverfahrens (ASTM D6752/D6752M-18 [3]) bestimmt. In der Stufe WSV, 0 und 3 wurde zudem an allen Probekörpern deren Wasserdurchlässigkeit (TP Asphalt-StB, Teil 19 [20]) in horizontaler und vertikaler Richtung ermittelt. Zum Abschluss der Stufen 0 und 3 wurden jeweils von zwei MPK, zwei Bohrkernen und zwei WSV-Probekörper ausgewählter Strecken 3D-Modelle mit dem „HandyScan“ erstellt.

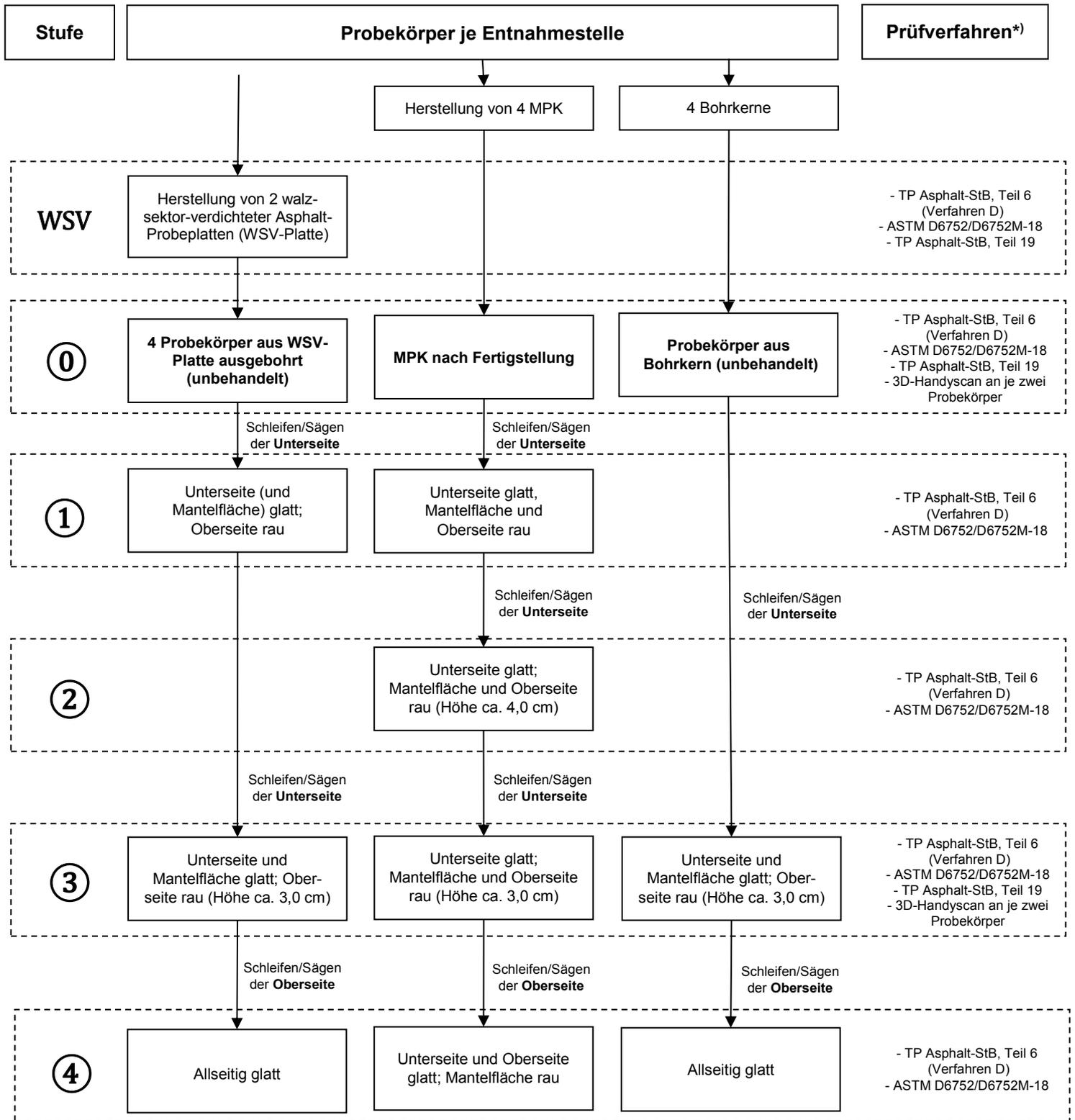


Tabelle 3: Schema Stufen des Untersuchungsprogramms inkl. Prüfverfahren

## 3.4 Versuchsdurchführung

### 3.4.1 Bestimmung der Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt, Teil 6

Das Ausmessverfahren wurde an allen Probekörpern und in jeder Stufe des Laborprogramms nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 [18] angewendet. Die Messungen wurden mit einem digitalen Messschieber von Laboranten durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Schenkel des Messschiebers so angelegt sind, dass die Umhüllende des Probekörpers und nicht etwaige Vertiefungen erfasst werden.

### 3.4.2 Bestimmung der Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18

Für die Raumdichtebestimmung nach ASTM D6752/D6752M-18 [3] kam das Standgerät MAX-F42 der Firma Boss Vakuum zum Einsatz. Die Vakuumkammer mit einem Schweißbalken ermöglicht das Vakuumieren von zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 100 mm bis 150 mm sowie von WSV-Platten. Es wurden zwei Beutelgrößen mit jeweils einer Materialstärke von 150 µm verwendet. Für die WSV-Platten wurden Beutel mit einer Größe von 400 mm x 500 mm und für die zylindrischen Probekörper Beutel mit den Abmessungen 300 mm x 400 mm verwendet. Der integrierte Schweißbalken ermöglichte das sachgerechte Verschließen der Beutel in der Vakuumkammer nach Abschluss der Vakuumierung.

Der Versuch ist bei 25°C Umgebungstemperatur durchzuführen. Die Probekörper und die Beutel für das Vakuumieren wurden daher mindestens drei Stunden vor Versuchsbeginn im Klimaschrank auf 25 °C klimatisiert und jeweils einzeln für die Versuche entnommen. Damit sollten vor allem Dichteschwankungen aufgrund von Temperaturanpassungsprozessen im Wasserbad reduziert werden.

Die Schwierigkeit dieses Verfahrens ist es, die Kunststoffbeutel beim Aufbringen des Vakuums nicht zu beschädigen. Die Dicke der Beutel wurde mit 150 µm so gewählt, dass auf der einen Seite eine möglichst dicke Wandung vorliegt, aber auf der anderen Seite auch die Grenzwerte der Normung bzgl. der Dicke eingehalten werden. Beim PA erschweren die sehr raue Oberflächenstruktur sowie die scharfkantigen und abstehenden Körner zusätzlich den Vakuumierungsprozess. Aus diesem Grund ist beim Umgang mit den Probekörpern und den

Beuteln äußerste Vorsicht geboten. Deshalb wurden alle Arbeitsflächen wie auch der Innenraum des Vakuumgeräts mit Moosgummi gepolstert. Eine Beprobung der zylindrischen Probekörper konnte so nach Norm durchgeführt werden. Die WSV-Platten konnten jedoch nur mit Hilfe von zwei Vakuumierdurchgängen und zwei übereinanderliegenden Beuteln vakuumiert werden, um die Perforation und damit den Wassereintritt zu verhindern. Die WSV-Platten wurden dafür in einem ersten Durchgang in einem Beutel vakuumiert. Im Anschluss wurde die eingeschweißte Platte nochmal in einem zweiten Beutel vakuumiert und verschweißt. Bei der Verwendung nur eines Beutels war es kaum möglich, den Probekörper ohne Perforation ins Wasserbad zur Wägung zu legen. Auch mit äußerster Vorsicht bei der Handhabung und sofortiger Weiterbearbeitung lief bei fast allen Platten während der Tauchwägung so viel Wasser in die Beutel, dass der Versuch abgebrochen und nach einer Trocknung bis zur Massenkonstanz wiederholt werden musste. Als problematisch erwiesen sich vor allem die Eckbereiche der WSV-Platten.

### 3.4.3 Prüfung der Wasserdurchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern

Der Aufbau der Versuchseinrichtung entsprach den Vorgaben der Technischen Prüfvorschrift (TP) (s.a. auch Kap 2.4). Dort sind jedoch nur Versuche an zylindrischen Asphalt-Probekörpern (Bohrkerne und MPK) mit einem Durchmesser von 100 mm oder 150 mm geregelt. Um eine möglichst große und repräsentative Fläche prüfen zu können, wurde eine weitere Versuchseinrichtung zur Prüfung von Walzsektor verdichteten Asphalt-Probekörpern (WSV-Platten) gebaut.

Der Grundaufbau der Versuchseinrichtung, hier im Beispiel mit einer WSV-Platte, ist in Bild 13 exemplarisch dargestellt. Die Wanne wurde eigens für die Versuche aus Kunststoff gefertigt und von den Abmessungen so angepasst, dass ein gutes Probekörperhandling möglich ist. Für die Justierung der Probekörper und insbesondere für die Einstellung der Höhe stehen zwei verstellbare Arbeitsbühnen zur Verfügung. Beide sind jeweils mit einer Lochplatte ausgestattet.

Das Wasser wird über den Abfluss in einen Auffangbehälter oder direkt in ein Waschbecken abgeleitet. Um die Wassersäule auf die Probekörper aufbringen zu können, wurden außerdem für die zylindrischen Probekörper Glaszylinder und für die WSV-



Bild 13: Grundaufbau Wasserdurchlässigkeit

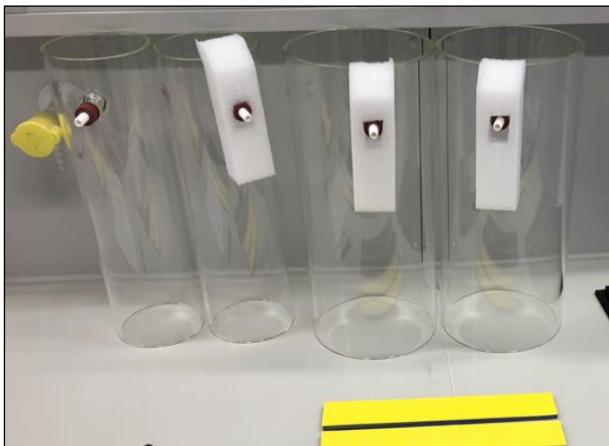


Bild 14: Glaszylinder für Probekörper (Ø 100-150 mm)

Platten Behälter aus Kunststoff angefertigt, die den Anforderungen der Technischen Prüfvorschriften genügen (Bsp. siehe Bild 14).

Die Vorversuche zeigten, dass die Wasserdurchlässigkeit der WSV-Platten so hoch ist, dass es nicht möglich ist, die nach den TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] notwendige Wassersäulenhöhe von 300 mm zu erreichen und konstant zu halten. Auch mit dem Zufluss über mehrere Wasserleitungen war dies nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die Versuchsrandbedingungen für die Prüfung der WSV-Platten modifiziert: In Anlehnung an die Durchlässigkeitsprüfung der mittlerweile zurückgezogenen DIN 18035-6 (1992) [7] wurde die Zeit bestimmt, in der der Wasserspiegel zwischen zwei fest definierten Messmarken abfällt. Damals war das Verfahren zur Überprüfung der Durchlässigkeit von Asphalt auf Sportplätzen (Tennenflächen) vorgesehen. Die Wassersäulenhöhe von 300 mm wurde über einen Vakuumprozess erreicht. Nach Wegfall des Vakuums strömte das Wasser durch den Asphalt-Probekörper und die Zeit zwischen zwei Messmarken wurde gemessen.

Um die Ergebnisse der WSV-Patten mit denjenigen der zylindrischen Probekörper direkt vergleichen zu können, wurden bei den ersten Strecken auch die letzteren zusätzlich mit dem modifizierten Verfahren geprüft. Sowohl das Verfahren mit konstanter Wassersäule, als auch das Verfahren mit abnehmender Wassersäule wurde mit den gleichen Vorrichtungen geprüft. Die Messmarken wurden mit 260 mm (Messmarke 1) und 20 mm (Messmarke 2) über dem Wasserspiegel des Behälters, in dem auch die Arbeitsbühne steht, festgelegt. Bei der Versuchsdurchführung werden die Glaszylinder bzw. der Kunststoffbehälter von oben verschlossen und der Ablauf zum Absaugen der Luft verwendet. Sobald der Wasserstand die Messmarke 1 passiert hat, wird die Zeitmessung gestartet und nach Passieren der Messmarke 2 gestoppt. Die vergangene Zeit geht dann zusammen mit der Dicke des Probekörpers und der Höhen der Messmarken in die Berechnung ein.

Der Wasserschluckwert  $k^*$ , bzw. Durchlässigkeitsbeiwert, lässt sich nach der DIN 18035- 6 [7] mit folgendem Ansatz berechnen. Er leitet sich aus der Bedingung der Massenerhaltung ab, da der Durchfluss durch das Rohr dem Durchfluss durch den Probekörper entspricht.

$$k^* = \frac{F_o \cdot s}{F_u \cdot t} \cdot \lg\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad [\text{m/s}]$$

mit  $F_o$ : Standrohr-Querschnittsfläche in  $\text{m}^2$

$F_u$ : Probekörper-Querschnittsfläche in  $\text{m}^2$

$s$ : Dicke des Probekörpers in m

$t$ : Zeit des Absinkens des Wasserspiegels zwischen den beiden Messmarken in s

$h_1$ : Höhe der Messmarke 1 über Überlauf in m

$h_2$ : Höhe der Messmarke 2 über Überlauf in m

Da die Standrohr-Querschnittsfläche näherungsweise der Probekörper-Querschnittsfläche entspricht, vereinfacht sich die Formel im vorliegenden Fall zu:

$$k^* = \frac{s}{t} \cdot \lg\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad [\text{m/s}]$$

mit  $s$ : Dicke des Probekörpers in m

$t$ : Zeit des Absinkens des Wasserspiegels zwischen den beiden Messmarken in s

$h_1$ : Höhe der Messmarke 1 über Überlauf in m

$h_2$ : Höhe der Messmarke 2 über Überlauf in m

Der Durchfluss kann in horizontaler und vertikaler Richtung über die gleiche Formel, wie bereits in 2.4 erläutert, nach den TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] berechnet werden. Jedoch ändert sich hier die Variable, da bei der Versuchsdurchführung mit abnehmender Wassersäule die Zeit variabel, und dafür die Masse des durchfließenden Wassers über das Volumen zwischen den Messmarken und die Dichte des Wassers bekannt ist.

In Tabelle 4 sind die verschiedenen Randbedingungen, bei denen die Prüfungen durchgeführt werden, mit der entsprechenden Kodierung dargestellt. Das Verfahren nach den TP Asphalt-StB wird mit einer konstanten Wassersäule von 300 mm durchgeführt. Neben dem hohen Durchfluss bei WSV-Platten gestaltet sich auch die Ermittlung der horizontalen Durchlässigkeit bei runden Probekörpern bezüglich der Aufrechterhaltung des Wasserspiegels bei 300 mm als schwierig. Hinzu kommt die Problematik der Abdichtung des Übergangsbereichs zwischen Zylinder und Probekörper. Nach den Technischen Prüfvorschriften wird in diesem Bereich eine Kehle aus Silikon vorgesehen. Diese Silikonkehle schafft zum einen die Verbindung und dichtet zum anderen den Übergangsbereich ab. Sie verhindert vor allem den unkontrollierten und nicht realitätsnahen Abfluss durch Öffnungen, die sich zwangsläufig zwischen Zylinder und Probekörper durch dessen grobe Textur ergeben. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts war es nicht möglich, eine solche Silikonnaht als Verbindung vorzusehen, da immer der gleiche Probekörper über alle Stufen untersucht werden sollten. Aus diesem Grund wurden für die horizontale Durchlässigkeit bei konstantem Wasserspiegel alternative Abdichtungsvarianten mit Moosgummi, Knetmasse Gummimanschette in verschiedenen Kombinationen erprobt. Daraus entstanden bei den MPK, den WSV-PK und den Bohrkernen die Varianten H1 bis H3, die sich nur in der Art der Abdichtung unterscheiden (Tabelle 4).

In Bild 15 ist als Beispiel der schematische Aufbau für die Abdichtung der horizontalen Durchlässigkeit in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] dargestellt. Anstatt von Kleber bzw. hochviskosem Silikon, wie in der Prüfvorschrift vorgesehen, wurde hier für die Abdichtung zwischen Probekörperrand und Glasrohr ein Moosgummistreifen verwendet. Diese Änderung war notwendig, da die Probekörper in Rahmen des Untersuchungsprogramms weiter

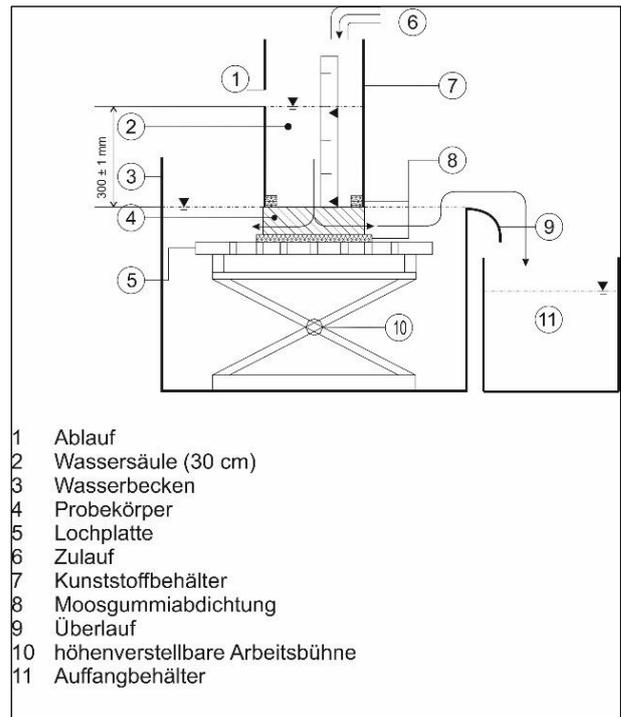


Bild 15: Aufbau und Abdichtungsvariante des Prüfstands zur Bestimmung der horizontalen Durchlässigkeit in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 19 [20]

untersucht werden und die Hohlräume entsprechend danach wieder alle frei sein müssen. Bei zylindrischen Probekörper bis zu einem Durchmesser von ca. 100 mm hat dies gut funktioniert, bei den WSV-Platten dagegen ist Wasser zum Teil unkontrolliert durch die oben genannten Hohlräume bzw. Öffnungen an der Verbindungsstelle austritt. Dementgegen wird bei der alternativen Abdichtungsvariante (Variante TP (H2) in Tabelle 4) zur Bestimmung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit an zylindrischen Probekörpern neben dem innenliegenden Moosgummistreifen auch ein zweiter Moosgummistreifen am oberen Rand der Probekörpermantelfläche eingesetzt, der mit Hilfe von Manschetten und einem Kabelbinder fixiert wird. Weitere Varianten zur Abdichtung mit Beschreibung und Bebilderung sind im Anhang III aufgeführt.

Bei V1, V2 und V3 erfolgte die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mit allen Abdichtungsvarianten. Nach der Auswertung der Ergebnisse wurden für die weiteren Strecken die Variante TP(H1) präferiert.

	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit gemäß den TP, T. 19 und konstantem Wasserspiegel (Vertikal)		Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit gemäß den TP, T. 19 und konstantem Wasserspiegel (Horizontal)		Bestimmung des Wasserschluckwerts durch Vakuum und veränderlichem Wasserspiegel (Vertikal)		Bestimmung des Wasserschluckwerts durch Vakuum und veränderlichem Wasserspiegel (Horizontal)	
	Kodierung	Bemerkung	Kodierung	Bemerkung	Kodierung	Bemerkung	Kodierung	Bemerkung
WSV-Probekörper	TP(V)	Gemäß den TP, T. 19 ohne Einschränkung; nur Gummimanschette	TP (H3)*	- 1 cm breiter, innenliegender Moosgummiring, - 101 mm Standrohr - Abdichtung der verbleibenden, offen liegenden Oberfläche	V*		H*	
			TP (H2)*	- 1 cm breiter, innenliegender Moosgummiring plus - 1 cm breiter, außenliegender Moosgummiring an Oberseite Mantel - Fixierung durch Kabelbinder und Manschette				
Marshall-Probekörper	TP(V)	- Probekörper einbauen, - Wasser bis zum Überlauf füllen - Wasserspiegel halten	TP (H1)	- 1 cm breiter, innenliegender Moosgummiring - und innenliegenden Abdichtung mit Dichtmasse	V*	ohne Einschränkung; nur Gummimanschette	H*	ohne Einschränkung; Innenliegender Moosgummiring und Knetmasse innen
			TP (H3)*	- 1 cm breiter, innenliegender Moosgummiring, - 101 mm Standrohr - Abdichtung der verbleibenden, offen liegenden Oberfläche				
Bohrkerne	TP(V)	- 60 Sekunden durchlaufen lassen - 60 s Wasser auffangen und wiegen.	TP (H2)*	- 1 cm breiter, innenliegender Moosgummiring plus - 1 cm breiter, außenliegender Moosgummiring an Oberseite Mantel - Fixierung durch Kabelbinder und Manschette	V*		H*	
WSV-Platten	-	Wasserspiegel von 300 mm nicht erreichbar.	-	Wasserspiegel von 300 mm nicht erreichbar.	WSV V	1 cm breite innenliegende, umlaufende Moosgumi Streifen (2 St.)	WSV H	1 cm breite innenliegende, umlaufende Moosgumi Streifen (2 St.)

\*) Nur bei Varianten V1 – V3.

Tabelle 4: Wasserdurchlässigkeitsprüfungen

### 3.4.4 Raumdichte mittels 3D-HandyScan

Das alternative 3D-HandyScan-Verfahren wurde bei drei Strecken (V4 bis V6) angewendet. Dabei wurde jeweils in Stufe 0 und Stufe 3 ein Probekörper je Probekörperart und Entnahmestelle geprüft. Das entspricht in der Summe sechs Probekörper pro Versuchsstrecke, die insgesamt zwei Mal gescannt werden.

Eine wichtige Voraussetzung für die Ermittlung verlässlicher Ergebnisse mit dem HandyScan ist, dass die Position des Probekörpers sich während der Messung nicht verändert. Gleichzeitig muss die Oberfläche vollständig erfasst werden. Deshalb wurde speziell ein für diesen Zweck konzipierter Prüfstand gebaut. Sowohl der Prüfstand als auch die Probekörper wurden mit Hilfe von Klebpunkten referenziert. Das Handgerät erfasste dann jeweils die relativen Positionen zwischen Probekörper und

Prüfstand über Laser-Triangulation in Echtzeit. Ein programminterner Modus ermöglichte das Scannen von schwarzen Materialien. Vergleichbare Laserabtastungsverfahren bedürfen einer Vorbehandlung der Probekörper mit Sprays und Ähnlichem, um die fehlenden Reflexionen zu umgehen.

Vor allem die Erstellung des 3D-Modells aus der Punktwolke stellte auf Grund der sehr komplexen und unterschiedlichen Oberflächenstruktur einen erheblichen Aufwand dar. Zur Nachbearbeitung der Messdaten wurde die Software „VXmodel“ von CREAFORM verwendet. Um aus Punktwolken, beispielsweise hinsichtlich Oberfläche und Volumen, auswertbare CAD-Modelle zu erstellen, wurden diese Daten anschließend in die Software „Geomagic Design X“ von 3D SYSTEMS importiert und entsprechend konvertiert.

Der Scan (Bild 16) lieferte ein präzises Oberflächen- und Volumenmodell des Probekörpers ohne die oberflächlichen Hohlräume und Rauheit. Aus diesem Grund waren auch andere Werte für die Raumdichten, wie sie bspw. mit dem Ausmessverfahren bestimmt werden, zu erwarten.

Es war außerdem zu erwarten, dass die Ergebnisse ähnlich derer aus dem Vakuumverfahren sind, da durch das Vakuum und die angelegte Folie der Einfluss der Oberflächenrauheit ebenfalls reduziert wird. Tendenziell sollten aber die Raumdichten mittels 3D-Scan am größten sein, da die Oberfläche sehr genau dargestellt wird und somit weniger oberflächennahe Hohlräume in die Raumdichtebestimmung einfließen.

Die Raumdichte wurde indirekt über das durch den Scan ermittelte Volumen und die im Labor bestimmte Trockenmasse des Probekörpers berechnet.

$$\rho_{3D-Scan} = \frac{A}{V_{3D-Scan}} \quad [\text{g/cm}^3]$$

mit A: Masse des trockenen Probekörpers in g

$V_{3D-Scan}$ : Volumen des Probekörpers aus dem 3D-Modell in  $\text{cm}^3$

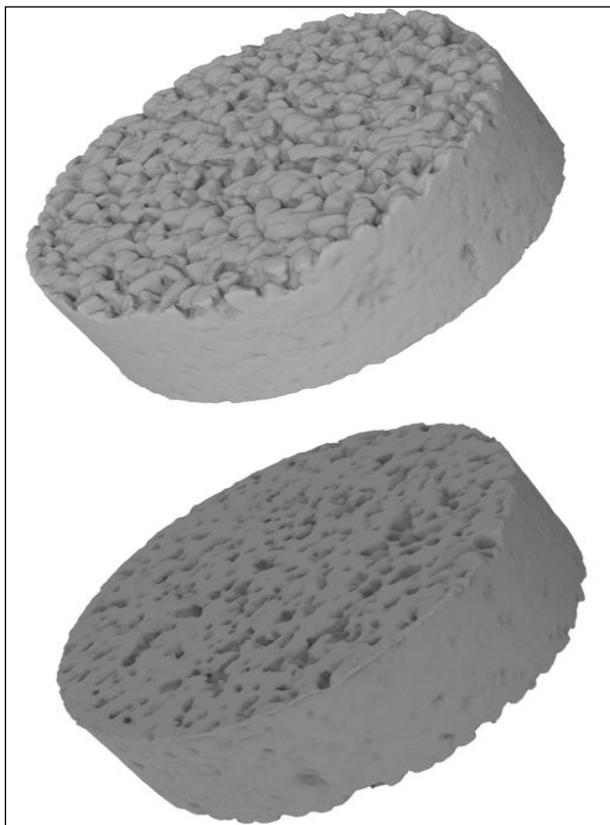


Bild 16: 3D-Scan eines Bohrkerns von der Vorder- und Rückseite

### 3.5 Grundlagen der statistischen Auswertung

Das Untersuchungsprogramm wurde so zusammengestellt, dass die Einflüsse aus der Oberflächenbeschaffenheit, Probekörperdicke und Art der Probekörperherstellung ausgearbeitet werden können. Für die Analyse der Streuung und der Lage der Ergebnisse werden diese zunächst in Kapitel 4 in Form von Box-Plots dargestellt. Die statistischen Kennwerte

- Minimum (unteres Ende der Antenne),
- 25 %-Quantil / unteres Quartil (unteres Ende der Box),
- 75 %-Quantil / oberes Quartil (oberes Ende der Box),
- Maximum (oberes Ende der Antenne oder letzter Punkt, falls vorhanden),
- Ausreißer (einzelne Punkte oberhalb bzw. unterhalb der Antennen),
- Median (Querstrich in der Box) und
- Mittelwert (Kreuz)

sind aufgrund der Diagrammform direkt erkennbar.

Regressionsanalysen ermöglichen eine Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen einer abhängigen Variable und einer oder mehrerer unabhängiger (erklärender) Variablen. Im ersten Fall ist es entsprechend eine einfache und im zweiten eine multiple Regressionsanalyse.

Über einfache Regressionsanalysen werden in Kapitel 5 erste Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der volumetrischen Eigenschaften untersucht. Dabei wird über die Summe der kleinsten Quadrate das Bestimmtheitsmaß ermittelt. Je höher es liegt, desto mehr hängen die Kenngrößen zusammen. Ein Wert von mindestens 80 % wird dabei als gut bezeichnet.

Die Wechselwirkung zwischen mehreren Variablen gleichzeitig wird mit Hilfe von multiplen Regressionsanalysen in Kapitel 5.3.3 untersucht.

Vor der Durchführung einer Regressionsanalyse müssen mögliche Ausreißer identifiziert, geprüft und ggf. ausgeschlossen werden. Die Identifizierung erfolgte im vorliegenden Fall mit Hilfe von Box-Plots, analog der Ergebnisdarstellung in Kap. 4. Die Güte eines linearen Zusammenhangs definiert sich bei einer linearen Regression über das Bestimmtheitsmaß  $r^2$ . Unter Berücksichtigung der Anzahl der Erklärungsvariablen und dem Umfang der

Stichprobe wird das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $r^2_{\text{korrr}}$  bestimmt, das ein besseres Maß für die Güte der Vorhersagequalität der Regressionsgleichung mit mehreren unabhängigen Variablen darstellt:

$$r^2_{\text{korrr}} = r^2 - \frac{m}{n - m - 1} (1 - r^2)$$

mit:  $m$ : Anzahl unabhängiger Variablen.  
 $n$ : Anzahl Beobachtungen

Bei entsprechender Modellgüte und vorliegender Signifikanz der Ergebnisse, werden zur Beurteilung der Zusammenhänge die Regressionskoeffizienten herangezogen, die sich aus dem mathematischen Ansatz des linearen Zusammenhangs ableiten lassen.

$$y(x) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_j \cdot x_j$$

mit:  $y(x)$ : Zielgröße  
 $b_0$ : konstantes Glied  
 $b_1 \dots b_j$ : multiple Regressionskoeffizienten  
 $x_1 \dots x_j$ : Einflussgrößen

Die Regressionskoeffizienten werden auf Grundlage der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet und dann die Signifikanz für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % getestet. Das bedeutet das für die Grundgesamtheit der Variablen bei entsprechend vorliegender Signifikanz ein statistisch abgesicherter Zusammenhang angenommen werden darf. Neben den Regressionskoeffizienten  $b_j$  werden die standardisierten Regressionskoeffizienten  $\beta_j$  (Beta-Koeffizienten) für die Einflussgröße  $x$  mit Hilfe der nachfolgenden Gleichung bestimmt:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s}$$

mit:  $z$ : standardisierte Variable,  
 $\bar{x}$ : arithmetisches Mittel  
 $s$ : Standardabweichung der Einflussgröße  $x$ .

Im Unterschied zu den Regressionskoeffizienten sind die Beta-Koeffizienten von der Dimension der erklärenden Variablen unabhängig und daher miteinander vergleichbar. Damit wird der Erklärungsbeitrag einzelner Variablen sichtbar. Der Einfluss der Multikollinearität darf an dieser Stelle nicht unbe-

rücksichtigt bleiben: Wenn die Abhängigkeit der erklärenden Variablen untereinander groß ist, dann ist die Aussagekraft der Koeffizienten eingeschränkt. Deshalb wurde für jede Regression zeitgleich eine Kollinearitätsstatistik erstellt die sicherstellt, dass ein Einfluss der Multikollinearität ausgeschlossen werden kann. Die Stichproben wurden standardmäßig auch auf Normalverteilung sowie die entsprechenden Streudiagramme geprüft.

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Allgemeines

Im Folgenden sind die Ergebnisse der sechs PA-Varianten in Form von Box-Plots sortiert nach Stufe (WSV, 0, 1, 2, 3 und 4) und Probekörperart (WSV-Platte (WSV), Probekörper aus WSV-Platte (WSV-PK), MPK und BK) dargestellt. Die statistischen Grundlagen dazu sind in Kapitel 3.5 beschrieben. Einzelheiten zu den unterschiedlichen Stufen sowie Probekörperarten können aus Kap. 3.3 und Tabelle 3 entnommen werden. Beide Entnahmestellen werden i.d.R. zusammen betrachtet. Für die Stufe WSV liegen somit vier und für die anderen Stufen jeweils acht Einzelwerte zugrunde. Wenn die Unterschiede zwischen den beiden Entnahmestellen signifikant sind, werden diese getrennt analysiert, so dass die Anzahl der Einzelwerte halbiert wird. Die Einzelergebnisse sind im Anhang II dargestellt.

### 4.2 Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt-StB, Teil 6

#### 4.2.1 Gesamtbetrachtung der Raumdichte nach Verfahren D

In Bild 17 bis Bild 22 sowie Bild 24 bis Bild 31 sind die Ergebnisse der nach dem Verfahren D der TP Asphalt-StB, Teil 6 [18] ermittelten Raumdichten sowie der daraus errechneten Hohlraumgehalte dargestellt. Die WSV-Platten (erster Box-Plot in den Diagrammen) weisen tendenziell die geringsten Raumdichten von allen Probekörperformen auf. Eine deutliche Ausnahme hiervon stellt die Variante V3 dar, bei der die MPK in allen Stufen der WSV-Platten ähnliche oder geringere Raumdichten haben (Bild 21). Aufgrund der schlechten Verdichtung in situ sind auch bei der Entnahmestelle 1 der Variante V2 (Bild 19) sowie bei der Entnahmestelle 2 der Variante V4 (Bild 25) die Raumdichten der

Bohrkerne ähnlich bzw. geringer als die Raumdichten der jeweiligen WSV-Platten. Der Verdichtungsgrad beträgt in Stufe 0 und 3 bei Variante 2 ca. 96 %. An Entnahmestelle 2 bei Variante V4 ist in Stufe 0 ein Verdichtungsgrad von ca. 94 % und in Stufe 3 von ca. 95 % feststellbar.

Über die Stufen hinweg ist von Stufe 0 (Ausgangszustand: WSV-PK nach dem Bohren, MPK direkt nach der Herstellung und BK-Schicht direkt nach der Schichtentrennung) zu Stufe 1 (glatte Unterseite von WSV-BK und MPK) ein Anstieg der Raumdichten bei den WSV-PK und MPK zu erkennen. Die Ursache ist im Einfluss der herstellungsbedingten Makrorauheit zu suchen. Durch das Schleifen der Unterseite ist die Oberfläche glatt und die Probekörper wirken dichter. Dabei bleibt die Reihung in Bezug auf die Probekörperart erhalten, d. h. wenn die Raumdichten bei den WSV-PK und MPK in Stufe 0 ähnlich sind oder sich überschneiden, wie es bei V1 und V4 (Bild 17, Bild 24 und Bild 25) der Fall ist, so ändert sich dies in Stufe 1 nicht. Bei den anderen Varianten bleiben diese Zusammenhänge auch erhalten, wobei bei V2 und bei V5 die MPK stets dichter als die WSV-PK ausfallen (Bild 19 und Bild 29), bei V3 ist es umgekehrt (Bild 21).

Mit abnehmender Probekörperdicke von Stufe 1 auf Stufe 2 und 3 fallen die Raumdichten der MPK und der WSV-PK i.d.R. wieder ab. Dies kann mit der Zunahme des Einflusses der herstellungsbedingten Makrorauheit der Oberfläche erklärt werden. Nur bei V1 und V3 ist in Stufe 3 eine Erhöhung der Raumdichten der WSV-PK und eine große Streuung in den Ergebnissen der MPK ohne signifikante Änderung des Mittelwertes zu verzeichnen. Von Stufe 2 zu Stufe 3 ist eine geringere Abnahme der Raumdichten bei den MPK festzustellen, die aber damit zu erklären ist, dass von Stufe 2 zu Stufe 3 lediglich 10 mm abgeschliffen werden. Bei den Bohrkernen ist auch eine tendenzielle Abnahme mit abnehmender Probekörperdicke in der Stufe 3 zu erkennen. Diese fällt teilweise sehr klein aus, da die Dicke der BK-Scheiben in Stufe 0 bereits gering ist: bei den meisten Proben liegt sie zwischen 30 und 40 mm und damit nah bei der Dicke von 30 mm, auf welche die Probekörper für die Stufe 3 gebracht werden. Die größte Veränderung ist bei V1 zu verzeichnen, da hier auch die Anfangsdicke mit ca. 50 mm die größte ist: die niedrigen Raumdichten der Bohrkern in Stufe 3 führen dazu, dass der Hohlraumgehalt sprunghaft über den Anforderungswert steigt.

In Stufe 4 ist bei allen Varianten ein (deutlicher) Anstieg der Raumdichten bei allen Probekörperarten zu erkennen und spricht dafür, dass die herstellungsbedingte Rauheit an der Ober- und Unterseite einen großen Einfluss auf die Raumdichtebestimmung hat. In Stufe 4 sind mit Ausnahme der Mantelfläche bei den MPK alle Probekörperflächen glatt und die Höhen betragen 20 mm.

#### **4.2.2 Variantenspezifische Ergänzungen zur Betrachtung der Raumdichte nach Verfahren D**

##### **Variante 1 (V1)**

In Stufe 0 sind die Raumdichten der WSV-PK sowie die der MPK ähnlich (Bild 17). Mit fortlaufender Bearbeitung der Probekörper in den weiteren Stufen werden die Unterschiede zwischen den Probekörperarten deutlicher und die Streuungen nehmen zum Teil zu. Eine getrennte Betrachtung der beiden Entnahmestellen führt zu keiner allgemeinen Reduktion der Streuungen. Tendenziell haben die WSV-PK die höchste und die BK die niedrigste Raumdichte.

Zur besseren Zuordnung wurden daraus die Hohlraumgehalte (Bild 18) berechnet. Sie verhalten sich entsprechend umgekehrt proportional. Es wird deutlich, dass es sich bei Variante V1 grundsätzlich um eine „dichtere“ Zusammensetzung handelt. In Stufe 0 (Ausgangszustand) erfüllt keiner der MPK die Anforderungen der TL Asphalt-StB [17] von 24 Vol.-%. Das gleiche gilt auch für die Bohrkern und die entsprechenden Anforderungen nach den ZTV Asphalt-StB [25] von 22 Vol.-%.

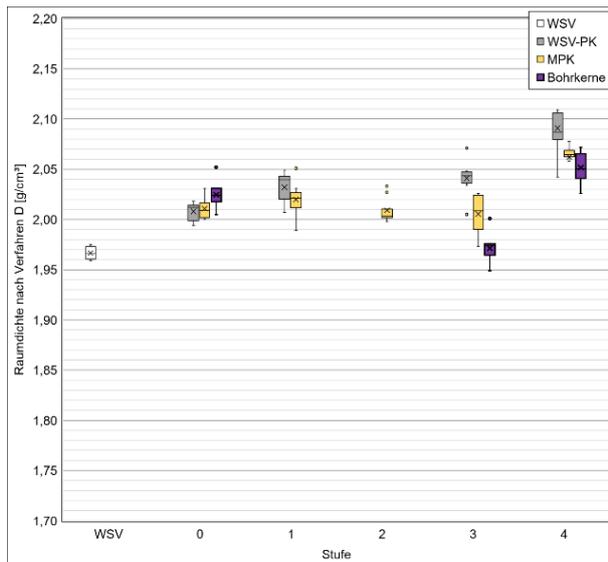


Bild 17: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V1

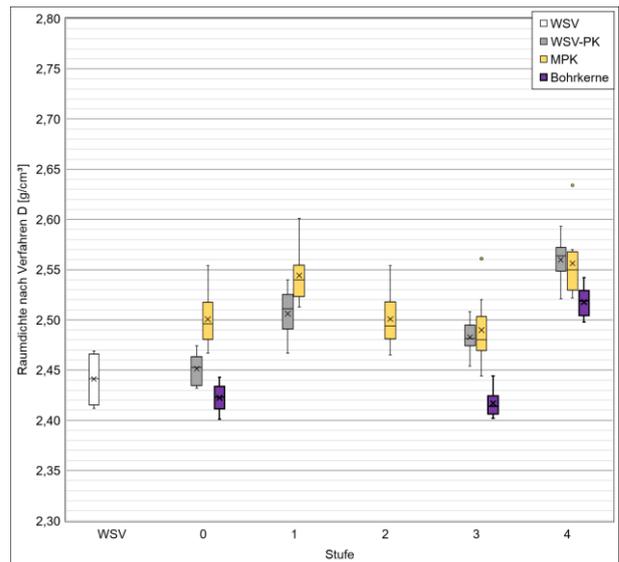


Bild 19: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V2

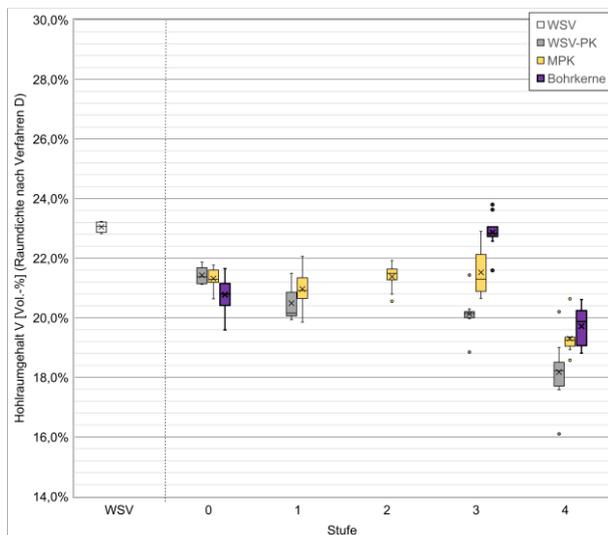


Bild 18: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V1

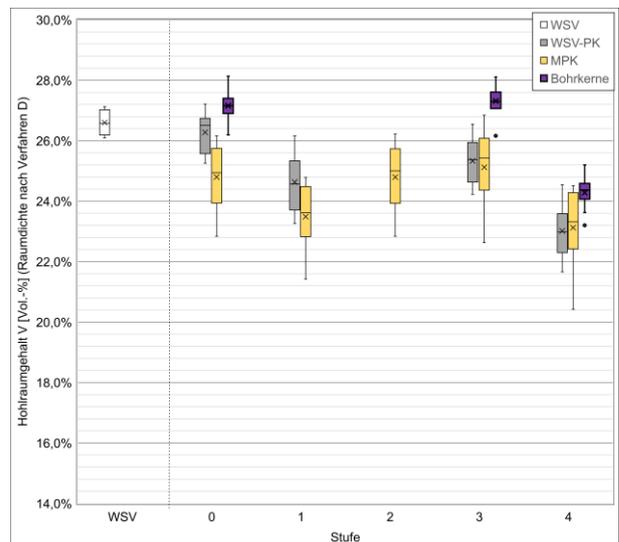


Bild 20: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V2

## Variante 2 (V2)

Die gemessenen Raumdichten liegen hier auf Grund der Verwendung von Gesteinskörnungen aus Elektroofenschlacke (EOS) im Asphaltmischgut grundsätzlich auf einem deutlich höheren Niveau, so dass die Skalierung im Diagramm entsprechend anders als bei den anderen Varianten ist (Bild 19).

Die Raumdichten der WSV-Platten (Stufe WSV) sind im Mittel sehr ähnlich zu denjenigen der daraus gewonnenen Probekörper (WSV-PK in Stufe 0). Der Einfluss der Probekörperart ist in Stufe 0 deutlich zu erkennen, auch wenn die Reihung der Raumdichten anders als bei V1 ausfällt.

Die Bohrkerne (BK) sind über die Stufen hinweg die Probekörperart mit der niedrigsten Raumdichte. Bei den MPK und den WSV-Probekörpern werden in Stufe 3 und 4 jeweils ähnliche Raumdichten bestimmt. Grundsätzlich kann angemerkt werden, dass die Streuung der bestimmten Raumdichten bei V2 deutlich größer ist als bei V1. Teilweise lassen sich hier die Streuungen mit den unterschiedlichen Entnahmestellen in Verbindung setzen (Anhang AI.1).

Die berechneten Hohlraumgehalte (Bild 20) führen entsprechend der breiter gestreuten Raumdichten auch zu größeren Spannweiten bei den Hohlraumgehalten. Im Ausgangszustand können alle Probekörper die Anforderungen an den Hohlraumgehalt

einhalten. Die Bohrkernproben bleiben sogar über alle Stufen hinweg über dem nach den ZTV Asphalt-StB [25] geforderten Hohlraumgehalt von 22 Vol.-%. Lediglich die MPK weisen in Stufe 1 (ca. 60 mm) und Stufe 4 im Mittel (ca. 20 mm) einen Hohlraumgehalt unter 24 Vol.-% auf. Im Vergleich zu Variante V1 ist bei der gewählten Asphaltzusammensetzung von Variante V2 aber ein deutlich höheres Niveau des Hohlraumgehalts zu erkennen.

### Variante 3 (V3)

Bei Variante V3 ist durchgehend über alle Stufen die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Probekörperart zu erkennen (Bild 21). Dabei haben die MPK stets die geringste Raumdichte.

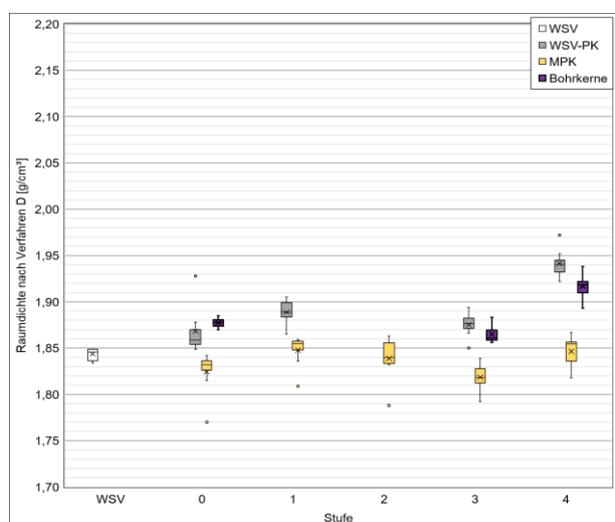


Bild 21: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V3

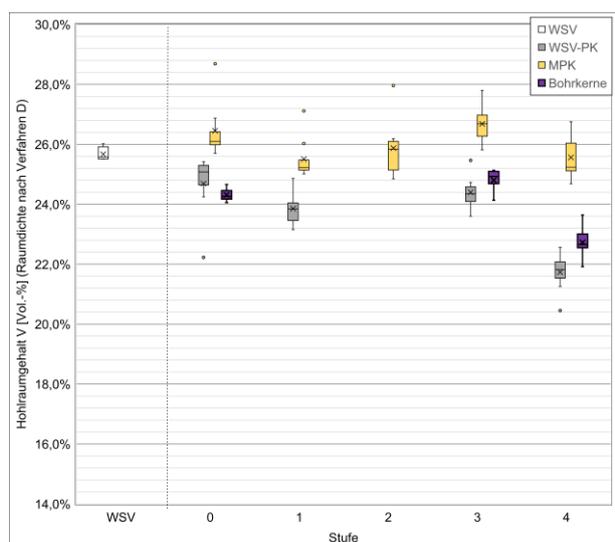


Bild 22: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V3

Im Ausgangszustand (Stufe 0) weisen die Bohrkernproben die dichteste Struktur, in den weiteren Stufen sind jedoch die WSV-PK die dichtesten Probekörper. Die Streuungen sind vergleichsweise klein.

### Variante 4 (V4)

Aufgrund der sehr schlechten Verdichtung der Bohrkernproben aus der Entnahmestelle 2 sind die Ergebnisse der Variante V4 in getrennten Box-Plot-Diagrammen dargestellt (in Bild 24 und Bild 25 die Raumdichte, sowie in Bild 26 und Bild 27 der Hohlraumgehalt). Auffällig sind die deutlich geringeren Raumdichten sowie die hohen Hohlraumgehalte der Bohrkernproben der Entnahmestelle 2. In der Mischgutzusammensetzung wurden keine nennenswerten Abweichungen festgestellt und auch die Kennwerte der übrigen Probekörperarten aus der Entnahmestelle 2 passen zu denjenigen der Entnahmestelle 1. Bei den beiden Entnahmestellen wurden zudem an der Unterseite der PA-Schicht bzw. in der darunterliegenden SAMI-Schicht hochgezogenes Bindemittel, Inhomogenitäten und Fehlstellen festgestellt. An der Entnahmestelle 2 waren diese stärker ausgeprägt. Aus diesen Gründen beträgt die Probekörperhöhe in der Stufe 0 (Ausgangszustand nach dem Schichtentrennen) ca. 36 mm. Der Unterschied in der PK-Höhe im Vergleich zur Stufe 2 beträgt daher lediglich 6 mm und erklärt somit die geringe Änderung der Raumdichten.

Die Streuungen der Ergebnisse sind, mit Ausnahme der Raumdichten und der Hohlraumgehalte der MPK bei der Entnahmestelle 1, vergleichsweise gering. Die verschiedenen Probekörperarten haben in den ersten Stufen ähnliche Ergebnisse, unterscheiden sich jedoch in der Stufe 3 bzw. 4 voneinander.

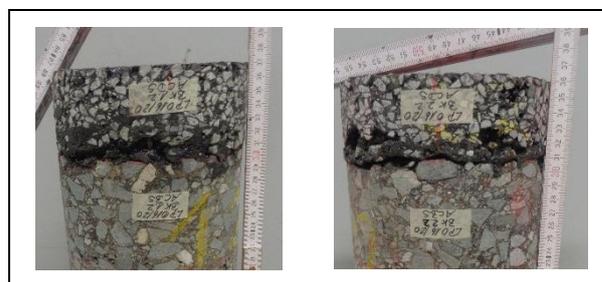


Bild 23: Ansicht der PA-Schicht des BK 1.2 der Entnahmestelle 1 (links) und des BK 2.2 der Entnahmestelle 2 (rechts) der V4

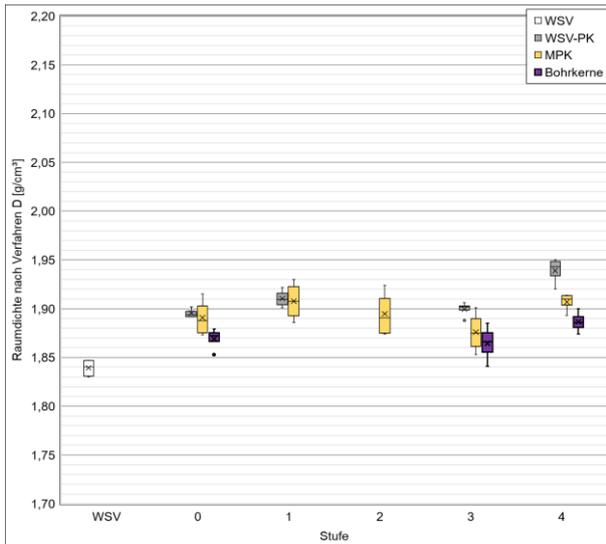


Bild 24: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 1

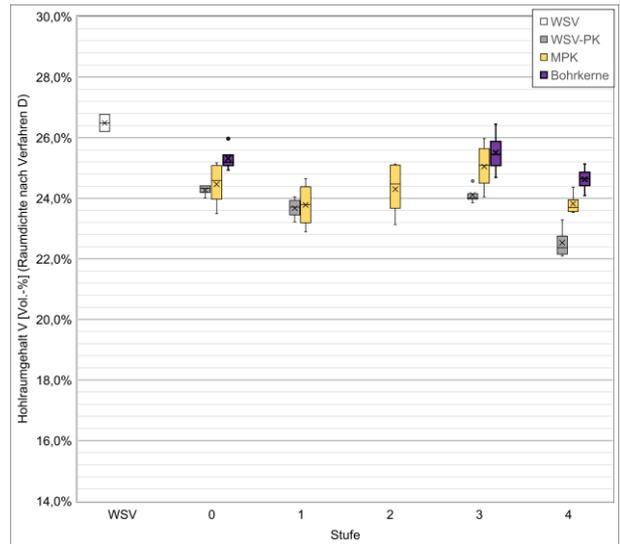


Bild 26: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 1

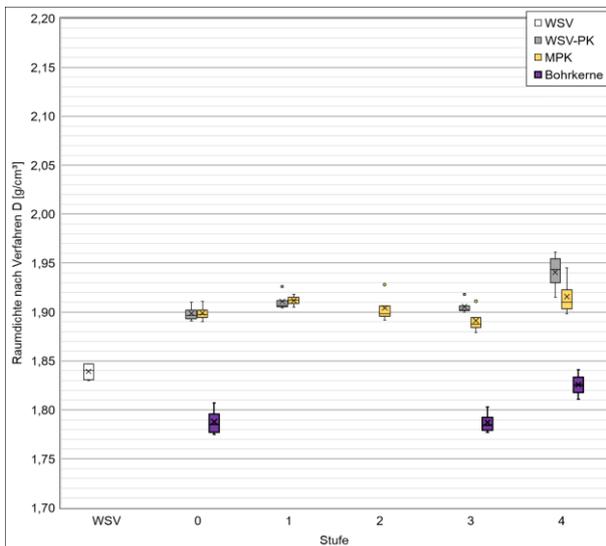


Bild 25: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 2

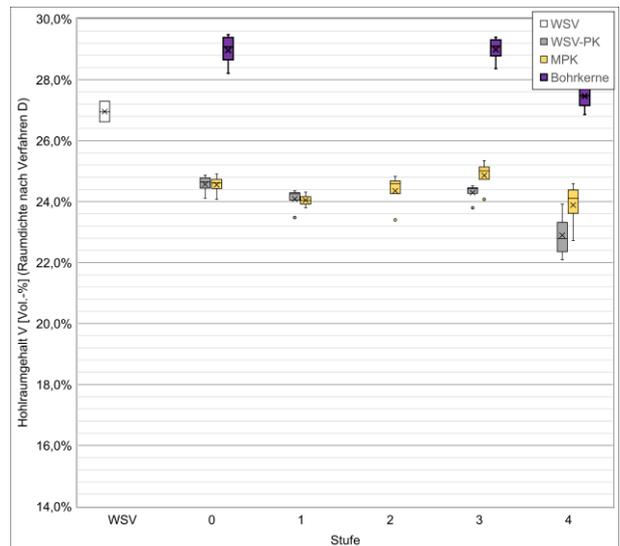


Bild 27: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 2

## Variante 5 (V5)

Die Streuungen bei den Bohrkernen der Variante V5 sind vergleichsweise groß, eine getrennte Betrachtung der Entnahmestellen bringt jedoch keine nennenswerte Verbesserung und verändert die Aussage bzw. die Reihung der Probekörper nicht. Die WSV-PK haben zunächst die niedrigste Raumdichte, in Stufe 3 sind sie dann ähnlich wie bei den MPK und in Stufe 4 werden sie höher als die der MPK.

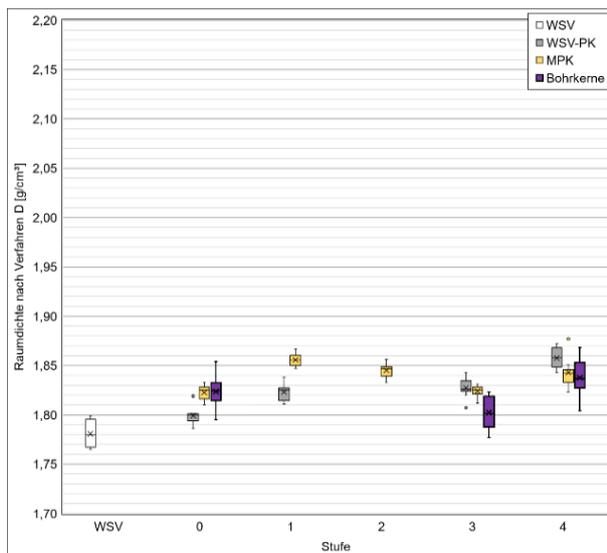


Bild 28: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V5

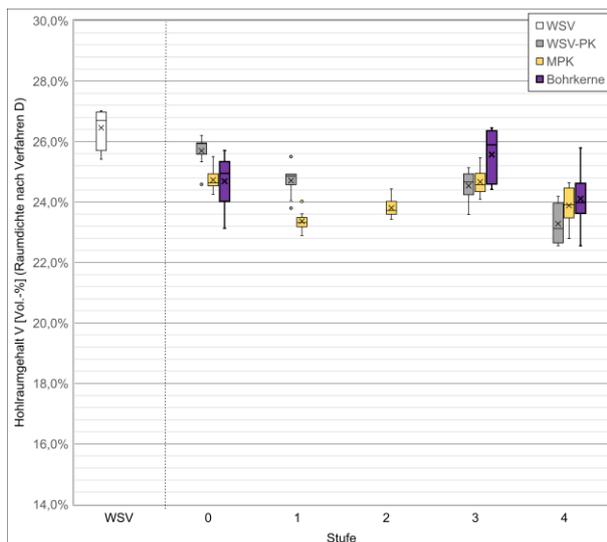


Bild 29: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V5

## Variante 6 (V6)

Die Ergebnisse (Bild 30 und Bild 31) der Variante V6 zeigen grundsätzlich keine Auffälligkeiten und bestätigen die zu Beginn des Kapitels beschriebenen allgemeinen Beobachtungen. Anzumerken ist lediglich, dass die Raumdichte der Bohrkern in Stufe 0 über denjenigen der beiden anderen Probekörperarten liegt und in den Stufen 3 und 4 diese jeweils in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

.....

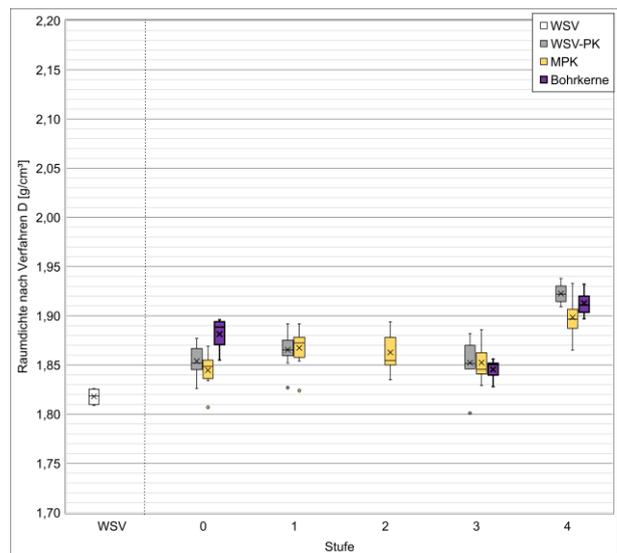


Bild 30: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V6

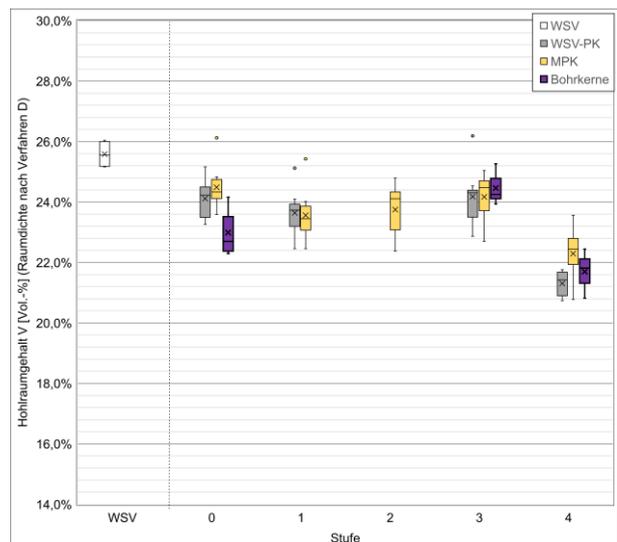


Bild 31: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V6

## 4.3 Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18

### 4.3.1 Gesamtbetrachtung der Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18

Die Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18 [3] wird in allen Stufen und an allen Probekörpern bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass die Raumdichte über einen Zeitraum von zehn Minuten nach Einlegen des vakuumierten Probekörpers im Wasserbad kontinuierlich steigt und dabei einen Endwert anstrebt. In Bild 32 ist diese Entwicklung über die Zeit in Stufe WSV für die WSV-Platten sowie in Stufe 0 für die drei Probekörperarten WSV-PK, MPK und BK jeweils für die erste (durchgezogene Linie) und für die zweite Entnahmestelle (gestrichelte Linie) der V1 dargestellt.

Für diese Entwicklung kommen zwei Ursachen in Betracht: entweder Masse- resp. Dichteschwankungen durch die Temperaturangleichung des Materials im Wasserbad, oder ein Verlust des Vakuums über die Zeit. Der zweite Fall inkludiert das Eintreten von Wasser in die Probe. Dies konnte jedoch sowohl visuell als auch durch Kontrollwägungen der Trockenmasse vor und nach dem Versuch ausgeschlossen werden. Die Veränderung der Raumdichte mit der Zeit fällt teilweise größer aus als die Veränderung zu der nächsten Stufe, was eine Festlegung des Ableszeitpunktes für weiterführende Auswertungen und Analysen unabdingbar macht. Diese Beobachtungen wurden auch bei den anderen Strecken bestätigt und führten somit zur Schlussfolgerung, dass der Wert nach 10 Minuten plausibler und robuster ist und für die weitere Betrachtung herangezogen werden sollte. Die Ergebnisse sind in Box-Plot-Diagrammen (Bild 33 bis Bild 38) dargestellt. Für die ersten beiden Varianten

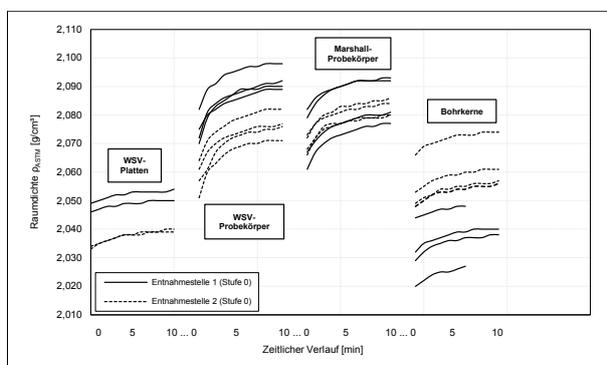


Bild 32: Zeitlicher Verlauf der Raumdichten im Wasserbad nach Vakuumabdichtung (V1), durchgezogene Linie: Probekörper der Entnahmestelle 1, gestrichelte Linie: Entnahmestelle 2

V1 und V2 sind die Raumdichten zu zwei Zeitpunkten angegeben – direkt nach dem Eintauchen (nach 0 Minuten) und nach 10 Minuten. Bei den Varianten V3 bis V6 sind nur noch die maßgeblichen Werten nach 10 Minuten abgebildet.

Die WSV-Platten (erster Box-Plot in den Diagrammen) weisen tendenziell die geringsten Raumdichten von allen Probekörperformen auf. Nur die schlecht verdichteten Bohrkern aus der Entnahmestelle 2 der V4 unterschreiten deutlich die Raumdichten der WSV-Platten. Anders als bei den Raumdichten nach Verfahren D (Kap. 4.2) kann hier nur von Stufe 3 auf Stufe 4 eine Veränderung festgestellt werden. Über die übrigen Stufen hinweg bleiben die Werte und die Streuungen nahezu unverändert. Grundsätzlich liegen die Raumdichten auf einem höheren Niveau als die Werte die mit dem Ausmessverfahren bestimmt wurden und die Streuungen sind (deutlich) kleiner. Diese Feststellungen deuten darauf hin, dass die mit dem Verfahren angestrebte Verringerung des Einflusses der Oberflächenrauheit tatsächlich erreicht wird. Die Reihung der Probekörperarten ist dabei unterschiedlich bei den einzelnen Varianten und teilweise anders als bei der Raumdichte nach Verfahren D. Variantenspezifische Ergänzungen zur Betrachtung der Raumdichte nach ASTM D6752/D6752M-18.

#### Variante 1 (V1)

In Bild 33 ist das Box-Plot-Diagramm der bestimmten Raumdichten von Variante V1 nach den ASTM, analog der Ausführungen in Kap. 4.2, dargestellt. Die Marshall- und die WSV-Probekörper haben tendenziell ähnliche Raumdichten in den jeweiligen Stufen und die Bohrkern liegen stets darunter. Ähnliche Zusammenhänge wurden auch bei den Ergebnissen des Ausmessverfahrens festgestellt (Kap. 4.2.2), jedoch mit der Ausnahme, dass in Stufe 0 die Bohrkern die höchste Raumdichte haben.

#### Variante 2 (V2)

In Bild 34 sind die Ergebnisse der mittels Vakuumverfahren bestimmen Raumdichten von der Variante V2 dargestellt. Die höchsten Raumdichten haben hier die Marshall-Probekörper gefolgt durch die WSV-Probekörper. Die Bohrkern weisen die geringsten Raumdichten auf. Diese Reihung bleibt in allen Stufen erhalten. Ähnlich sieht es auch bei den Ergebnissen des Ausmessverfahrens aus, wobei

dort die Unterschiede zwischen den Probekörperarten über die Stufen immer kleiner werden. Auch bei der Raumdichte nach den ASTM ist die Variante V2 diejenige mit den größten Streuungen innerhalb der Einzelwerte.

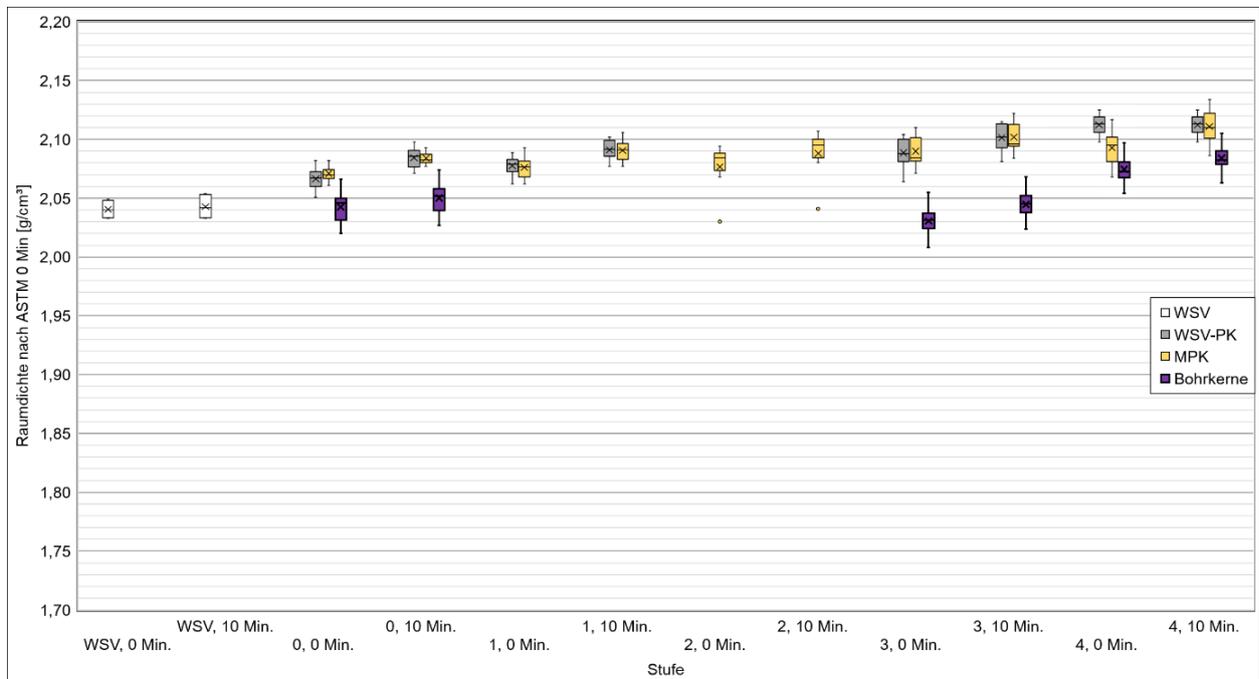


Bild 33: Box-Plot Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten und in Abhängigkeit der Dauer im Wasserbad von Variante V1

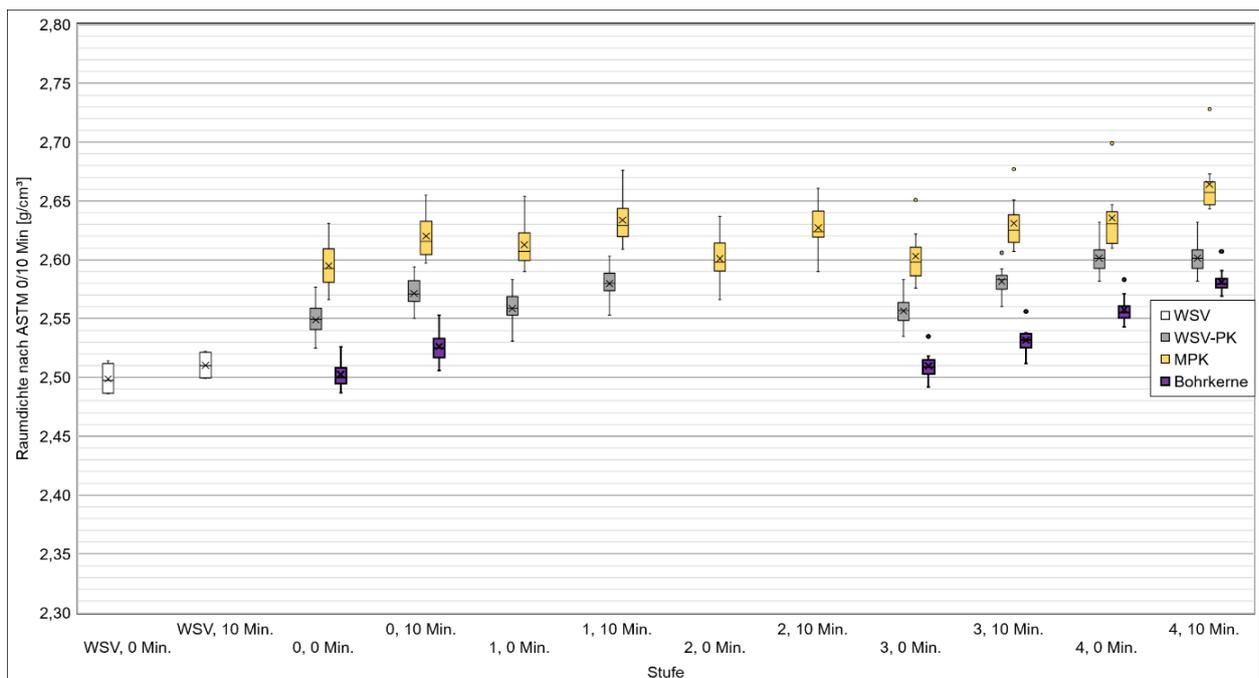


Bild 34: Box-Plot Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten und in Abhängigkeit der Dauer im Wasserbad von Variante V2

### Variante 3 (V3)

Bei der Variante V3 (Bild 35) haben die WSV-Probekörper stets die höchste Raumdichte. Danach folgt diejenige der Bohrkerne und der Marshall-Probekörper. Diese Unterschiede sind jedoch nicht so groß, so dass sich die Wertebereiche zum Teil überschneiden. So liegen in Stufe 3 die Marshall-Probekörper auf dem gleichen Niveau wie die Bohrkerne, wobei bei zuletzt genannten die Streuung deutlich kleiner ist. In allen Stufen, aber vor allem in der letzten Stufe 4, sind die Unterschiede zwischen den Probekörperarten kleiner als bei dem Ausmessverfahren.

### Variante 4 (V4)

Bei der Variante V4 (Bild 36 und Bild 37) sind die Verhältnisse zwischen den Probekörperarten eindeutig, konstant über allen Stufen hinweg und an den beiden Entnahmestellen gleich: die Marshall-Probekörper haben die höchsten Raumdichten, gefolgt durch die tendenziell niedrigeren Raumdichten der WSV-Probekörper, die zudem sehr geringen Streuungen aufweisen. Am Schluss stehen die Bohrkerne mit deutlich geringeren Raumdichten. Auch mit diesem Verfahren wird die abweichende Verdichtung der Bohrkerne der Entnahmestelle 2 bestätigt.

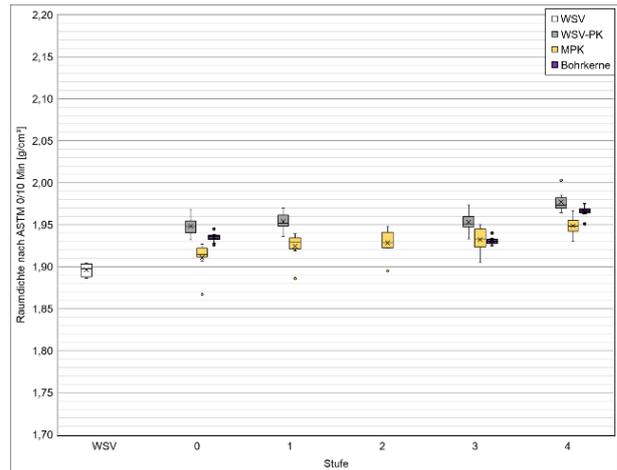


Bild 35: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V3

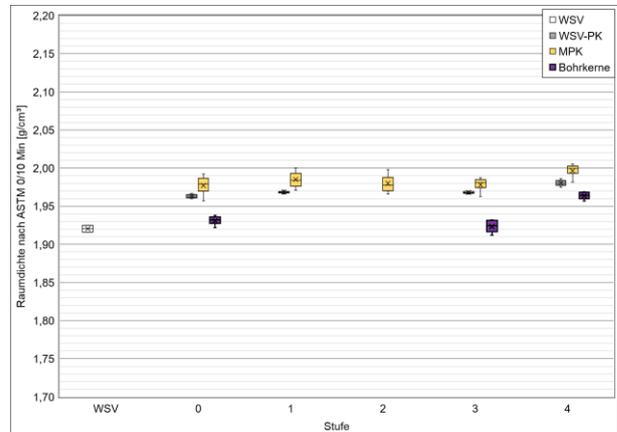


Bild 36: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V4, Entnahmestelle 1

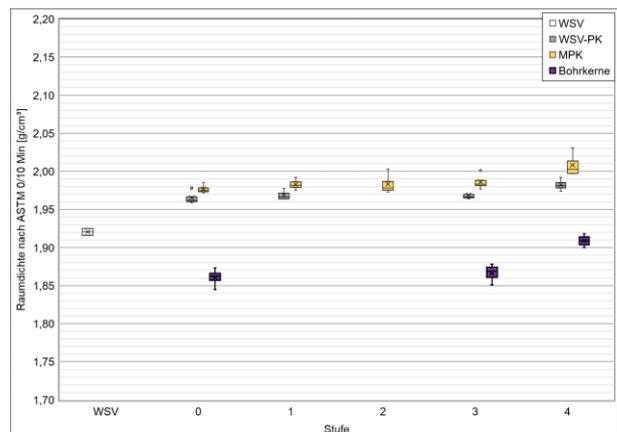


Bild 37: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V4, Entnahmestelle 2

## Variante 5 (V5)

Bei der Variante V5 haben die Marshall-Probekörper die höchsten Raumdichten und die WSV-Probekörper sind ähnlich wie die Bohrkern. Damit unterscheiden sich auch hier die Zusammenhänge zu denjenigen des Ausmessverfahrens.

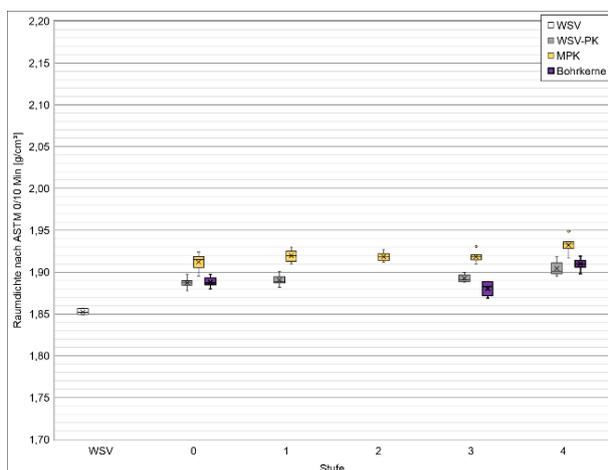


Bild 38: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V5

## Variante 6 (V6)

Gleiche Zusammenhänge sind auch bei der Variante V6 zu beobachten. Die Raumdichten ändern sich zwischen Stufe 0 und 3 kaum. Die Box-Plots überschneiden sich vor allem bei den Marshall-Probekörpern permanent, sodass kein signifikanter Unterschied festzustellen ist. Auch die WSV-Probekörper verhalten sich ähnlich. Die Raumdichten der Bohrkern sind tendenziell niedriger. Alle Raumdichten steigen in Stufe 4 an, jedoch deutlich weniger ausgeprägt als bei dem Ausmessverfahren.

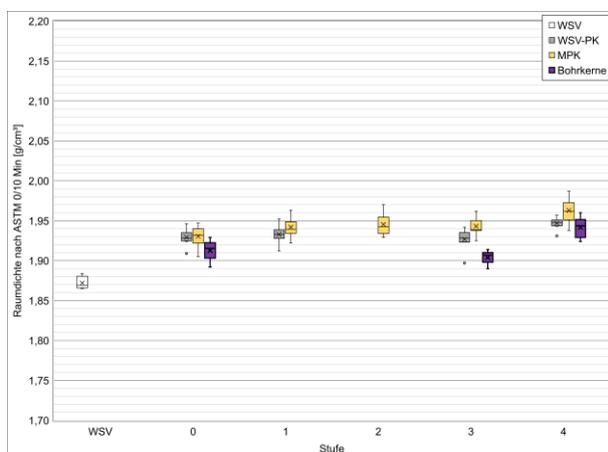


Bild 39: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V6

## 4.4 Prüfung der vertikalen Wasserdurchlässigkeit

### 4.4.1 Gesamtbetrachtung der vertikalen Wasserdurchlässigkeit

Im Rahmen eines abgeschlossenen Forschungsprojekts [13] wurde festgestellt, dass die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit nach den TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] (in vertikaler und horizontaler Richtung) mit drei Wiederholungen ausreichend erscheint, da die Einzelwerte an einem Probekörper entsprechend gut korrespondieren. Dies gilt jedoch nicht für Messungen an unterschiedlichen Probekörpern. Im Zuge von eigenen Voruntersuchungen konnte bestätigt werden, dass die Streuung der Einzelwerte der Versuchsdurchgänge an einem Probekörper deutlich kleiner als die Standardabweichung der Mittelwerte aus den Ergebnissen der einzeln untersuchten Probekörper war. Für die Beprobung der Untersuchungsstrecken werden vier Versuchsdurchgänge pro Probekörper und Versuchstyp durchgeführt und damit doppelt so viele wie in der TP Asphalt-StB vorgesehen. Die Wasserdurchlässigkeiten wurden bei V1 in Stufe 0 (Ausgangszustand) und Stufe 4 (ca. 20 mm, allseitig glatt) bestimmt. Bei allen anderen Varianten wurden die Versuche in der Stufe 0 und in der Stufe 3 (ca. 30 mm) anstatt in Stufe 4 durchgeführt.

In Bild 40 bis Bild 48 sind die vertikalen Wasserdurchlässigkeiten der Varianten V1 bis V6 als Box-Plot-Diagramme, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart, dargestellt. Je Box (Stufe WSV ausgenommen) liegen die Ergebnisse aus acht Probekörpern, die jeweils vier Mal geprüft wurden, zugrunde. Für die Stufe WSV wurden insgesamt vier Asphalt-Probeplatten untersucht. Wenn die Betrachtung getrennt nach Entnahmestellen erfolgt, so ist die Anzahl der Probekörper entsprechend auf die Hälfte reduziert. Die Ergebnisse der einzelnen Probekörper sind in Anhang II.4 in Form von Balkendiagrammen enthalten. Durch die Stufe WSV sollte die Versuchsdurchführung mit einer möglichst großen Probekörperfläche zu repräsentativeren Ergebnissen führen. Dadurch hat sich jedoch ein sehr hoher Wasserdurchfluss ergeben, so dass die Wassersäule von 300 mm nicht erreicht werden konnte. Deshalb gibt es an dieser Stelle auch keine Werte im Diagramm. Die Versuche konnten nur mit einem variablen Wasserspiegel durchgeführt werden. Dabei ergaben sich ebenfalls sehr hohe Durchlässigkeiten, die im Diagramm

durch die weiße Box zu erkennen sind. Bei den ersten drei Varianten wurden die Versuche mit variabler Wasserhöhe zum Vergleich auch an den übrigen Probekörperarten durchgeführt. Die Werte sind dabei tendenziell niedriger. Dies erscheint plausibel, da durch diese Versuchsanpassung der Druck kleiner wird. Weitere zielführende Erkenntnisse konnten durch diesen erhöhten Prüfaufwand nicht erbracht werden, so dass für die weitere Bearbeitung der Varianten V4 bis V6 die Versuchsanordnung mit variabler Wasserhöhe nur noch bei den WSV-Platten durchgeführt wurde.

Grundsätzlich nehmen die vertikalen Durchlässigkeiten von Stufe 0 zu Stufe 4 (bei V1) bzw. Stufe 3 (bei V2) ab. Hiervon gibt es jedoch Ausnahmen und auch die Reihung der Probekörperarten ist unterschiedlich (Kap. 4.4.2).

#### 4.4.2 Variantenspezifische Ergänzungen zur Betrachtung der vertikalen Wasserdurchlässigkeit

##### Variante 1 (V1)

In Bild 40 ist die vertikale Wasserdurchlässigkeit der Variante V1 als Box-Plot-Diagramm dargestellt. Für die WSV-Platten ergeben sich sehr hohe Durchlässigkeiten, die im Diagramm durch die weiße Box zu erkennen sind. Die nächsthöheren Wasserdurchlässigkeiten sind diejenigen von den MPK, danach kommen diejenigen von den WSV-PK und die niedrigsten Werte wurden bei den Bohrkernen ermittelt. Hier steigt tendenziell die Durchlässigkeit von Stufe 0 (direkt nach der Schichttrennung) zu Stufe 4 (allseitig glatt) leicht an. Betrachtet man die einzelnen Probekörper in Anlage I, so ist die Streuung in Stufe 0 innerhalb der 1. Entnahmestelle größer als innerhalb der 2. Entnahmestelle. Eine mögliche Erklärung liefert die Beobachtung, dass nach dem Sägen der Unterlage das Bindemittel unterschiedlich stark in den Hohlräumen gezogen wurde und diese dadurch teilweise nicht mehr frei zugänglich waren.

Der Probekörper MPK 2-4 wies bei dem Verfahren mit veränderlichem Wasserspiegel im Vergleich zu den anderen MPK der Entnahmestelle und dem Verfahren nach TP eine auffällig hohe Wasserdurchlässigkeit auf und wurde als Ausreißer identifiziert. Aus diesem Grund wurde der Mittelwert bei den Auswertungen im Box-Plot Diagramm nicht berücksichtigt.

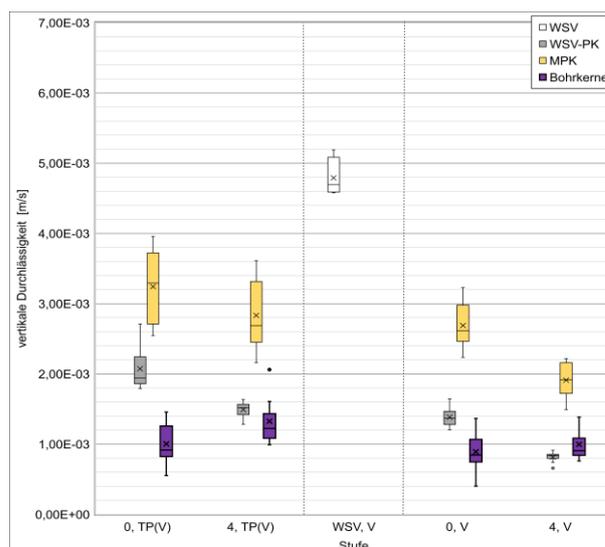


Bild 40: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V1

##### Variante 2 (V2)

In Bild 41 sind die Ergebnisse der vertikalen Wasserdurchlässigkeit der Variante V2 dargestellt. Im Vergleich zu Variante V1 fällt auf, dass die WSV-Platten im Ausgangszustand eine geringere Wasserdurchlässigkeit aufweisen als alle anderen Probekörperarten. Auffällig ist auch die große Streuung der Ergebnisse, die um einiges größer ausfällt als bei Variante V1 und im Vergleich zu den ebenfalls größeren Streuungen bei den anderen Prüfverfahren. Wenn die Entnahmestellen einzeln betrachtet werden, so werden die Streuungen kleiner (Bild 42 und Bild 43). Hierbei ist insbesondere bei den MPK und den Bohrkernen ein größerer Unterschied festzustellen, wobei die Durchlässigkeiten bei Entnahmestelle 2 tendenziell größer sind als diejenigen bei Entnahmestelle 1.

Auffällig ist außerdem, dass die WSV-Probekörper in Stufe 0 zunächst eine höhere Wasserdurchlässigkeit in vertikaler Richtung als die Bohrkern aufzeigen, aber in Stufe 4 unterhalb der Bohrkern liegen.

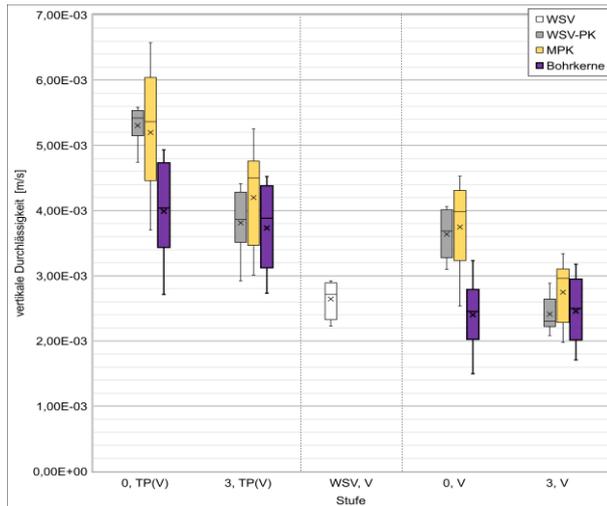


Bild 41: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für V2

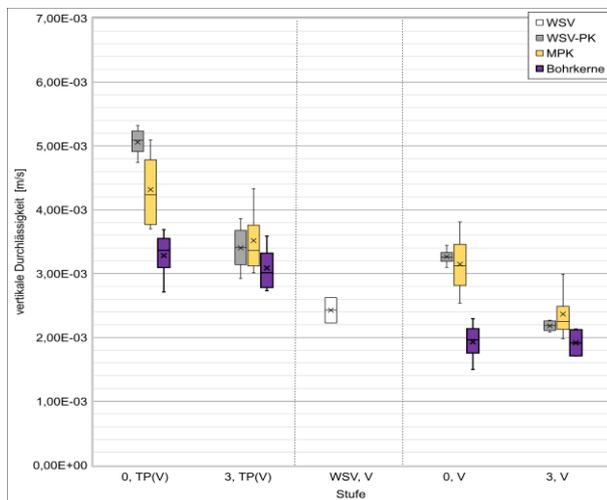


Bild 42: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für V2 an der Entnahmestelle 1 (1-1 bis 1-4)

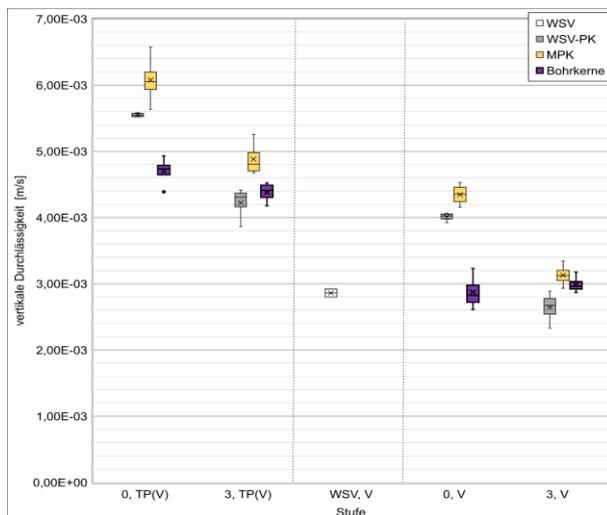


Bild 43: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für V2 an der Entnahmestelle 2 (2-1 bis 2-4)

### Variante 3 (V3)

Die Ergebnisse der Variante V3 sind in Bild 44 dargestellt. Die Reihung der Probekörperarten passt in etwa zu den Ergebnissen des Ausmessverfahrens (Kap. 4.2.2). Die MPKs haben hierbei die größte Durchlässigkeit und in Stufe 3 sind die WSV-PK und die Bohrkerne ähnlich.

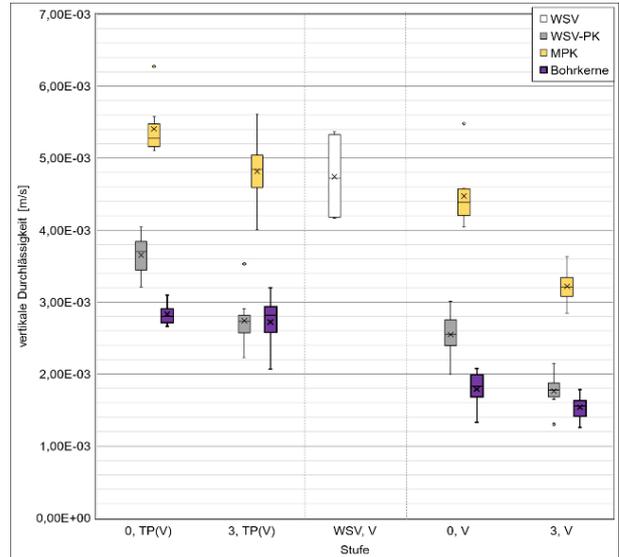


Bild 44: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V3

### Variante 4 (V4)

Bei der Variante V4 werden auch hier die beiden Entnahmestellen getrennt betrachtet. Auffällig ist jedoch, dass sich die Durchlässigkeiten der verschiedenen Probekörperarten, im Vergleich zu den Ergebnissen bei den anderen Varianten, nicht so deutlich voneinander unterscheiden. Die eindeutig niedrigere Raumdicke der Bohrkerne und im speziellen derjenigen aus der Entnahmestelle 2 kommen hier nicht zum Vorschein – die Box-Plots liegen auf einem ähnlichen Niveau. Auch die Absolutwerte der Durchlässigkeit liegen nicht (deutlich) höher als diejenigen der anderen Varianten und deuten somit nicht auf hohlraumreichere Probekörper hin.

### Variante 5 (V5)

Bei der Variante V5 (Bild 47) ändert sich die Reihenfolge der vertikalen Durchlässigkeit der Probekörperarten von Stufe 0 zu Stufe 3. Bei den Bohrkerne bleibt diese unverändert, lediglich die Streuung wird größer. Die WSV-Platten haben dabei die geringste Durchlässigkeit.

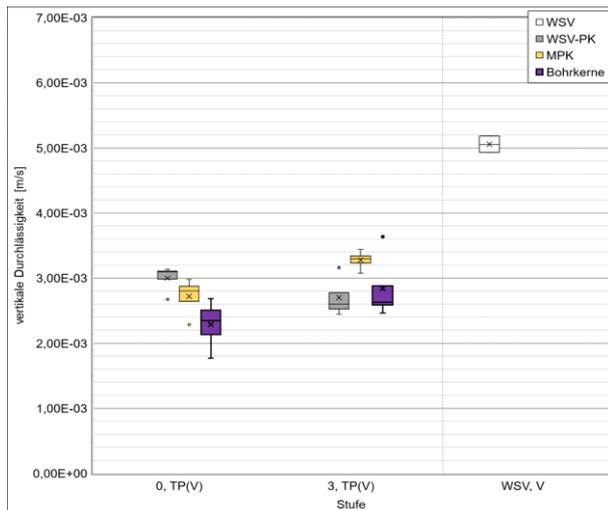


Bild 45: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V4 an der Entnahmestelle 1 (1-1 bis 1-4)

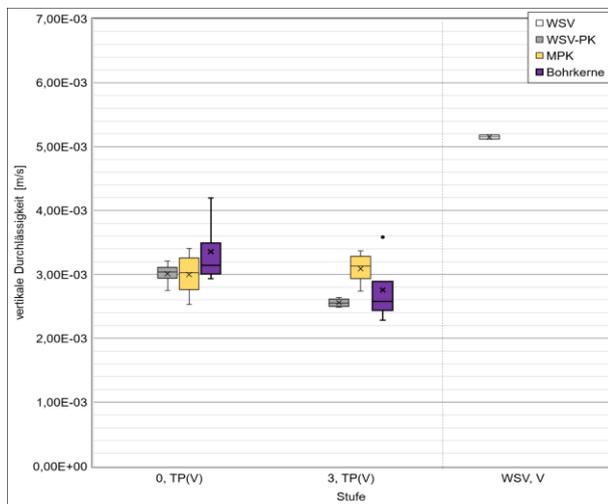


Bild 46: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V2 an der Entnahmestelle 4 (2-1 bis 2-4)

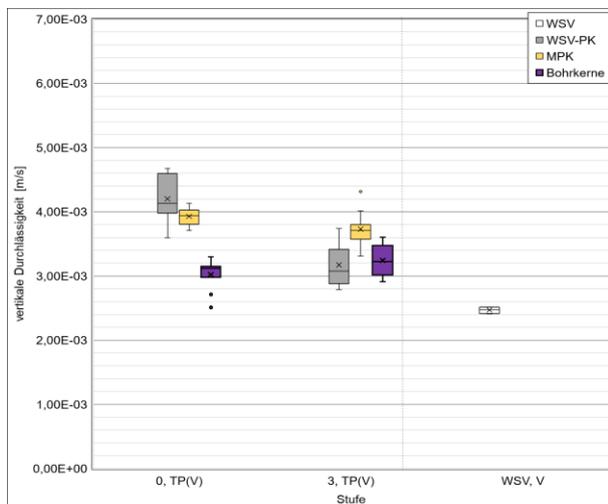


Bild 47: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V5

## Variante 6 (V6)

Die ermittelten Durchlässigkeitswerte der Probekörper von Variante V6 ändern sich mit Ausnahme der WSV-Probekörper von Stufe 0 zu Stufe 3 nur geringfügig. Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich der Messbereich der Durchlässigkeitswerte in vertikaler Richtung überschneidet. Anders als bei den Ergebnissen der Raumdichtenmessungen mit dem Verfahren D und mit dem nach ASTM (Kap. 4.2.2 und 0), die vergleichbare Werte für die einzelnen Probekörperarten lieferten, ist hier eine Reihung zu erkennen: die MPK zeigen dabei stets die höchste Durchlässigkeit mit der größten Streuung und die WSV-PK liegen in Stufe 0 direkt daneben, streuen jedoch deutlich weniger. Die Durchlässigkeiten der WSV-Asphaltprobekörper sind davon abgekoppelt zu betrachten und liegen auf einem deutlich höheren Niveau als die WSV-Probekörper.

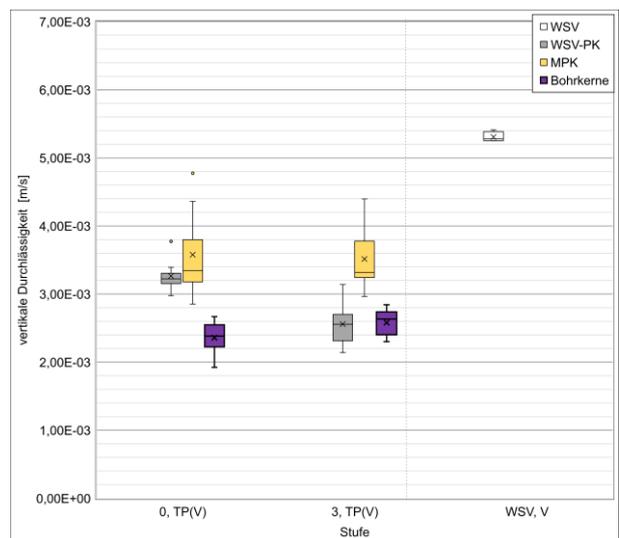


Bild 48: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V6

## 4.5 Prüfung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit

### 4.5.1 Gesamtbetrachtung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit

Die allgemeinen Angaben in Kap 4.4.1 über die Anzahl der Versuchsdurchläufe sowie die geprüften Stufen gelten auch für die horizontale Durchlässigkeit.

In Bild 49 bis Bild 54 ist die horizontale Wasserdurchlässigkeit, analog zu den Darstellungen in den

vorherigen Kapiteln, als Box-Plot-Diagramme sortiert nach Versuchsaufbau (TP(H)) mit konstantem oder H mit variablem Wasserspiegel), Stufe und Probekörperart abgebildet. Je Box, Stufe WSV ausgenommen, liegen die Ergebnisse aus acht Probekörpern (vier pro Entnahmestelle), die jeweils vier Mal geprüft wurden, zugrunde. Für die Stufe WSV wurden insgesamt vier Asphalt-Probepplatten (jeweils zwei pro Entnahmestelle) untersucht. Wenn die Betrachtung getrennt nach Entnahmestellen erfolgt, so ist die Anzahl der Probekörper entsprechend auf die Hälfte reduziert. Bei der Durchführung mit konstantem Wasserspiegel wurden bei den ersten drei Varianten drei verschiedene Versuchsaufbauten respektive Abdichtungsvarianten (TP(H1) bis TP(H3)) unterschieden, welche sich auch in den Ergebnissen widerspiegeln (Kap. 3.4.3). Nach Auswertung der Ergebnisse, Abwägung des Aufwandes und die Handhabbarkeit bei der Durchführung wurde im Betreuerausschuss daraus eine Variante (TP(H1)) für die restlichen V4 bis V6 gewählt. Die Vorgehensweise mit dem veränderlichen Wasserspiegel, die entgegen der Erwartungen im Allgemeinen zu den größten horizontalen Durchlässigkeiten geführt hat, wird nur noch zur Bestimmung der Durchlässigkeit der WSV-Probepplatten verwendet, da dies die einzige Möglichkeit ist Wasserdurchlässigkeit an den Platten zu bestimmen.

Die Ergebnisse der einzelnen Probekörper sind in Anhang II. 3 und II. 4 in Form von Balkendiagrammen enthalten. Wie auch schon bei den anderen Prüfverfahren ist auch hier die Reihung der Probekörperarten variantenspezifisch. Grundsätzlich gilt jedoch, dass von Stufe 0 zu Stufe 4 resp. Stufe 3 die Durchlässigkeit abnimmt. Einzelheiten zu den Varianten sind im folgenden Kap. 4.5.2 nachzulesen.

#### 4.5.2 Variantenspezifische Ergänzungen zur Betrachtung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit

##### Variante 1 (V1)

Bei dem konstanten Wasserspiegel wurden mit dem Aufbau nach TP(H2) die höchsten Wasserdurchlässigkeiten in den jeweiligen Stufen ermittelt. Dabei ist die Reihung der Probekörperarten immer gleich: die höchsten Werte werden bei den MPKs ermittelt, danach kommen die Bohrkerne und anschließend die WSV-PK.

Die Durchlässigkeit der WSV-Platten streut insgesamt wenig und ist höher als diejenige der WSV-Probekörper bei den Abdichtungsformen TP(H2) und TP(H3).

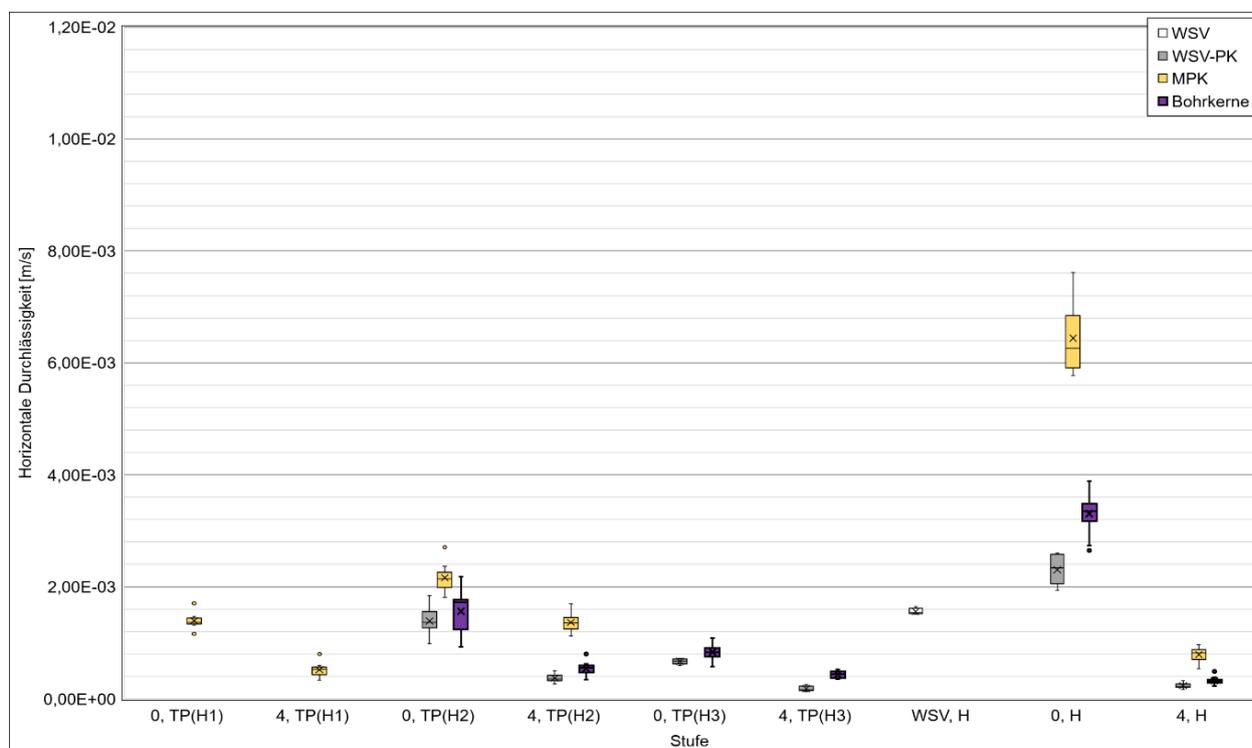


Bild 49: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V1

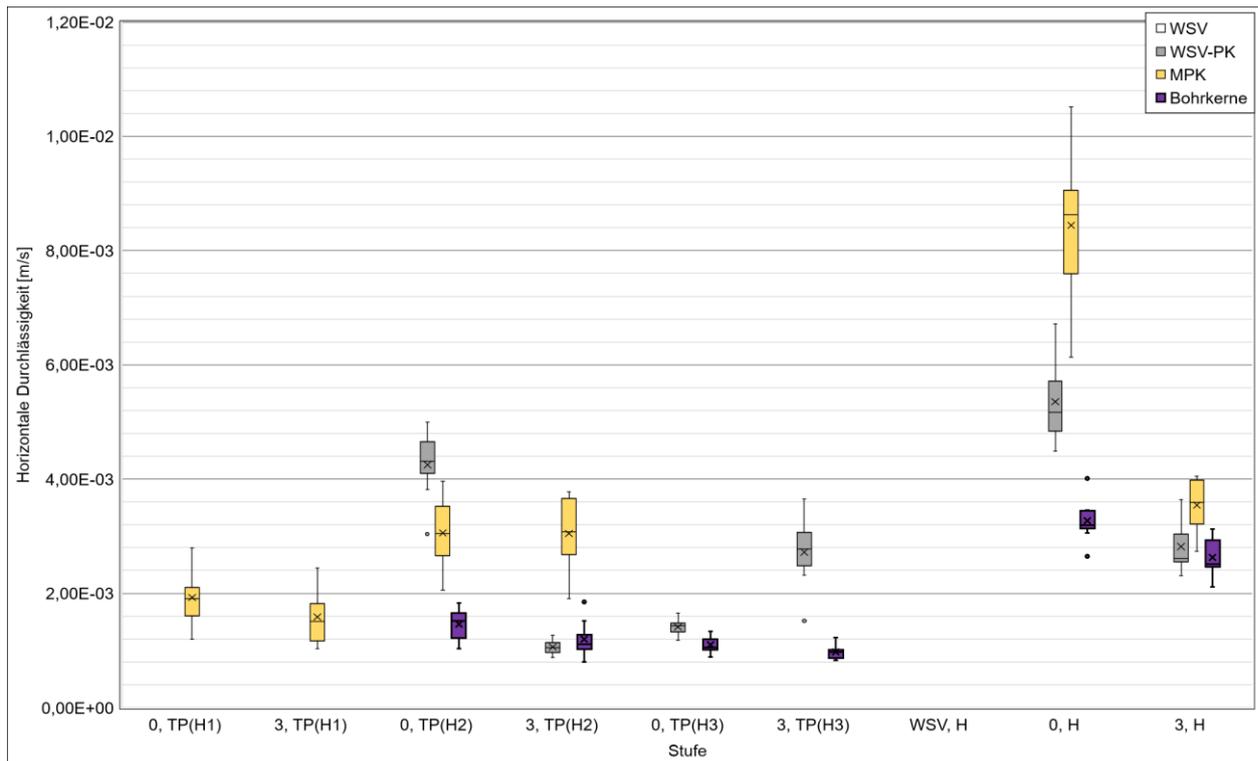


Bild 50: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V2

## Variante 2 (V2)

In Bild 50 sind die Ergebnisse zur horizontalen Durchlässigkeit an Variante V2 abgebildet. Ähnlich der vertikalen Durchlässigkeit ist zu erkennen, dass die Streubreite bei Variante V2 deutlich größer ist. Ansonsten kann festgestellt werden, dass die Durchlässigkeit der MPKs sowie der Bohrkerne bei den Ausführungen TP(H1) und TP(H2) sich von der Stufe 0 zu Stufe 3 nicht signifikant voneinander unterscheiden. Diese Tendenzen sind dann plausibel, wenn die Hohlraumstruktur homogen über die Probekörperhöhe verteilt ist und damit auch nach Reduzierung der Probekörperhöhe das Wasser unverändert seitlich ausströmen kann. Bei den WSV-Probekörpern ist bei Abdichtung TP(H2) ein deutlicher Unterschied zwischen Stufe 0 und Stufe 3 zu erkennen. Da sich von Stufe 0 zu Stufe 3 lediglich die Höhe der WSV-Probekörper reduziert, müssen die nach außen zugänglichen Hohlräumen ungleichmäßig über den Probekörper verteilt gewesen sein. Die horizontale Durchlässigkeit der WSV-Platten konnte nicht bestimmt werden, weil der Wasserspiegel mit Vakuum nicht erreicht werden konnte.

## Variante 3 (V3)

Die Zusammenhänge bei der Variante V3 stellen sich ähnlich dar wie bei V2. Einzige Ausnahme stellt hier die Tatsache dar, dass die Marshall-Probekörper und nicht die WSV-Probekörper die höchsten Durchlässigkeiten aufweisen.

## Variante 4 (V4)

Bei der Variante V4 werden die Entnahmestellen getrennt betrachtet (Bild 52 und Bild 53). Dabei fällt auf, dass die Streuungen sehr gering sind und die Durchlässigkeiten der Marshall-Probekörper und diejenigen der Bohrkerne bei der Entnahmestelle 1 in den beiden Stufen ähnlich sind, wobei die Marshall-Probekörper die niedrigsten Werte aufweisen. Bei der Entnahmestelle 2 haben die Bohrkerne die höchsten Durchlässigkeiten, die auch im Vergleich zu den Bohrkerne aus der Entnahmestelle 1 höher liegen und zu den niedrigen Raumdichten passen. Die WSV-Platten haben ebenfalls sehr geringe Streuungen.

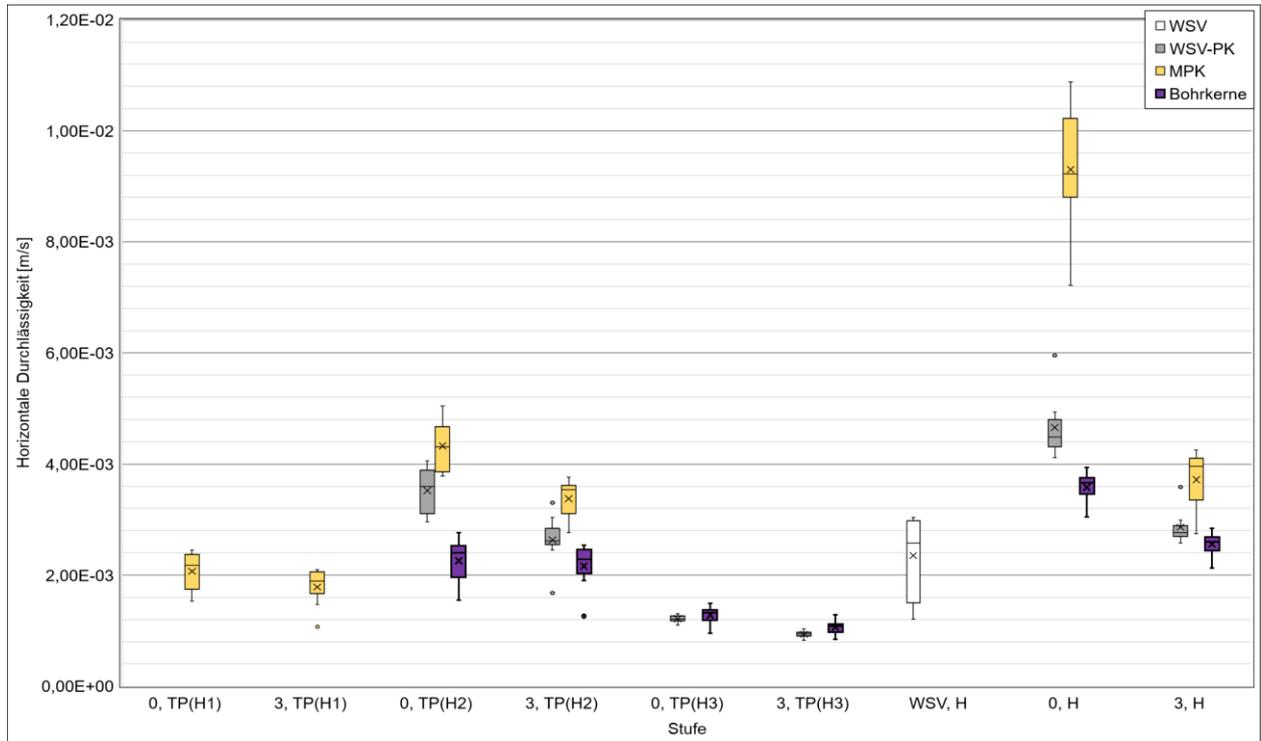


Bild 51: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V3

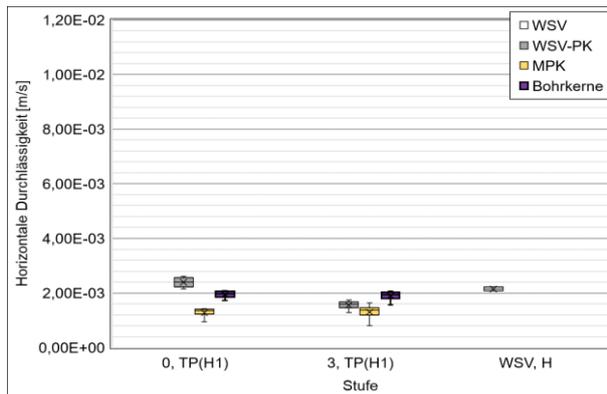


Bild 52: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V4, Entnahmestelle 1

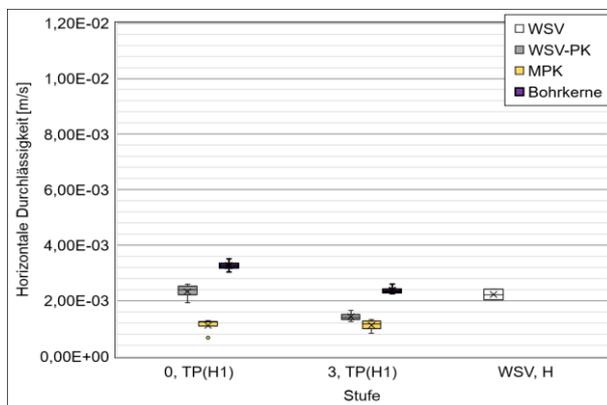


Bild 53: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V4, Entnahmestelle 2

### Variante 5 (V5)

Ähnlich wie bei der Variante V4 sind bei V5 die Streuungen bei den Marshall-Probekörpern und bei den WSV-Probekörpern sehr gering. Die Durchlässigkeit der Marshall-Probekörper und der Bohrkerne ändert sich zudem kaum von Stufe 0 zu Stufe 3 und bei den WSV-Probekörper nimmt sie etwas ab. Die Durchlässigkeit der WSV-Platten ist vergleichsweise hoch.

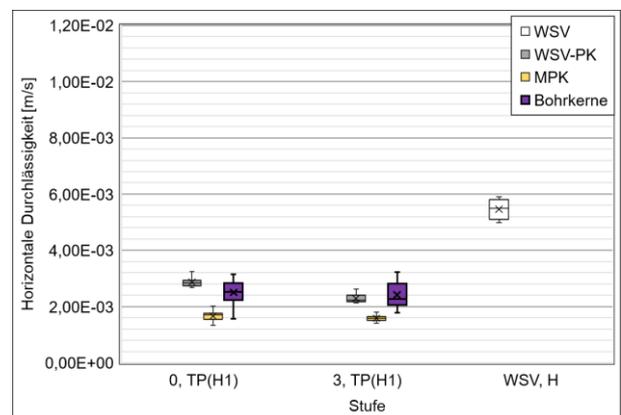


Bild 54: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V5

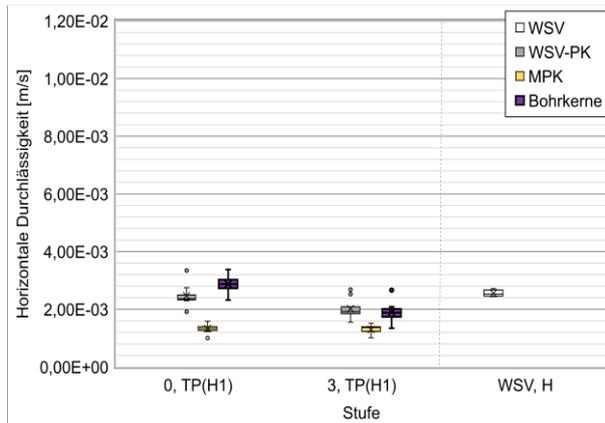


Bild 55: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V6

### Variante 6 (V6)

Die horizontalen Durchlässigkeiten der Variante V6 sind in Bild 55 dargestellt. Die MPK haben wie bei Variante V4 und V5 die kleinste Durchlässigkeit in horizontaler Richtung und damit ergeben sich andere Verhältnisse als in vertikaler Richtung. Von Stufe 0 zu Stufe 3 ist hier keine Veränderung feststellbar.

Die Reihung zwischen Bohrkerne und WSV-Probekörpern unterscheidet sich bei den Varianten V4 bis V6, wobei die bestimmten Werte der Durchlässigkeit eng beieinanderliegen. Tendenziell ist bei den WSV-Probekörpern und den Bohrkerne ein ähnliches Verhalten zu erkennen, was prinzipiell plausibel erscheint, da der Asphalt in beiden Fällen durch Walzverdichtung verdichtet wurde und somit die Hohlraumstruktur beeinflusst.

Die horizontalen Durchlässigkeiten liegen bei den Varianten V4, V5 und V6 grundsätzlich auf einem ähnlichen Niveau. Wird die Durchlässigkeit von Stufe 0 zu Stufe 3 verglichen ist zu erkennen, dass sich diese horizontal in Abhängigkeit der Stufe kaum verändert.

## 4.6 Ergebnisse der Raumdichte mittels Laserabtastungsverfahren (3D-Scan)

Bei den Versuchsstrecken V4, V5 und V6 wurden in Stufe 0 und Stufe 3 Untersuchungen mit dem HandyScan-Gerät durchgeführt. Es wurden jeweils zwei Probekörper je Probekörperart (jeweils einer pro Entnahmestelle) gescannt. In Bild 56 ist beispielhaft

das digitale Modell von einem Marshall-Probekörper dargestellt. Die Oberflächenstruktur wird sehr gut abgebildet, so dass die Grundlage für eine sehr genaue Volumenberechnung gegeben ist. Die Raumdichten lassen sich anschließend aus dem Verhältnis des Trockengewichts und dem digital bestimmten Volumen ableiten. Die Scans und die Modellerstellung wurden komplett durch das Institut für Produktentwicklung (IPEK) am KIT durchgeführt und sind in Kap. 2.5 beschrieben.

Die Ergebnisse sind in Bild 57, Bild 58 und Bild 59 für die drei Strecken getrennt dargestellt. Dabei werden ganz unterschiedliche Tendenzen ermittelt. Die Probekörperart scheint zunächst keinen Einfluss auf zu- und abnehmende, bzw. gleichbleibende Raumdichten zu haben. Aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs können diese nicht statistisch aufbereitet, sondern nur einzeln und im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Prüfverfahren betrachtet werden. In Kap. 5.1 werden die Zusammenhänge und mögliche Korrelationen untersucht.

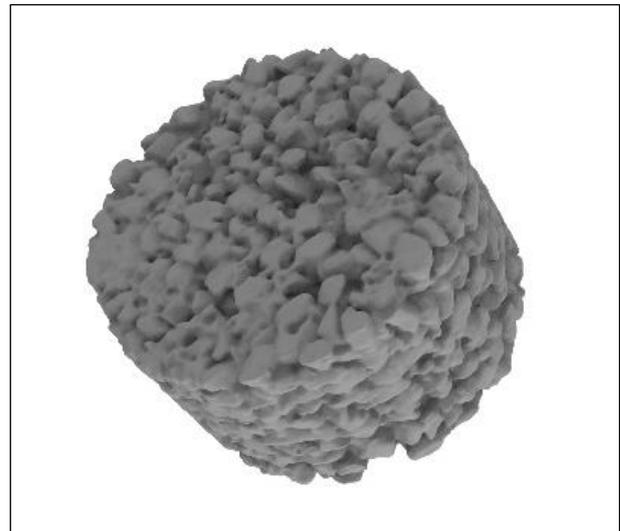


Bild 56: Darstellung des 3D-Modells eines MPK in Stufe 0

## 5 Auswertung und Evaluation der Ergebnisse

Aus den unterschiedlichen Verfahren werden Kenngrößen zur Beschreibung des Hohlraumgehaltes bzw. des Verdichtungszustandes ermittelt und ingenieurmäßig aufbereitet. Die auftretenden Streuungen werden statistisch erfasst und diskutiert. Ein wichtiger Punkt in der Auswertung und Analyse der Ergebnisse ist zu differenzieren, was die Unterschiede in den Kennwerten begründet. Das Versuchsprogramm wurde so aufgestellt, dass die drei maßgeblichen Einflüsse, nämlich aus den verschiedenen Verdichtungsmethoden (WSV, MPK, in situ), aus der Oberflächenbeschaffenheit (rau oder glatt) sowie aus der Probekörperhöhe weitestgehend getrennt betrachtet werden können.

### 5.1 Vergleich der Verfahren zur Raumdichtebestimmung

In Kap 4.2 und 4.3 wurden die Ergebnisse der beiden Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte (das Verfahren D mit Ausmessen und das Verfahren nach den ASTM mit Vakuum) anhand von Box-Plot-Diagrammen getrennt dargestellt und erste Hinweise über qualitative Zusammenhänge gegeben. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse direkt miteinander verglichen und auf einfache lineare Korrelationen überprüft. Zusätzlich werden zur Plausibilitätskontrolle die Ergebnisse des HandyScans hinzugezogen.

In Bild 60 sind beispielhaft für die Marshall-Probekörper der Variante V2 die Zusammenhänge grafisch zwischen den Raumdichten nach Verfahren D und denjenigen nach den ASTM dargestellt. Die einzelnen Stufen 0 bis 4 sind dabei farblich gekennzeichnet. Die nach den ASTM ermittelten Raumdichten sind im Allgemeinen größer, da die Oberflächenhölräume aus der Volumenberechnung ausgeschlossen werden. Deshalb liegen die Punkte in der rechten Diagrammhälfte (unter der Winkelhalbierenden). Diese Beobachtung trifft auch auf die anderen Probekörperarten zu. Es ist zu erkennen, dass ein guter Zusammenhang zwischen den beiden Verfahren besteht. Über das angegebene Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) kann die Güte der linearen Beziehung auch quantitativ beurteilt werden. Der Probekörper MPK 1.1 hat in den Stufen 1 bis 4 zwar eine teilweise deutlich höhere Raumdichte als die anderen sieben Probekörper, liegt aber dennoch

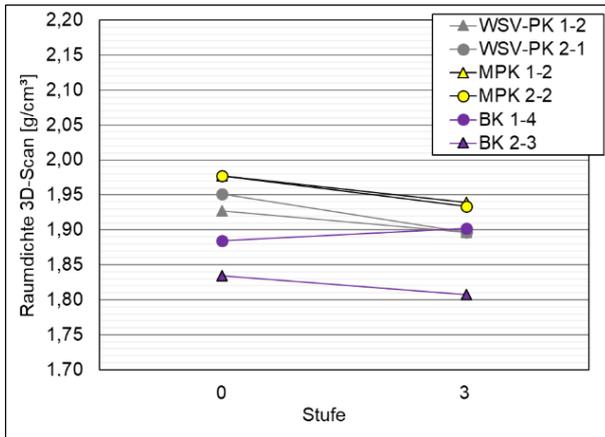


Bild 57: Raumdichte an ausgewählten Probekörpern der Variante V4 bestimmt auf der Grundlage von 3D-Scans

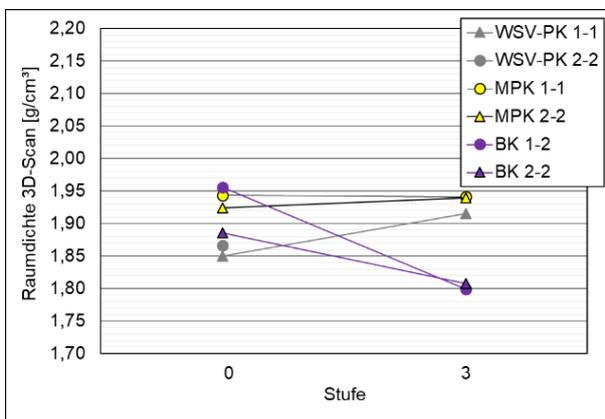


Bild 58: Raumdichte an ausgewählten Probekörpern der Variante V5 bestimmt auf der Grundlage von 3D-Scans

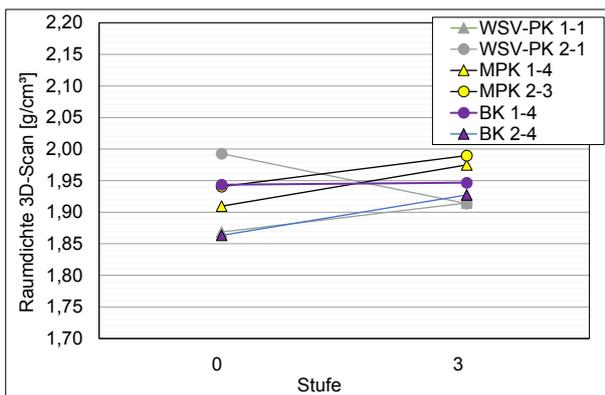


Bild 59: Raumdichte an ausgewählten Probekörpern der Variante V6 bestimmt auf der Grundlage von 3D-Scans

prinzipiell noch auf der Regressionsgeraden. Dadurch wirkt er im Diagramm als Hebelwert und beeinflusst die Vorhersage stark. Er ist in den Box-Plot-Diagrammen (Bild 19 und Bild 34) bereits als Ausreißer identifiziert und wird hier entsprechend von der Betrachtung ausgeschlossen. Die Werte sind im Diagramm als leere Punkte dargestellt und besonders gekennzeichnet. Aufgrund der Zahlenwerte kann geschlussfolgert werden, dass der Probekörper tatsächlich deutlich dichter als die anderen Probekörper ist und dass es für die beiden Verfahren spricht, dass er ähnlich bewertet und erkannt wird. Der lineare Zusammenhang ist in Stufe 4 dadurch am schwächsten und in Stufe 3 am stärksten ausgeprägt ( $R^2 = 26,2\%$  vs.  $R^2 = 96,4\%$ ).

Analog dazu werden die Ergebnisse der anderen Probekörperarten und Strecken behandelt. Eine Zusammenfassung der dabei ermittelten Bestimmtheitsmaße ist in Tabelle 5 bis Tabelle 7 jeweils nach Probekörperarten aufgeteilt gegeben. Mit Stern (\*) sind Werte gekennzeichnet, die unter Ausschluss von Ausreißern ermittelt wurden. Bis auf zwei Fälle handelt es sich dabei stets um Hebelwerte wie im Beispiel von V2 beschrieben. Die zwei Ausnahmen treten bei einem Marshall-Probekörper von V5, Stufe 3 und bei einem WSV-Probekörper von V1, Stufe 4 auf. Hierbei handelt es sich um Werte mit hohen Residuen und entsprechend mit hoher Diskrepanz.

Die ermittelten Bestimmtheitsmaße zeigen, dass die Korrelationen bei den Marshall-Probekörpern (Tabelle 5) und bei den WSV-Probekörpern (Tabelle 6) grundsätzlich besser sind als diejenigen bei den Bohrkernen (Tabelle 7). Dies erscheint plausibel, da bei den Probekörpern im Labor eine repro-

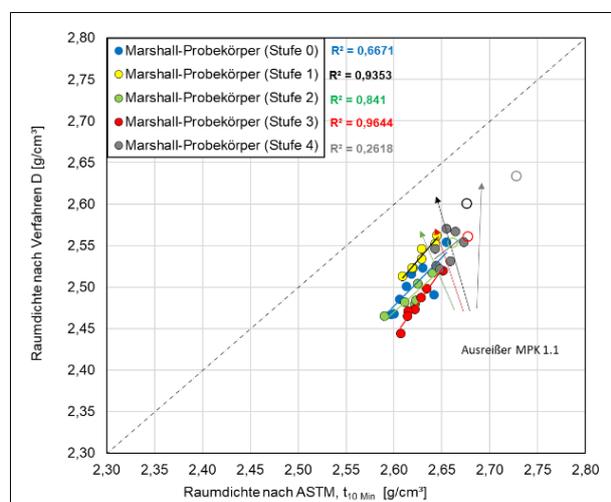


Bild 60: Raumdichten am MPK nach Verfahren D über der Raumdichte nach ASTM (V2)

Variante	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
V1	89,4	67,1	84,4	63,3	48,6
V2	66,7	93,5 <sup>*)</sup>	84,1 <sup>*)</sup>	96,4 <sup>*)</sup>	26,2 <sup>*)</sup>
V3	58,7 <sup>*)</sup>	60,3 <sup>*)</sup>	78,9 <sup>*)</sup>	65,3 <sup>*)</sup>	35,2 <sup>*)</sup>
V4	76,5	81,3	89,8	88,2	28,7 <sup>*)</sup>
V5	58,9	72,2	55,2	70,1 <sup>*)</sup>	45,3 <sup>*)</sup>
V6	85,9	83,6	87,5	74,7	85,5

<sup>\*)</sup> ohne Ausreißer

Tabelle 5: Bestimmtheitsmaße in [%] des linearen Zusammenhangs zwischen der Raumdichte nach ASTM und der Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt-StB für die MPK

Variante	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
V1	87,0	74,0 <sup>*)</sup>		68,9	47,5
V2	80,3	85,5		74,6	92,5
V3	26,0 <sup>*)</sup>	93,5		76,6 <sup>*)</sup>	46,6 <sup>*)</sup>
V4	92,0	48,9		57,9	67,8
V5	21,4	56,6		66,0	42,5
V6	82,5	85,9		95,8	65,1

<sup>\*)</sup> ohne Ausreißer

Tabelle 6: Bestimmtheitsmaße in [%] des linearen Zusammenhangs zwischen der Raumdichte nach ASTM und der Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt-StB für die WSV-PK

Variante	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
V1	67,8			29,3	47,8
V2	20,7			59,0	55,7
V3	71,6			43,6	17,2
V4 <sup>**)</sup>	10,8   91,6			63,5   90,5	51,5   38,5
V5	37,6			91,2	64,1
V6	91,6			81,9	58,8

<sup>\*\*)</sup> Entnahmestelle 1 | Entnahmestelle 2

Tabelle 7: Bestimmtheitsmaße in [%] des linearen Zusammenhangs zwischen der Raumdichte nach ASTM und der Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt-StB für die BK

duzierbarere Hohlraumstruktur erreicht wird als in situ. In den meisten Fällen ist außerdem von Stufe 0 zu Stufe 1 eine Verbesserung festzustellen. Eine mögliche Erklärung kann das Abschleifen der Unterseite der Probekörper sein – dadurch wird die Makrorauheit reduziert und damit ihr Einfluss auf die Ergebnisse des Verfahrens D. Die schlechtesten Korrelationen sind im Allgemeinen in Stufe 4 zu erkennen, da die Höhe der Probekörper mit 20 mm sehr gering ist und entsprechende Schwankungen in der Messung des Volumens sich stark auf das Ergebnis auswirken.

Bei den Bohrkernen ist Variante V4 auffällig. In der Zeile sind immer zwei Werte angegeben, da die beiden Entnahmestellen aufgrund der unterschiedlichen Verdichtung getrennt zu betrachten sind. So liegen für jede Regressionsanalyse vier statt acht Probekörper zugrunde.

Grundsätzlich beeinflussen Änderungen in dem gemessenen / bestimmten Volumen die Raumdichte der jeweiligen Probekörper sehr stark. Das wird bei

jedem der Messverfahren noch mal deutlich. Erwartungsgemäß sollte die Raumdichte, die mit dem 3D-HandyScan ermittelt wurde, insgesamt am größten sein, jedoch in jedem Fall größer als die Raumdichte, die durch Ausmessen berechnet wurde, da man mit diesem Verfahren in der Lage ist, die meisten oberflächennahen Hohlräume zu erfassen. Praktisch ist es technisch ausgeschlossen mittels Ausmessens (Verfahren D) ein kleineres Volumen und damit auch eine größere Raumdichte zu bestimmen, da die vielen oberflächennahen Hohlräume stets dazu gezählt werden.

Ein Vergleich der mit allen drei Messverfahren ermittelten Raumdichte ist exemplarisch für Versuchsstrecke V5 in Bild 61 und Bild 62 getrennt nach Stufe 0 und Stufe 3 dargestellt. In der Stufe 0 (Bild 61) erfüllen alle Messungen die Erwartungen:

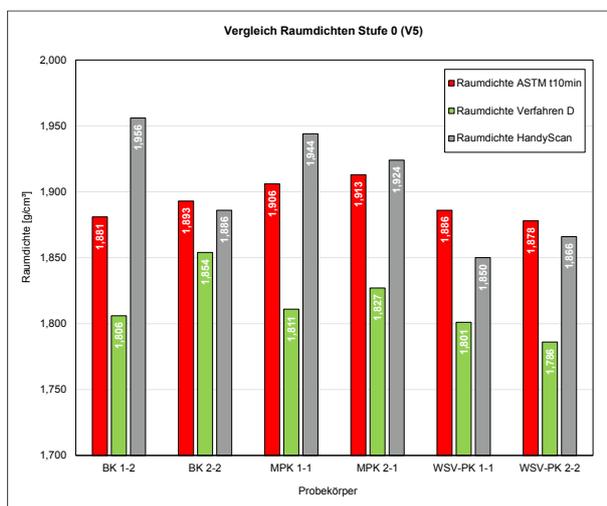


Bild 61: Gegenüberstellung der Raumdichten nach Verfahren D bzw. ASTM und den mittels HandyScan bestimmten Raumdichten der Strecke V5 in Stufe 0

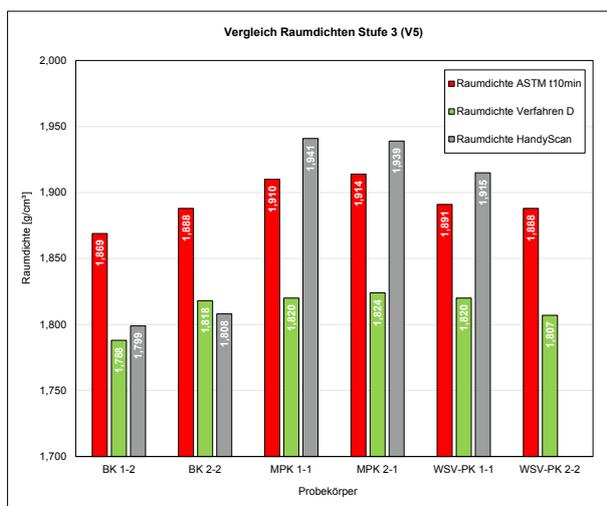


Bild 62: Gegenüberstellung der Raumdichten nach Verfahren D bzw. ASTM und den mittels HandyScan bestimmten Raumdichten der Strecke V5 in Stufe 3

Die Raumdichte nach der Scannung (graue Balken) ist immer größer oder auf einem ähnlichen Niveau wie die nach den ASTM (rote Balken) bestimmten Raumdichten.

In der Stufe 3 (Bild 62) sind die Ergebnisse der Bohrkern BK 1-2 und BK 2-2 auffällig: Die mit dem HandyScan bestimmten Raumdichten entsprechen in etwa denjenigen, die mit dem Verfahren D ermittelt wurden, sind sogar teilweise etwas niedriger. Diese Feststellung passt weder zu den Ergebnissen in Stufe 0 noch zu den oben erläuterten zu erwartenden Zusammenhängen.

Im zugehörigen Rendering aus dem 3D-Modell (Bild 63) sind, im Vergleich zum entsprechenden Foto, sowohl an der Ober- als auch Unterseite viele der oberflächennahen Hohlräume wieder zu erkennen. Dies zeigt, dass die Scan-Aufnahmen sehr gut die realen Probekörper abbilden. Da die ermittelten Zahlenwerte unplausibel sind muss die Ursache in der Auswertung liegen. Eine Erklärung könnte die noch nicht ausreichend systematisierte mathematische Modellanpassung sein. Dies kann an dieser Stelle jedoch nicht weiterverfolgt werden. Die Ergebnisse der beiden anderen Probekörperarten (MPK und dem WSV-PK) passen zu denjenigen in Stufe 0 und sind so weit plausibel.

Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei den anderen untersuchten Strecken gemacht. Die Ergebnisse sind entsprechend vollständig im Anhang II. 8 dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bestimmung des Volumens, respektive der Raumdichte, über den HandyScan einen guten Ansatz darstellt die Hohlraumstruktur von Asphaltprobekörpern zu erfassen. Als alternatives Verfahren zur Bestimmung der Raumdichte fehlt dem Scanverfahren jedoch aktuell noch die Praxistauglichkeit. Der Aufwand für die Scannung eines Probekörpers hat sich zwar als verhältnismäßig erwiesen, jedoch stellte sich die Nachbearbeitung des 3D-Modells zur Beseitigung von Scan-Artefakten und Modellkorrekturen als sehr (zeit)aufwändig heraus, da diese weder systematisiert noch ausreichend durch Referenzmessungen an Asphaltprobekörpern belegt sind. Vor allem die Nachbearbeitung führt dazu, dass das Endergebnis in Form des Volumens vom jeweiligen Anwender abhängt. Die Bearbeitung ist damit auch subjektiv beeinflusst und aus diesem Grund für einzelne Messungen mit einer verhältnismäßig großen Unsicherheit behaftet.

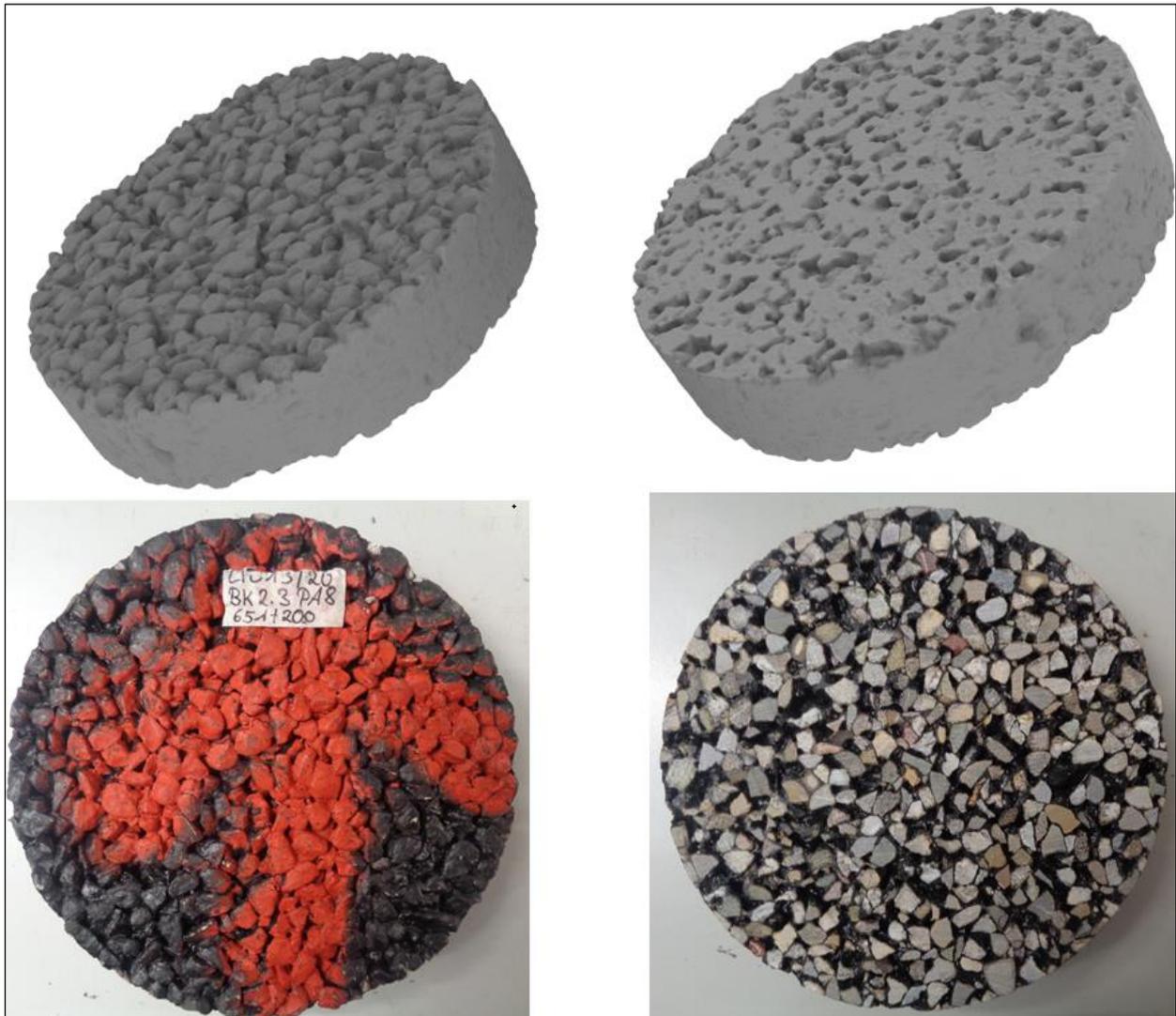


Bild 63: Gegenüberstellung des 3D-Modells mit den in Stufe 3 aufgenommenen Fotos von Bohrkern 2-2

In Bild 64 und Bild 65 sind die Zusammenhänge zwischen den Raumdichten nach dem HandyScan und den Raumdichten durch Ausmessen (Verfahren D) bzw. nach ASTM für V5 dargestellt. Es wird deutlich, dass mit den vorliegenden Ergebnissen keine Korrelation zwischen diesen Kenngrößen abgeleitet werden kann. Dies ist - wie oben bereits erläutert - der noch nicht ausreichend standardisierten Auswertemethode der Scans geschuldet.

Um erste Erkenntnisse über die Aussagekraft in Bezug auf die Präzision des Vakuumverfahrens nach den ASTM zu gewinnen, erfolgten bei V3 bis V6 Prüfungen unter Wiederholbedingungen. Dabei wurde jeder Marshall-Probekörper in den einzelnen Stufen drei Mal untersucht, indem er jedes Mal in eine neue Tüte vakuumiert und über und unter Wasser gewogen wurde. Zusätzlich wurden die Raumdichten mit Ausmessverfahren ebenfalls drei Mal er-

mittelt, wobei hier verschiedene Personen die Messungen durchgeführt haben. In Bild 66 sind die Häufigkeitsverteilungen der berechneten Spannweiten der Raumdichten dargestellt. Um den Einfluss auf die damit verbundenen Aussagen einschätzen zu können sind in Bild 67 die Spannweiten der daraus ermittelten Hohlraumgehalte abgebildet. Die Werte sind annähernd normalverteilt. Dabei ist zu erkennen, dass die Spannweiten bei beiden Verfahren ähnlich groß ausfallen, tendenziell treten jedoch bei den Raumdichten aus dem ASTM häufiger kleinere Spannweiten als beim Verfahren D auf. Außerdem wird deutlich, dass die Spannweiten bei dem Raumdichteverfahren nach ASTM viel häufiger 0,05 oder kleiner betragen.

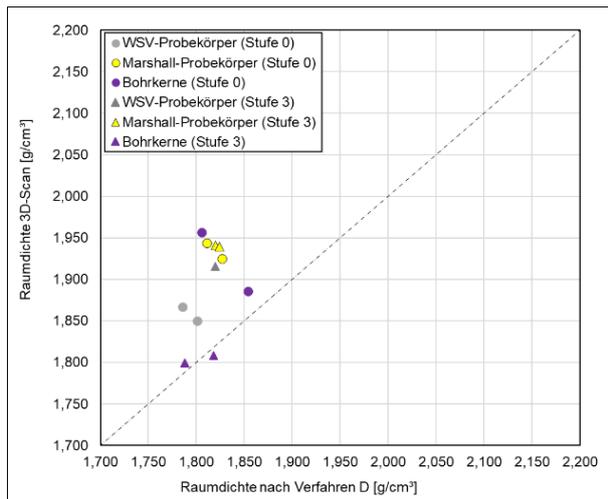


Bild 64: Raumdichten der Proben aus Stufe 0 und Stufe 3 mittels 3D-Scan über der Raumdichte nach Verfahren D (V5)

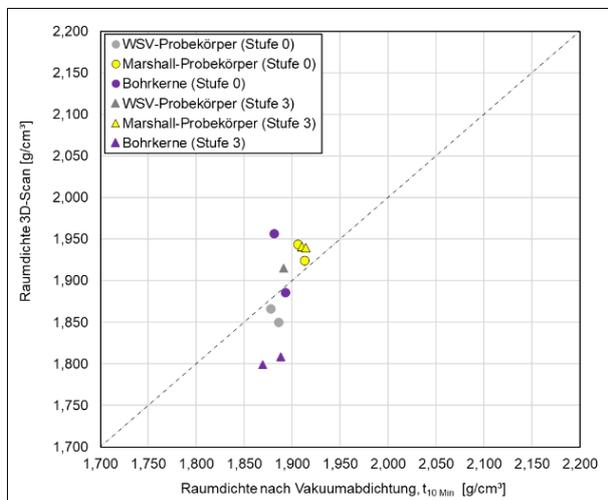


Bild 65: Raumdichten der Proben aus Stufe 0 und Stufe 3 mittels 3D-Scan über der Raumdichte nach ASTM (V5)

Auch wenn die Streuungen zunächst gering aussehen, übertragen auf die Hohlraumgehalte ergeben sich daraus große Schwankungen: bei mehr als der Hälfte der Probekörper führt es zu einem Unterschied von 0,03 Vol.-% und mehr. Bei einem Vergleich der Prüfverfahren schneidet das ASTM daher besser ab.

Wichtiger Einflussfaktor im Allgemeinen ist auch die Erfahrung und Schulung des Laboranten. Der Einfluss des Anwenders bei dem Verfahren D ist mutmaßlich größer als bei dem Vakuumverfahren nach ASTM. Die Erfahrung, die im Umgang mit dem Verfahren nach ASTM gewonnen werden konnte, hat gezeigt, dass bei entsprechender Einweisung bzw. Arbeitsanleitung wenig Einfluss vom Anwender ausgehen sollte. Im Gegensatz zum Ausmessen besteht wenig Einflussmöglichkeit des Anwenders bei den einzelnen Arbeitsschritten. Der Anwender muss

lediglich gewährleisten, dass die Folie während des gesamten Messvorgangs nicht beschädigt wird.

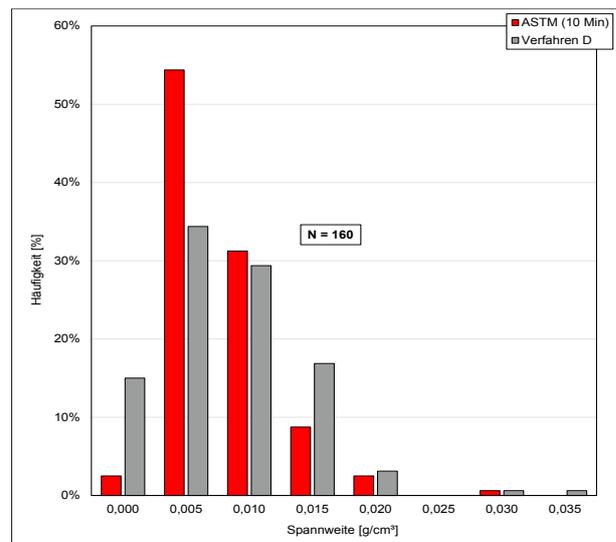


Bild 66: Ermittelte Spannweiten der bestimmten Raumdichten für die MPK (V3-V6)

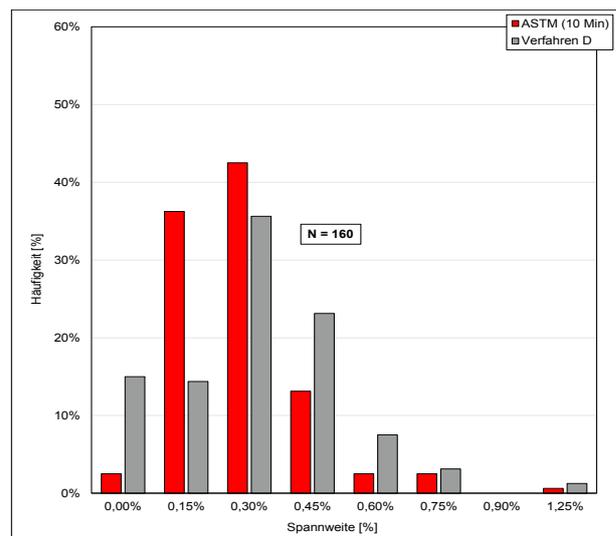


Bild 67: Ermittelte Spannweiten der bestimmten Hohlraumgehalte für die MPK (V3-V6)

Dies wird durch eine Kontrollwägung vor und nach dem Wasserbad weitestgehend sichergestellt. Das aufbrachte Vakuum ist durch die Norm vorgegeben und im Gerät selbst fest hinterlegt. Der vollautomatische Vakuumvorgang wird durch den Anwender nicht verändert. Daher ist auch davon auszugehen, dass das Vakuumverfahren nach ASTM unter Vergleichsbedingungen mit verschiedenen Laboratorien deutlich besser abschneiden wird.

## 5.2 Analyse des Zusammenhangs zwischen der Raumdichte und der Wasserdurchlässigkeit

Die grundsätzliche Erwartungshaltung bei der Wasserdurchlässigkeit ist, dass die Durchlässigkeit in einer gewissen Form mit dem Hohlraumgehalt und damit auch automatisch mit der Raumdichte in Verbindung steht. Hohe Hohlraumgehalte sollten in aller Regel auch hohe Durchlässigkeiten mit sich ziehen. Es gilt jedoch bei der Bewertung der Ergebnisse auch zu beachten, dass das Hohlraumgefüge nicht per se durchgängig vorliegen muss. Das heißt, dass einige der Hohlräume, die berechnet wurden, keine durchgehende Verbindung haben und damit auch keine wasserdurchführende Funktion übernehmen.

In Bild 68 ist die vertikale Durchlässigkeit TP(V) von V1 über dem Hohlraumgehalt aus der Raumdichte nach Vakuumabdichtung (ASTM) und nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 [18] berechneten Hohlraumgehalt dargestellt. Zu erkennen ist, dass die MPK mit Abstand die größte vertikale Durchlässigkeit aufzeigen und der ansteigende Trend auch durch eine lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von über 70 % abgebildet werden kann. Nach den MPK zeigen die WSV-Probekörper einen ähnlichen Verlauf, wenn auch mit deutlich schlechterem Bestimmtheitsmaß von 41 bzw. 65 %. Die Ergebnisse der Bohrkern liegen als Punktwolken im Diagramm und ergeben keinen sinnvollen Zusammenhang. Bei den Varianten V2 bis V6 sind die Tendenzen ähnlich: Grundsätzlich sind (schwache) Zusam-

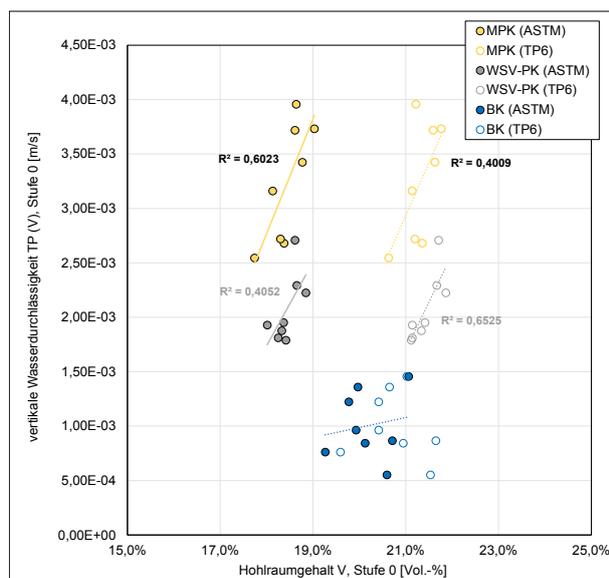


Bild 68: Vertikale Wasserdurchlässigkeit TP(V) über dem Hohlraumgehalt V nach den TP Asphalt-StB und ASTM (V1)

menhänge nur bei den MPK und den WSV-Probekörpern zu erkennen. Ausgewählte Diagramme sind im Anhang II. 4 zu sehen.

In Bild 69 sind die Ergebnisse der horizontalen Wasserdurchlässigkeit nach den TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] dem Hohlraumgehalt der Variante V1 gegenübergestellt. Es wird unterschieden, ob der Hohlraumgehalt aus der Raumdichte nach ASTM oder durch Ausmessen errechnet wurde. Bei den ersten drei Varianten (V1 bis V3) wurden verschiedene Abdichtungsmöglichkeiten untersucht (Kap. 3.4.3). Dabei ist nur in wenigen Fällen ein Zusammenhang zu erkennen, der jedoch auch nicht ausreichend statistisch abgesichert ist. Das höchste Bestimmtheitsmaß mit knapp 80 % konnte bei den Bohrkernen durch die Raumdichte nach ASTM und durch die Wasserdurchlässigkeit der Variante TP(H3) ermittelt werden. Der Zusammenhang ist bei den Bohrkernen, bei denen der Hohlraumgehalt durch die Raumdichte durch Vakuumabdichtung berechnet wurde, tendenziell besser bestimmt als die Hohlraumgehalte, die mit der Raumdichte nach Ausmessen berechnet worden sind. Das ist unter Umständen ein Indiz dafür, dass der Hohlraumgehalt durch die Raumdichte nach ASTM treffender beschrieben wird.

Ab Variante V4 wurde nur noch ein Versuchsaufbau (Abdichtungsmethode TP(H1)) zur Bestimmung der horizontalen Wasserdurchlässigkeit angewendet. Auch bei den Varianten V4 bis V6 haben sich keine aussagekräftigen Bestimmtheitsmaße ergeben, weswegen auf weitere Darstellungen verzichtet wird.

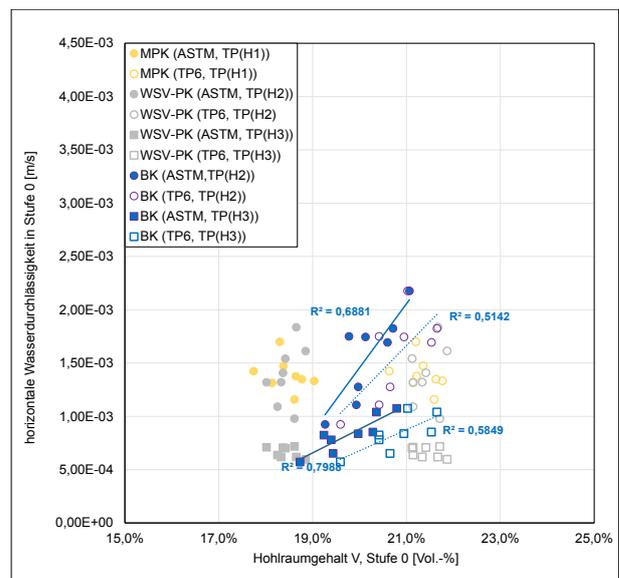


Bild 69: Horizontale Wasserdurchlässigkeit über dem Hohlraumgehalt V nach den TP Asphalt-StB und ASTM (V1)

Insgesamt konnten im Rahmen der statistischen Auswertungen keine systematischen Zusammenhänge der Durchlässigkeitsbeiwerte in horizontaler und vertikaler Richtung mit dem Hohlraumgehalt bzw. der Raumdichte festgestellt werden. Unabhängig von der Probekörperart ergeben sich zwar zum Teil plausible und gut bestimmte Zusammenhänge, die aber nicht systematisch festzustellen sind.

## 5.3 Einflussfaktoren auf die Raumdichte

### 5.3.1 Einfluss der Makrorauheit

In Abhängigkeit der Probekörperart (MPK, Bohrkern und WSV-Probekörper) sowie der Stufe sind die Außenseiten der Probekörper entsprechend unterschiedlich rau. Beispielweise ist der MPK nach Herstellung (Stufe 0) an allen Seiten makrorau. Demgegenüber weist ein Bohrkern in Stufe 0 nur noch eine makrorauere Stirnseite auf. Daraus lassen sich für jeden Probekörper in Abhängigkeit der Stufe und dessen Abmessungen raue und glatte Oberflächenanteile ableiten. Wie in Kap. 2.2 erläutert, hat dies einen Einfluss auf die ermittelte Raumdichte nach Verfahren D der TP Asphalt-StB, weswegen dieser tiefergehend analysiert wurde. Ebenfalls wurde der potenzielle Einfluss auf die Ergebnisse der alternativen Verfahren (ASTM, 3D-Scan) betrachtet.

Des Weiteren ist bei einem „kleinen“ Probekörper zu erwarten, dass die Oberflächenbeschaffenheit sich mehr in den Ergebnissen durchschlägt als bei einem „großen“, der insgesamt mehr Volumen und eine größere Masse hat. Deshalb wird zur Beurteilung des Einflusses der herstellungsbedingten Makrorauheit auf die bestimmte Raumdichte der sogenannte „Rauigkeitsindex“ eingeführt. Dieser berechnet sich in Prozent aus dem Verhältnis von rauer zur verbleibenden Gesamtoberfläche. Somit beschreibt ein Index von 100 % den MPK in Stufe 0, der allseitig rau ist. Ein Index von 0 % beschreibt dagegen ein WSV-PK oder BK in Stufe 4, der allseitig glattgeschliffen worden ist.

Aufgrund der Vorüberlegungen sollte die Raumdichte nach Verfahren D bei einem hohen Rauigkeitsindex kleiner sein als bei einem niedrigen Index. Denn je größer der Anteil an rauer Oberfläche ist, desto größer ist das erfasste Volumen. Bei den beiden alternativen Verfahren (ASTM, 3D-Scan) sollte der Einfluss auf die ermittelten Raumdichte weniger ausgeprägt sein, da die Oberflächenstruk-

tur, sei es durch die dicht anliegende Plastikfolie oder durch die direkte Erfassung im Scanprozess, genauer erfasst wird. Die Ergebnisse aus den 3D-Scans wurden in Kap. 4.6 behandelt und werden aufgrund der, für solche statistische Analysen, geringen Anzahl an Werten hier nicht mehr weiter betrachtet.

Um den Einfluss der makrorauen Oberflächenanteile zu bestimmen, wurde daher der Zusammenhang zwischen der Raumdichte und dem berechneten Rauigkeitsindex mit Hilfe von linearen Regressionen weiter in Abhängigkeit der Probekörperart und der Variante untersucht. Neben der grafischen Auswertung als direkter Vergleich der Regressionsgeraden und der dazugehörigen Bestimmtheitsmaße wird die Steigung der Funktion (Parameter  $m$ ) zur weitergehenden Bewertung herangezogen, um somit beide Raumdichteverfahren direkt gegenüber zu stellen. Je kleiner dabei der Absolutwert der Geradensteigung  $m$  ist, desto kleiner ist insgesamt die Änderung der Raumdichte und somit der Einfluss der Rauigkeit schwächer ausgeprägt.

Für die Analyse der Zusammenhänge bei den WSV-Probekörpern stehen je Probekörper drei Werte zu Verfügung. Sie haben zu Beginn zwei raue Stirnseiten und glatte Mantelflächen. Daraus und aus dem Flächenumfang ergeben sich Rauigkeitsindizes von 65 %. In den nächsten beiden Stufen haben die Probekörper nur noch eine raue Stirnseite, d. h. Rauigkeitsindizes zwischen 33 und 36 %. Im letzten Schritt sind die Probekörper allseitig glatt und der Rauigkeitsindex fällt auf 0 %. Es bestehen sowohl beim Verfahren D als auch bei der Raumdichtebestimmung nach ASTM starke Zusammenhänge zwischen der Raumdichte und dem Rauigkeitsindex. Exemplarisch sind in Bild 70 und Bild 71 die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die WSV-Probekörper der Variante V1 dargestellt.

sind die zugehörigen Parameter der Regressionsgeraden sowie die Bestimmtheitsmaße zusammengefasst. Mehr als die Hälfte (63 %) der ermittelten Bestimmtheitsmaße liegen über 80 % und damit im guten Bereich. Die Probekörper, die ein Bestimmtheitsmaß unter 80 % aufweisen (z. B. PK 1-1 in Bild 70), wurden auf Auffälligkeiten hin überprüft. Es konnte jedoch keine bestimmte Ursache für die im Vergleich niedrigeren Bestimmtheitsmaße gefunden werden. In der Regel waren es jeweils in einzelnen Stufen im Vergleich zu den anderen Probekörpern größere Streuungen, die auch noch im

Rahmen von Wiederholungsmessungen vertretbar sind.

Aufgrund der Streuung der Einzelwerte liegt das Bestimmtheitsmaß bei einer Gesamtbetrachtung aller

Probekörper bei ca. 60 %, die Tendenzen bleiben dennoch erhalten: die Abhängigkeit von der Rauheit ist gut zu erkennen.

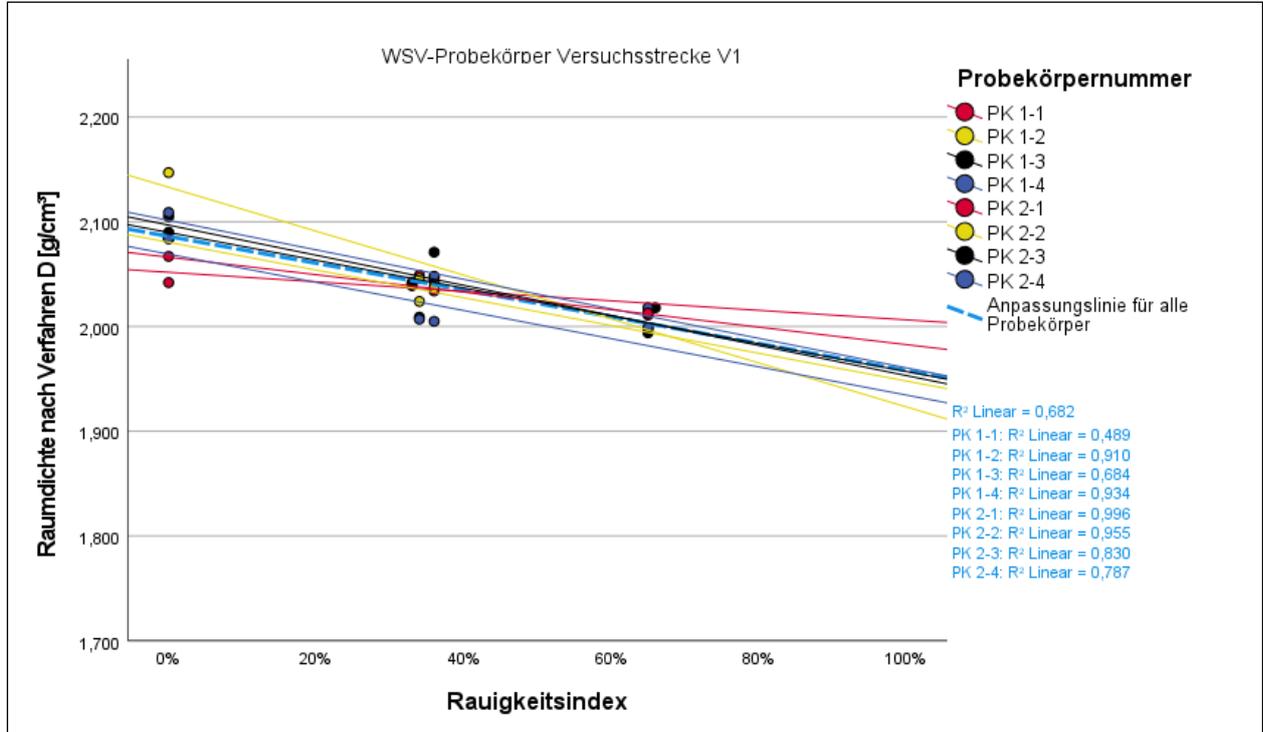


Bild 70: Änderung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex (V1, WSV-PK)

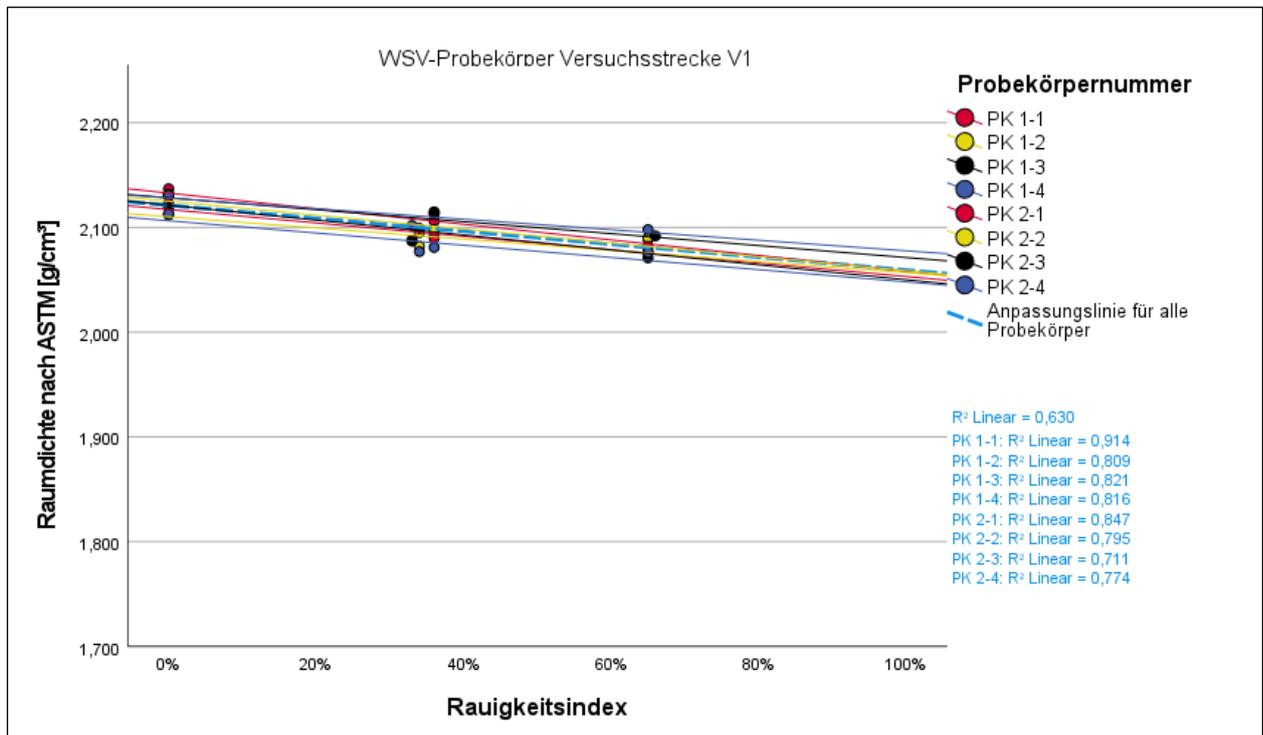


Bild 71: Änderung der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit vom Rauigkeitsindex (V1, WSV-PK)

Einfluss Rauigkeit		Verfahren D			ASTM		
Stelle	Probekörper	m	n	R <sup>2</sup>	m	n	R <sup>2</sup>
1	PK 1-1	-0,045	2,052	0,489	-0,074	2,133	0,914
	PK 1-2	-0,210	2,133	0,910	-0,066	2,125	0,809
	PK 1-3	-0,133	2,090	0,684	-0,057	2,128	0,821
	PK 1-4	-0,141	2,101	0,934	-0,050	2,128	0,816
2	PK 2-1	-0,083	2,066	0,996	-0,064	2,117	0,847
	PK 2-2	-0,132	2,080	0,955	-0,053	2,110	0,795
	PK 2-3	-0,144	2,097	0,830	-0,071	2,121	0,711
	PK 2-4	-0,135	2,069	0,787	-0,058	2,106	0,774

Tabelle 8: Übersicht der Regressionskoeffizienten sowie der Bestimmtheitsgrade (V1, WSV-PK, markiert: R<sup>2</sup> ≥ 80%)

Der Einfluss der Rauigkeit auf die nach dem Verfahren D bestimmten Raumdichten ist größer als bei dem Verfahren nach ASTM. Das ist an der Steigung der Gerade in Bild 72 zu erkennen – der Absolutwert der Parameter m ist deutlich größer im Falle des Verfahrens D. Lediglich der Probekörper PK 1-1 entspricht nicht diesem Trend. Auffällig ist hierbei aber auch, dass die Regressionsfunktion bei der Raumdichte nach Verfahren D vergleichsweise schlecht bestimmt ist und auch grafisch nicht zu den anderen Regressionsfunktionen passt.

Die grafischen Auswertungen zu den linearen Regressionen der Varianten V2-V6 sind wie auch die Regressionskoeffizienten im Anhang II. 6 abgebildet. Auch die Auswertung dieser Varianten hat gezeigt, dass der Einfluss der Rauigkeit in aller Regel bei dem Ausmessverfahren größer ist als beim Verfahren nach ASTM. Bei Variante V3 fällt der Probekörper PK 2-1 ähnlich dem Probekörper PK 1-1 bei

Variante V1 aus der Reihe. Auch hier ist das Bestimmtheitsmaß mit 30,5 % verhältnismäßig klein und scheint daher für die Gesamtbewertung nicht repräsentativ.

Die Marshall-Probekörper (MPK) durchlaufen alle Stufen, so dass hierfür stets fünf Werte zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse werden beispielhaft an V1 erläutert und sind in Bild 72 und Bild 73 exemplarisch dargestellt. Die zugehörigen Regressionsparameter und Bestimmtheitsmaße sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Die Regressionskoeffizienten sind zusammenfassend für die Varianten V2 bis V6 im Anhang II. 6 abgebildet. Zu Beginn sind die MPKs allseitig rau, d. h. sie haben ein Rauigkeitsindex von 100 % und am Ende ist nur die Mantelfläche noch rau, d. h. der Rauigkeitsindex beträgt 28 %. Die übrigen Werte liegen zwischen 77 und 68 % und damit nah beieinander. Dabei ist stets die untere Stirnseite glatt und der Rest rau. Hier sind sowohl bei den Raumdichten nach Verfahren D als auch bei den nach ASTM berechneten Raumdichten wieder plausible lineare Zusammenhänge zu erkennen. Die Steigungen der Regressionsgeraden fallen auch hier bei dem ASTM kleiner aus als beim Verfahren D, wobei die Unterschiede kleiner als bei den WSV-PK sind. Im Gegensatz zu den WSV-Probekörpern ergeben sich für die MPK der Varianten V2 bis V5 bei den nach Verfahren D bestimmten Raumdichten nur sehr schwache Zusammenhänge.

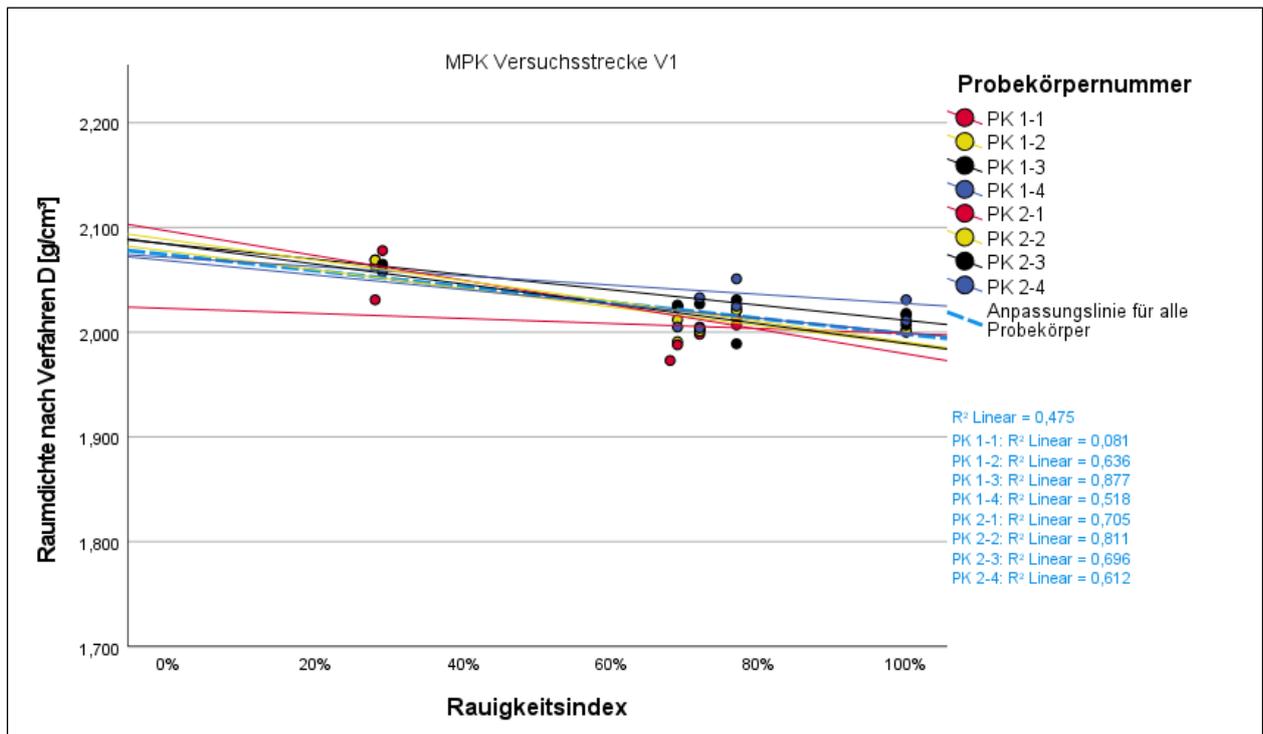


Bild 72: Änderung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex (V1, MPK)

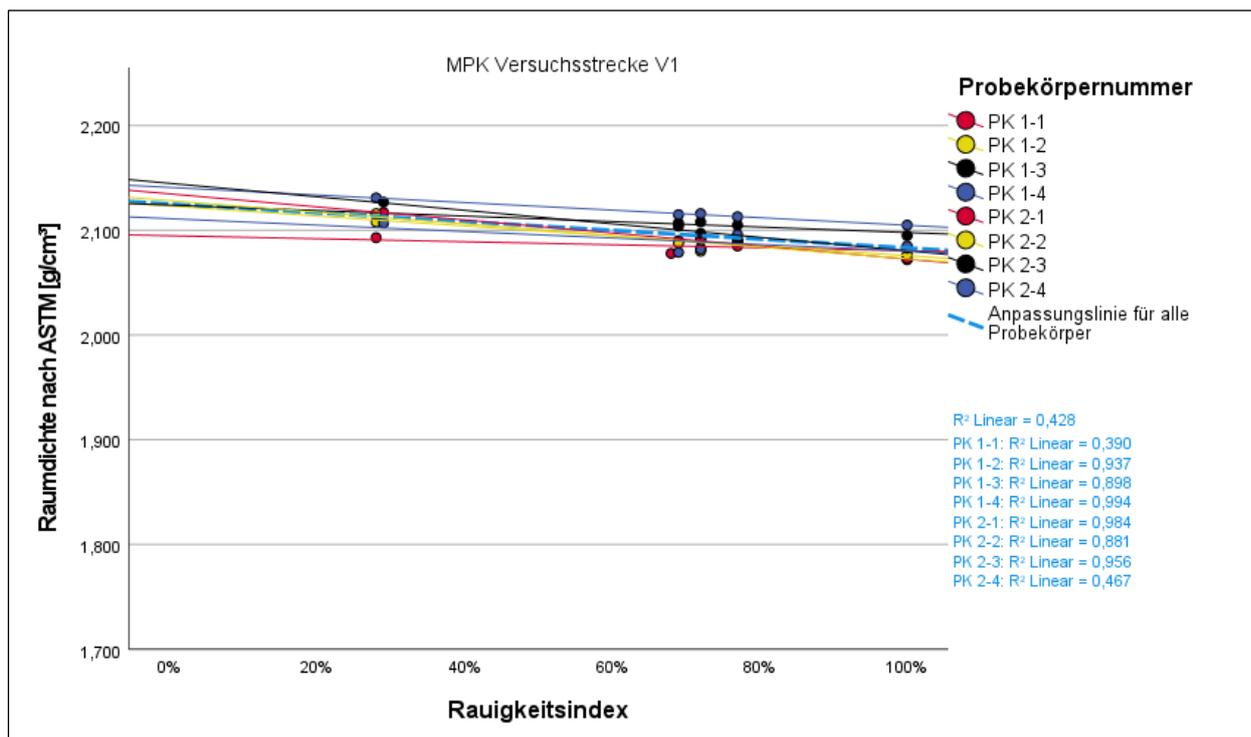


Bild 73: Änderung der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex (V1, MPK)

Einfluss Rauigkeit		Verfahren D			ASTM		
Stelle	Probekörper	m	n	R <sup>2</sup>	m	n	R <sup>2</sup>
1	PK 1-1	-0,024	2,023	0,081	-0,014	2,095	0,390
	PK 1-2	-0,089	2,077	0,636	-0,047	2,123	0,937
	PK 1-3	-0,073	2,084	0,877	-0,026	2,124	0,898
	PK 1-4	-0,044	2,072	0,518	-0,036	2,141	0,994
2	PK 2-1	-0,117	2,097	0,705	-0,062	2,135	0,984
	PK 2-2	-0,098	2,088	0,811	-0,056	2,128	0,881
	PK 2-3	-0,095	2,084	0,696	-0,064	2,145	0,956
	PK 2-4	-0,069	2,068	0,612	-0,031	2,111	0,467

Tabelle 9: Übersicht der Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens und der MPK von Variante V1 (markiert:  $R^2 \geq 80\%$ )

Das liegt an den großen Streuungen der Werte sowie an den unterschiedlichen Schwankungen zwischen den Stufen. Gute lineare Zusammenhänge sind bei dem Verfahren D nur bei Variante V6 zu erkennen. Die Steigungen sind wie auch schon bei Variante V1, wenn auch nicht ganz so ausgeprägt, bei dem Verfahren D größer als bei der Vakuumabdichtung nach ASTM und spricht für eine größere Sensibilität gegenüber rauen Oberflächen beim Ausmessen. Dementgegen fallen die Zusammenhänge bei den Raumdichten nach ASTM bei fast allen Probekörpern sehr stark ( $R^2 > 79\%$ , siehe Anhang II. 6) aus.

Anhand der Fotodokumentation der jeweiligen MPK konnte keine spezielle Ursache gefunden werden, die die fehlenden Zusammenhänge beim Verfahren D erklären würde. Dennoch deuten die Ergebnisse

vor allem in Kombination mit den guten Zusammenhängen beim Verfahren nach ASTM auf die Anfälligkeit des Ausmessverfahrens gegenüber Messungengenauigkeiten hin. Der MPK weist im Vergleich zu Bohrkern oder WSV-PK in jeder Stufe zusätzlich auch noch eine raue Mantelfläche auf, was Messungengenauigkeiten begünstigen kann.

Die Interpretation der Ergebnisse bei den Bohrkernen (BK) erfolgt bei manchen Strecken unter Vorbehalt der Tatsache, dass zwar jeweils drei Werte vorliegen, zwei davon sich jedoch sehr nah beieinander befinden. Dies hängt damit zusammen, dass in einigen Fällen kein großer Unterschied in den Abmessungen und damit auch in den Rauigkeitsindexen zwischen Stufe 0 und Stufe 3 vorhanden ist. Es ergeben sich rechnerisch Bestimmtheitsmaße von bis zu 100 %. Die Ergebnisse werden exemplarisch an V1 in Bild Bild 74 und Bild 75 dargestellt. In Tabelle 10 sind die Regressionsparameter und die Bestimmtheitsmaße zusammengefasst. Grundsätzlich ergeben sich plausible Verläufe. Das bedeutet, dass auch bei den Bohrkernen mit zunehmender Rauigkeit die gemessenen Raumdichten kleiner werden. Auch wenn der Abstand der Raumdichtemessungen bei einem Rauigkeitsindex um die 30-40 % klein ist kann, wenn auch nicht per se statistisch abgesichert, der gleiche Trend wie auch bei den anderen Probekörperarten festgestellt werden. Die im Vergleich zu dem Ausmessverfahren

höhere Bestimmtheit sowie der qualitative Verlauf der Messungen spricht für das Verfahren nach ASTM, da die Rauigkeit mutmaßlich unabhängig von der jeweiligen Probekörperbeschaffenheit in den einzelnen Stufen besser angesprochen werden

kann. In der grafischen Darstellung ist auch zu erkennen, dass der Verlauf des Zusammenhangs aller Probekörper tendenziell gleich verläuft wie auch die einzelnen Probekörper.

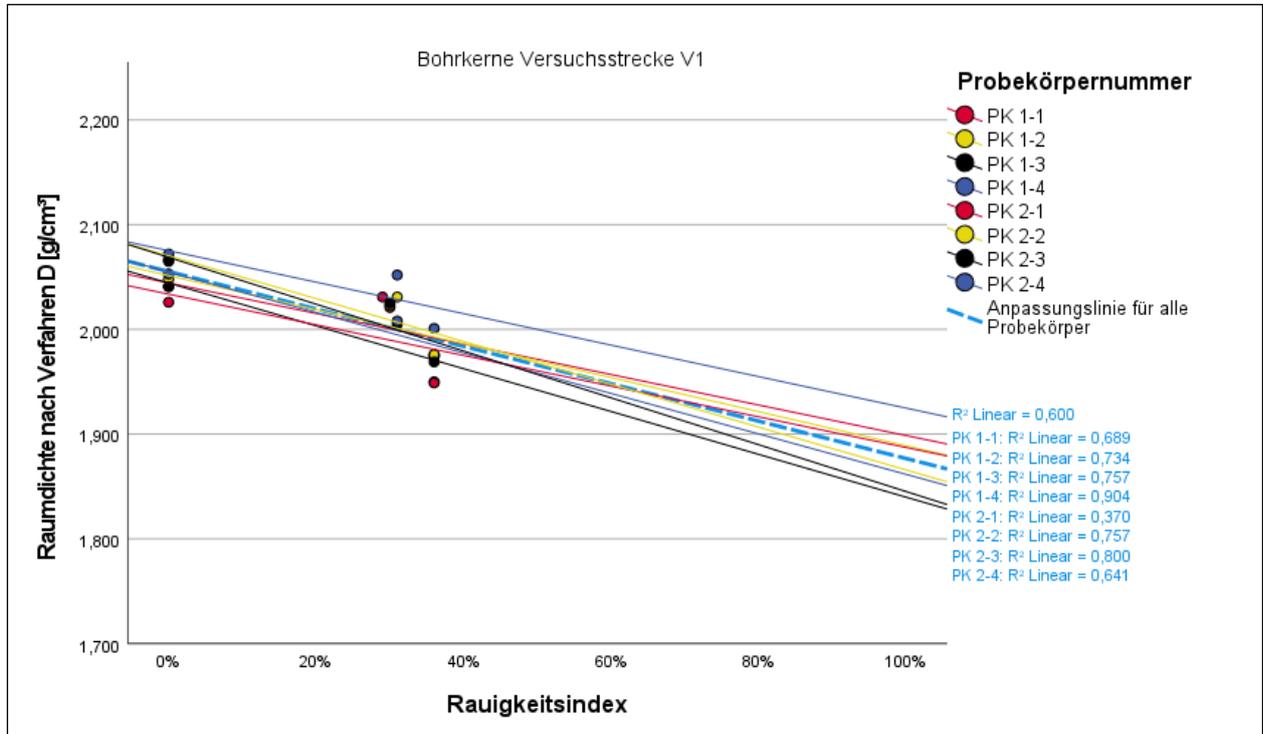


Bild 74: Regressionsanalyse der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex für Variante V1 für die Bohrkerne

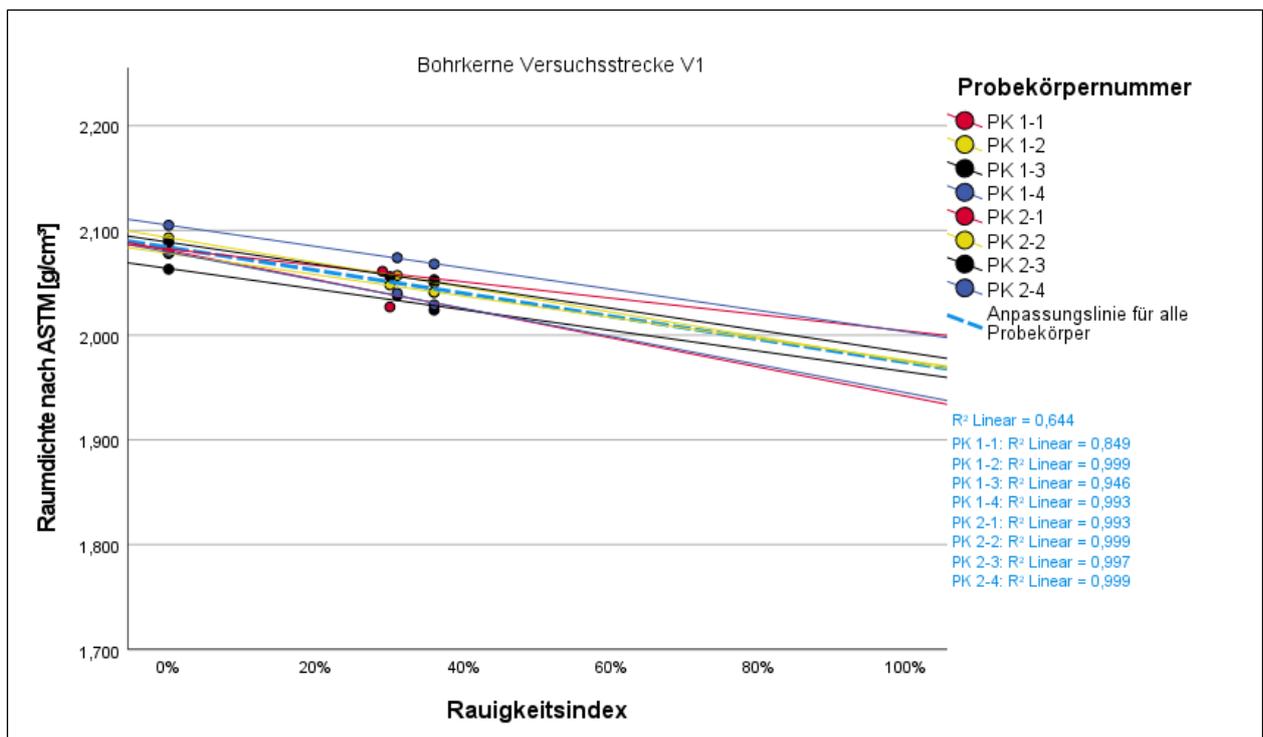


Bild 75: Regressionsanalyse der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex für Variante V1 für die Bohrkerne

Einfluss Rauigkeit Raumdichte			Verfahren D			ASTM		
Variante	Entnahmestelle	Probekörper	m	n	R <sup>2</sup>	m	n	R <sup>2</sup>
V1	1	PK 1-1	-0,146	2,044	0,689	-0,139	2,081	0,849
		PK 1-2	-0,162	2,051	0,734	-0,102	2,078	0,999
		PK 1-3	-0,205	2,044	0,757	-0,099	2,064	0,946
		PK 1-4	-0,193	2,055	0,904	-0,134	2,079	0,993
	2	PK 2-1	-0,146	2,034	0,370	-0,078	2,082	0,993
		PK 2-2	-0,205	2,070	0,757	-0,118	2,093	0,999
		PK 2-3	-0,224	2,069	0,800	-0,105	2,089	0,993
		PK 2-4	-0,150	2,075	0,641	-0,102	2,105	0,999
V2	1	PK 1-1	-0,256	2,498	0,999	-0,140	2,580	0,933
		PK 1-2	-0,315	2,528	1,000	-0,126	2,579	0,997
		PK 1-3	-0,277	2,542	0,999	-0,148	2,607	0,995
		PK 1-4	-0,237	2,506	0,978	-0,168	2,582	0,957
	2	PK 2-1	-0,286	2,532	1,000	-0,154	2,591	0,993
		PK 2-2	-0,282	2,515	0,976	-0,143	2,569	0,979
		PK 2-3	-0,314	2,524	0,963	-0,146	2,579	0,999
		PK 2-4	-0,262	2,499	0,997	-0,153	2,563	0,979
V3	1	PK 1-1	-0,156	1,938	0,998	-0,069	1,966	0,989
		PK 1-2	-0,143	1,920	0,992	-0,111	1,967	0,998
		PK 1-3	-0,131	1,910	0,976	-0,107	1,963	0,999
		PK 1-4	-0,114	1,920	1,000	-0,107	1,971	1,000
	2	PK 2-1	-0,177	1,928	0,958	-0,114	1,975	1,000
		PK 2-2	-0,149	1,918	0,897	-0,101	1,968	0,979
		PK 2-3	-0,080	1,894	0,884	-0,098	1,965	0,977
		PK 2-4	-0,114	1,910	0,939	-0,051	1,951	0,995
V4	1	PK 1-1	-0,002	1,883	0,020	-0,098	1,969	0,990
		PK 1-2	-0,069	1,889	0,892	-0,108	1,961	0,961
		PK 1-3	-0,078	1,900	1,000	-0,100	1,968	0,998
		PK 1-4	-0,080	1,874	0,913	-0,117	1,957	0,981
	2	PK 2-1	-0,116	1,832	0,736	-0,121	1,905	0,988
		PK 2-2	-0,107	1,820	0,879	-0,126	1,913	0,951
		PK 2-3	-0,123	1,841	0,933	-0,121	1,918	0,977
		PK 2-4	-0,092	1,811	0,990	-0,147	1,900	0,978
V5	1	PK 1-1	-0,132	1,851	0,916	-0,089	1,906	0,964
		PK 1-2	-0,042	1,811	0,511	-0,070	1,899	0,899
		PK 1-3	-0,008	1,815	0,010	-0,089	1,906	0,984
		PK 1-4	-0,070	1,841	0,670	-0,067	1,912	0,974
	2	PK 2-1	-0,118	1,869	0,944	-0,078	1,919	0,975
		PK 2-2	-0,003	1,836	0,001	-0,067	1,913	0,992
		PK 2-3	-0,104	1,862	0,991	-0,085	1,917	0,965
		PK 2-4	-0,141	1,835	0,953	-0,089	1,909	0,886
V6	1	PK 1-1	-0,118	1,907	0,676	-0,100	1,947	0,975
		PK 1-2	-0,189	1,932	0,850	-0,107	1,950	0,999
		PK 1-3	-0,147	1,920	0,775	-0,124	1,960	0,991
		PK 1-4	-0,186	1,935	0,870	-0,118	1,957	0,944
	2	PK 2-1	-0,188	1,908	0,919	-0,112	1,929	0,993
		PK 2-2	-0,169	1,919	0,782	-0,098	1,941	0,999
		PK 2-3	-0,111	1,898	0,843	-0,078	1,929	0,995
		PK 2-4	-0,187	1,903	0,943	-0,091	1,924	0,998

Tabelle 10: Übersicht aller Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens der Bohrkern von Variante V1-V6 (Grün: R<sup>2</sup> > 80%)

### 5.3.2 Einfluss der Probekörperhöhe

Neben der Rauigkeit ist auch mit einem Einfluss der Probekörperhöhe auf die Raumdichte zu rechnen. Darauf lassen auch die Box-Plot Auswertungen aus Kap. 4 schließen. Bei größeren Probekörperhöhen fällt der Einfluss der Makrorauigkeit geringer aus als bei kleineren Höhen. Die Raumdichte von Asphaltprobekörpern kann aber von vielen Faktoren beeinflusst werden. Um den Einfluss der Probekörperhöhe eingrenzen zu können, werden nur diejenigen Stufen betrachtet, bei welchen sich nur diese eine Kenngröße ändert. Bei den WSV-Probekörpern werden daher die Ergebnisse aus den Stufen 1 und 3, bei den MPK aus den Stufen 1, 2 und 3 und bei den Bohrkernen aus den Stufen 0 und 1 zur weiteren Auswertung in Betracht gezogen. Damit verbleiben bei den Bohrkernen und den WSV-Probekörpern jeweils Ergebnisse aus zwei Stufen, so dass nur die tendenziellen Entwicklungen verfolgt werden können und keine statistische Auswertung analog zu den Ausführungen in Kap. 5.3.1 möglich ist.

Einfluss Höhe		Verfahren D			ASTM		
Stelle	Probekörper	m	n	R <sup>2</sup>	m	n	R <sup>2</sup>
1	PK 1-1	0,003	2,410	-	0,000	2,619	-
	PK 1-2	0,005	2,343	-	-0,001	2,618	-
	PK 1-3	0,003	2,397	-	0,000	2,584	-
	PK 1-4	0,004	2,390	-	0,001	2,541	-
2	PK 2-1	0,006	2,285	-	0,000	2,591	-
	PK 2-2	0,002	2,402	-	-0,001	2,588	-
	PK 2-3	0,001	2,442	-	0,000	2,576	-
	PK 2-4	0,002	2,408	-	-0,001	2,601	-

Tabelle 11: Übersicht der Steigungen in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens (WSV-PK, V2)

Für die MPK liegen jeweils Ergebnisse aus drei Stufen vor und ermöglicht deshalb auch eine einfache Regressionsanalyse der einzelnen Probekörper.

Bei den WSV-Probekörpern zeigt sich, dass der Einfluss der Probekörperhöhe bei der Raumdichte nach ASTM nicht oder kaum feststellbar ist. Über die Werte in Tabelle 11 wird dies quantifiziert: dort sind die Parameter der Verbindungsfunktionen zwischen den Ergebnissen der beiden Stufen 1 und 3 für alle WSV-PK der Variante V2 dargestellt. Der Parameter m beim ASTM ist annähernd Null. Die Steigungen beim Ausmessverfahren sind etwas größer. Die Tendenz geht dahin, dass mit abnehmender Probekörperhöhe die Raumdichten kleiner werden. Die grafischen Verläufe der Raumdichten nach Verfahren D sind in Bild 76 dargestellt.

Für die Varianten V3, V4 und V6 ergeben sich für Verfahren D gleiche Tendenzen - die Raumdichte wird mit abnehmender Probekörperdicke kleiner. Bei den Raumdichten nach ASTM ist bei den Varianten V3-V6 keine Steigung in den Verläufen zu erkennen. Die Raumdichten der einzelnen Probekörper ändern sich also nicht oder nur unwesentlich.

Die Zusammenhänge sind bei den Raumdichten nach Ausmessen tendenziell noch besser bestimmt bzw. plausibler. Es entsteht der Eindruck, dass der Einfluss der Probekörperhöhe entweder nicht besonders ausgeprägt ist oder die sowohl in Stufe 1 als auch 3 jeweils sehr ähnlichen Probekörperhöhen nicht ausreichen, um den Einfluss zu beschreiben, dass also zwischen den ca. 30 bis 40 mm Raumdichtewerte zur besseren Bestimmung fehlen. Gleichzeitig werden bei annähernd gleicher Höhe unterschiedliche Raumdichten gemessen, was sich grafisch in der „Stapelung“ der Datenpunkte äußert. Dies spricht für andere, dominierende Einflüsse bei den WSV-PK, wie z.B. Materialschwankungen, Verfahrenspräzision bei der Probekörperherstellung etc.

Die Ergebnisse der MPK bestätigen die Erwartung, dass die Raumdichten, die durch das Ausmessverfahren bestimmt wurden von der Probekörperhöhe

abhängen. Als Beispiel sind in Bild 77 die linearen Zusammenhänge bei Versuchsstrecke V1 grafisch dargestellt. Der Zusammenhang bei den einzelnen Probekörpern ist im Allgemeinen groß: Das Bestimmtheitsmaß liegt bei den meisten Probekörpern

über 85 %. Die Ausnahme stellen Probekörper PK 2-1 mit 77 % und der PK 2-2 mit 35 % dar. Außerdem ist bei dem Probekörper PK 2-3 ein gegenläufiger Zusammenhang festzustellen.

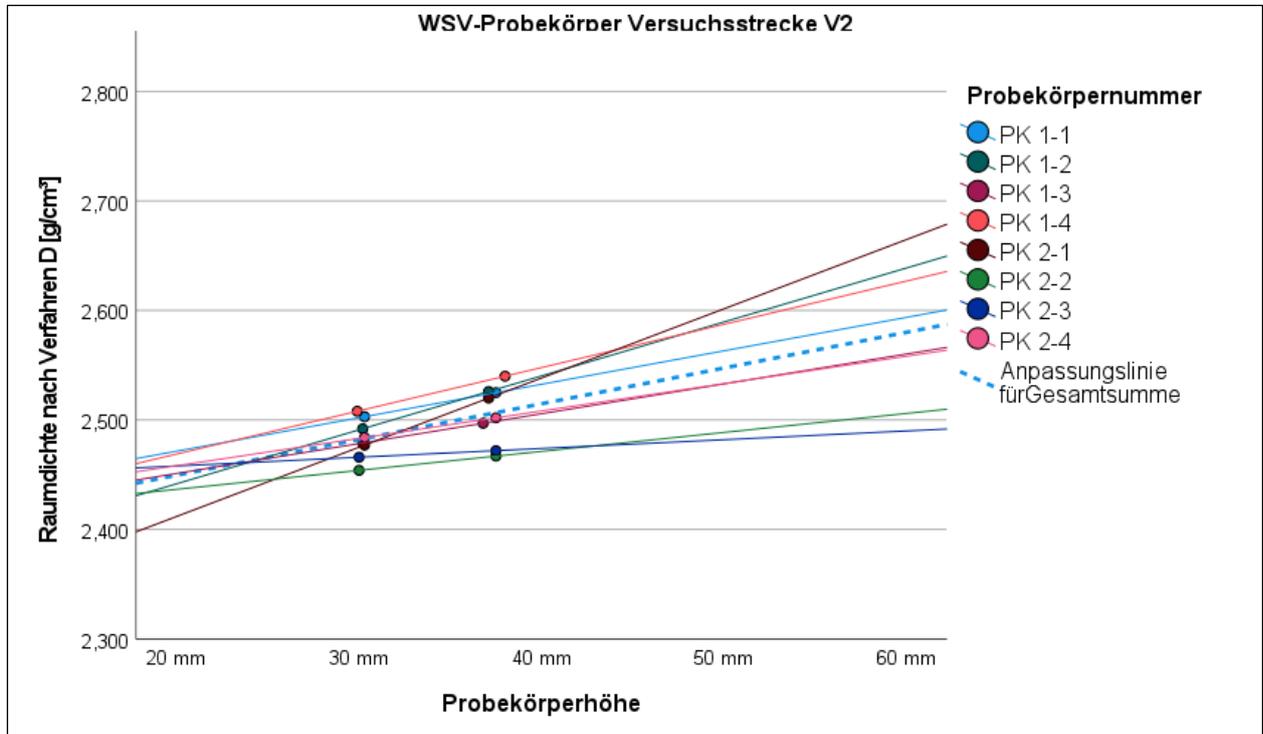


Bild 76: Grafische Darstellung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (WSV-PK, V2)

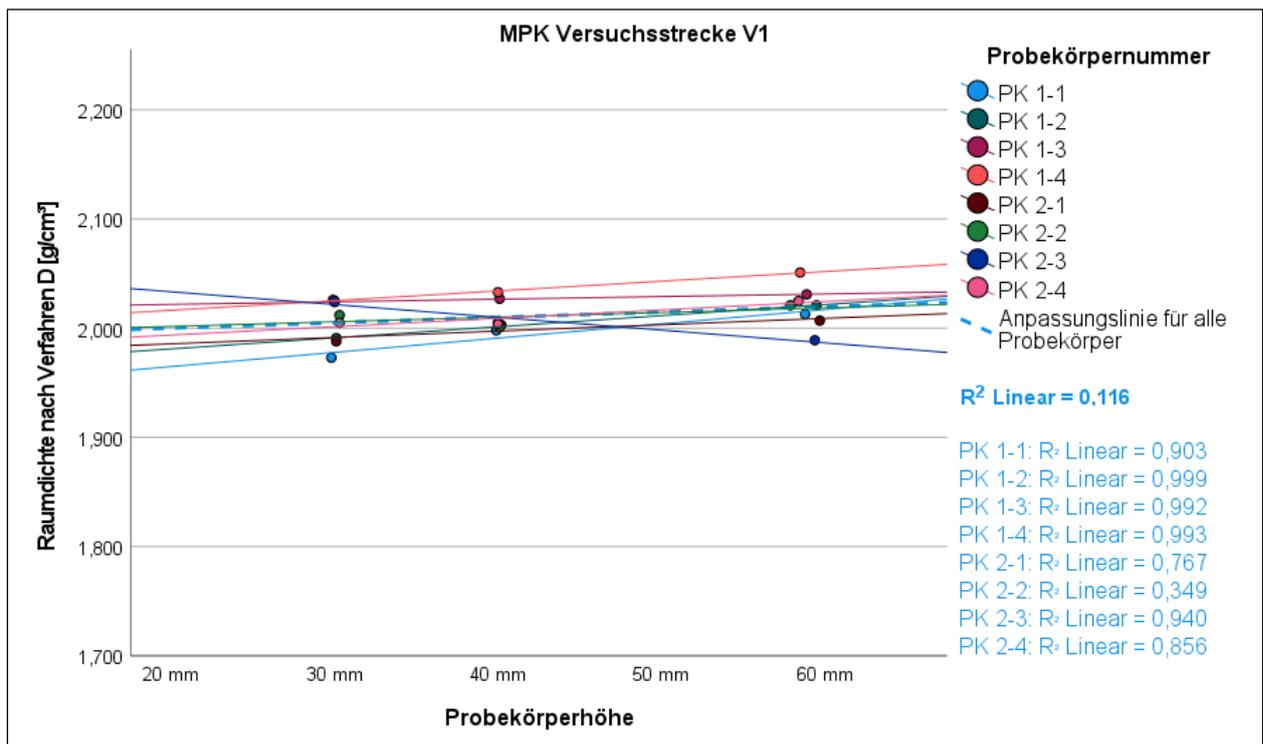


Bild 77: Regressionsanalyse der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (MPK, V1)

Bei PK 2-3 ist von einer Messungengenauigkeit bei Verfahren D auszugehen, da bei dem gleichen Probekörper bei der Raumdichtebestimmung nach ASTM von Stufe 1 zu 2 auch eine Vergrößerung gemessen wird und keine kleinere Raumdichte bestimmt wird wie bei dem Verfahren D. Daher sollte der PK 2-3 nicht zur Interpretation herangezogen werden.

In Bild 78 sind die Ergebnisse der Raumdichten nach ASTM und deren Entwicklung mit der Dickenänderung dargestellt. Diese bestätigen die Erwartungen: der Verlauf bei allen Probekörpern ist nahezu horizontal und weist darauf hin, dass die Dickenänderung kaum Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dies wird auch bei der Gegenüberstellung der Steigungen in Tabelle 12 ersichtlich: der Regressionsparameter m ist sehr klein, bei der Bestimmung nach ASTM nahezu 0.

Werden alle MPK hinsichtlich eines Gesamtzusammenhangs gemeinsam betrachtet ergeben sich

keine pauschalen Erkenntnisse. Entsprechend gering bzw. nur sehr mäßig sind die Bestimmtheitsmaße. Das heißt die Zusammenhänge leiten sich in jedem Fall von dem jeweiligen Probekörper ab. Für die Praxis entscheidend ist aber der Zusammenhang, dass an einem MPK mit unterschiedlichen Höhen auch unterschiedliche Raumdichten bestimmt werden, was auch entsprechend aus den Daten wie schon beschrieben abzuleiten ist.

Stelle	Einfluss Rauigkeit Probekörper	Verfahren D			ASTM		
		m	n	R <sup>2</sup>	m	n	R <sup>2</sup>
1	PK 1-1	-0,024	2,023	0,081	-0,014	2,095	0,390
	PK 1-2	-0,089	2,077	0,636	-0,047	2,123	0,937
	PK 1-3	-0,073	2,084	0,877	-0,026	2,124	0,898
	PK 1-4	-0,044	2,072	0,518	-0,036	2,141	0,994
2	PK 2-1	-0,117	2,097	0,705	-0,062	2,135	0,984
	PK 2-2	-0,098	2,088	0,811	-0,056	2,128	0,881
	PK 2-3	-0,095	2,084	0,696	-0,064	2,145	0,956
	PK 2-4	-0,069	2,068	0,612	-0,031	2,111	0,467

Tabelle 12: Übersicht der Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens (MPK, V1, Grün: R<sup>2</sup> ≥ 80%)

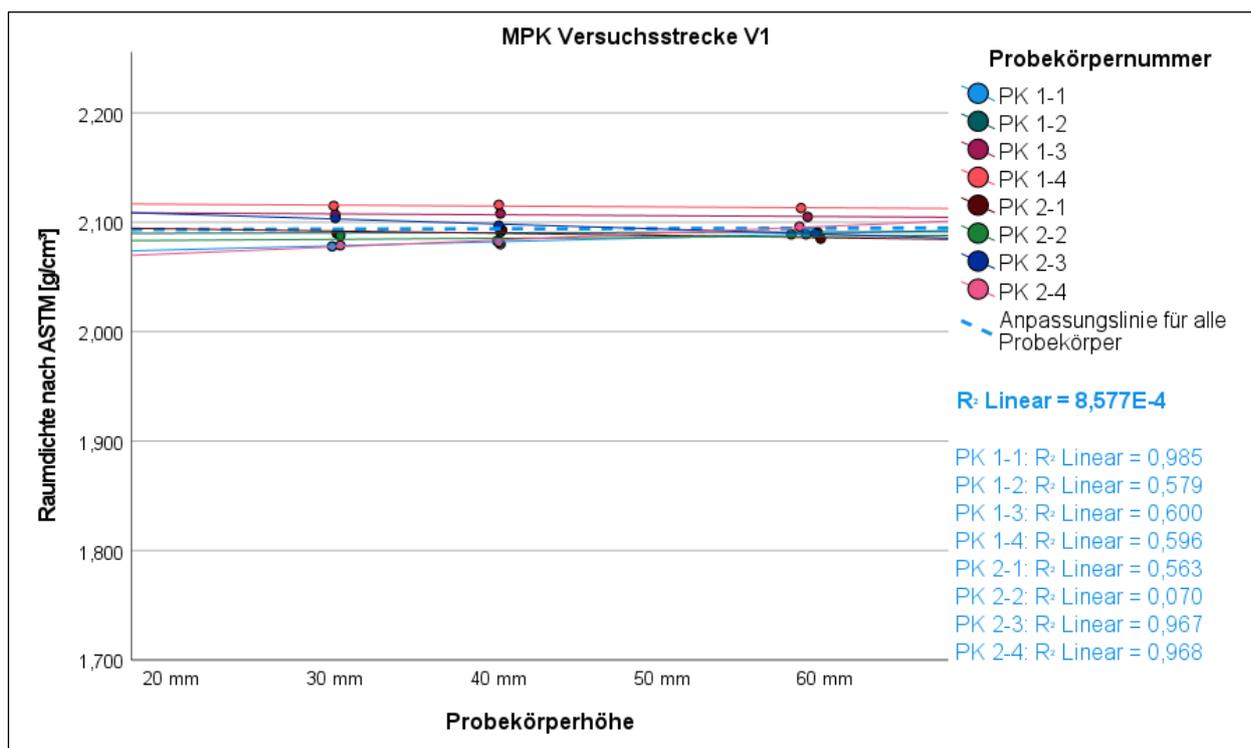


Bild 78: Regressionsanalyse der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (MPK, V1)

Die Bewertung der Ergebnisse der BK wird dadurch erschwert, dass analog zu den WSV-PK nur Ergebnisse aus zwei Stufen vorliegen. Daher lassen sich keine statistisch abgesicherten Erkenntnisse gewinnen. Aufbauend auf den Kenntnissen zu den MPK lassen sich tendenziell Zusammenhänge ableiten. Es zeigt sich, dass vor allem bei den Versuchsstrecken bei denen mindestens 10 mm Höhenunterschied zwischen Stufe 0 und 3 vorliegt, wie z. B. V1, V5 und V6, ein markanter Einfluss der Probekörperhöhe bei der Raumdichte, die durch Ausmessen bestimmt wird, zu erkennen ist. Auf der anderen Seite ist bei der Raumdichtebestimmung nach ASTM bei denselben Probekörpern kein Einfluss der Probekörperhöhe zu erkennen. Als Beispiel dazu sind in

Tabelle 13 die Ergebnisse der Variante V6 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Steigungen bei dem Verfahren D i. A. größer sind als bei der Raumdichtebestimmung nach ASTM, die nahezu bei null liegen. Das verdeutlicht auch nochmal die grafische Darstellung für beide Verfahren in Bild 79 und Bild 80.

Einfluss PK-Höhe		Verfahren D			ASTM		
Stelle	Probekörper	m	n	R <sup>2</sup>	m	n	R <sup>2</sup>
1	PK 1-1	0,002	1,803	-	0,001	1,892	-
	PK 1-2	0,002	1,800	-	0,000	1,900	-
	PK 1-3	0,002	1,805	-	0,001	1,898	-
	PK 1-4	0,002	1,805	-	0,001	1,886	-
2	PK 2-1	0,002	1,776	-	0,000	1,886	-
	PK 2-2	0,003	1,767	-	0,000	1,897	-
	PK 2-3	0,001	1,808	-	0,000	1,890	-
	PK 2-4	0,002	1,781	-	0,000	1,887	-

Tabelle 13: Übersicht der Steigungen in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens (BK, V6)

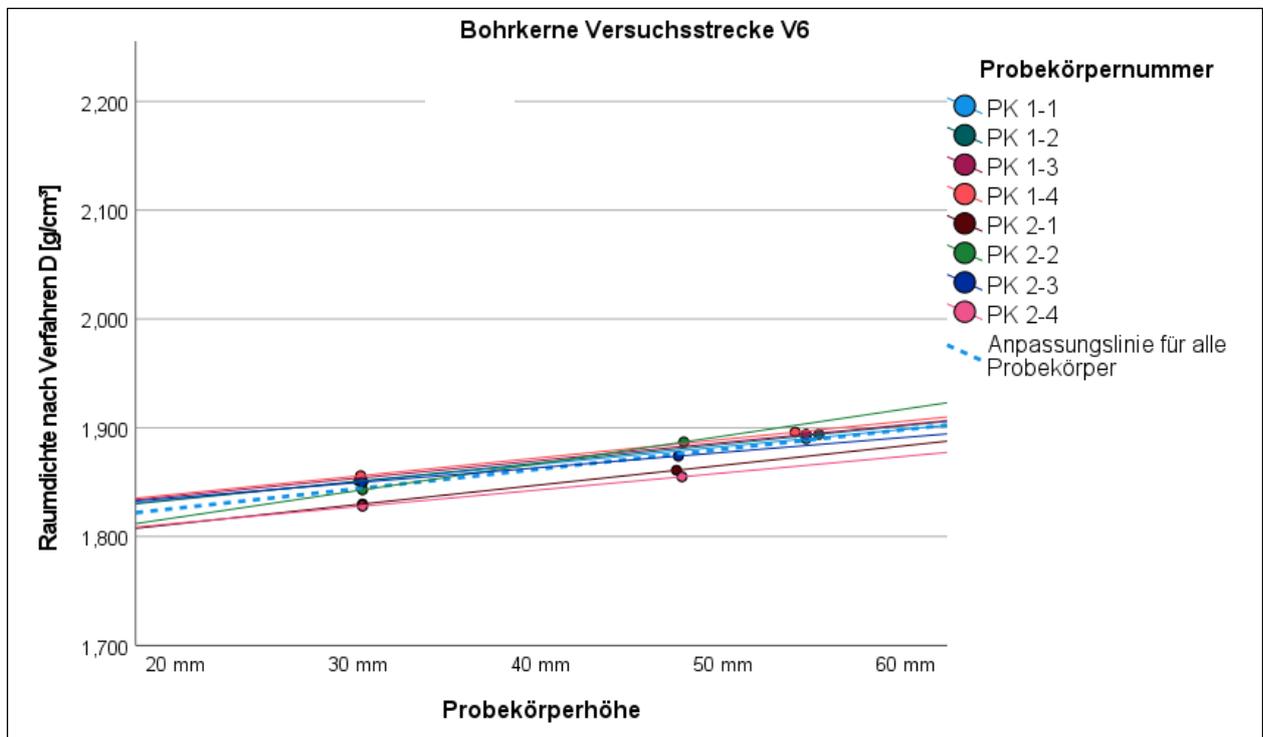


Bild 79: Grafische Darstellung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (BK, V6)

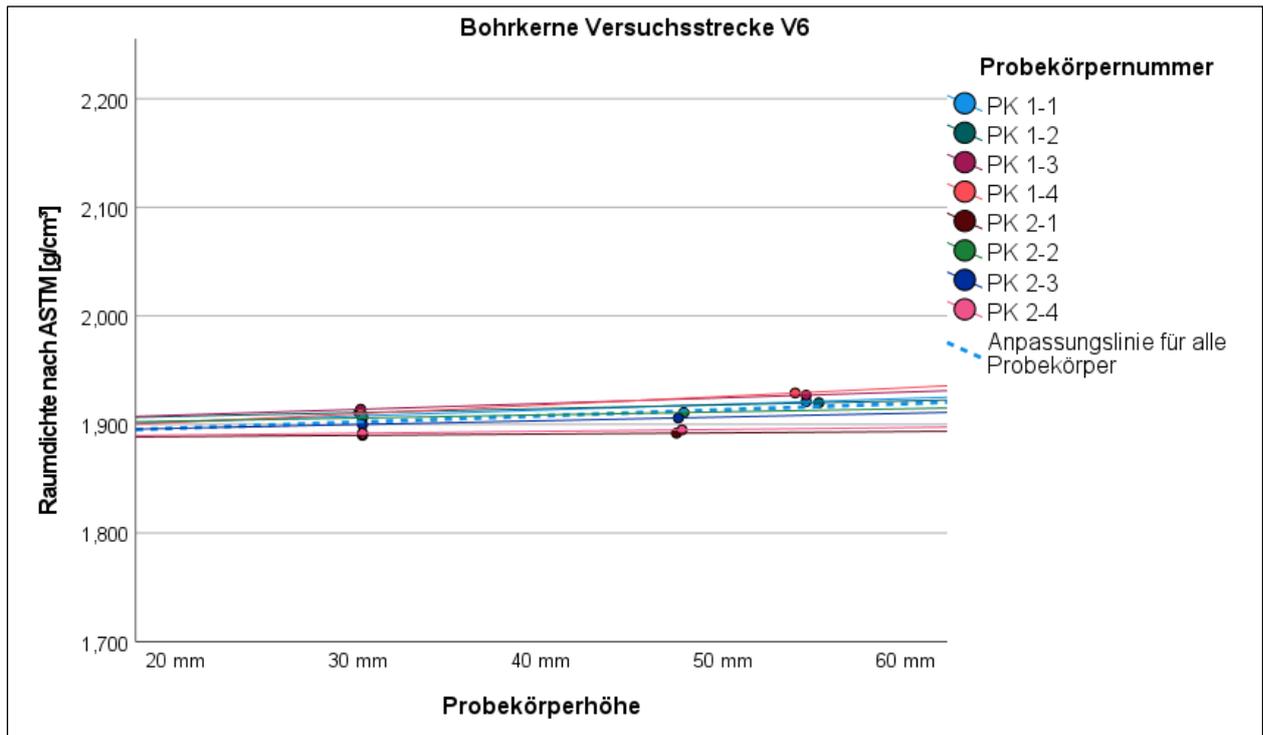


Bild 80: Grafische Darstellung der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (BK, V6)

### 5.3.3 Wechselwirkungen zwischen dem Rauigkeitsindex und der Probekörperhöhe

Die Ergebnisse für die WSV-PK sind in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt. Die Modelle sind bei allen Untersuchungsstrecken signifikant. Entsprechend unterscheidet sich auch die Anzahl der Stichproben. Bei allen Varianten ist die Einflussgröße Rauigkeitsindex signifikant. Dabei ist anzunehmen, dass auch bei der Strecke V1 von einer Signifikanz des Rauigkeitsindex ausgegangen werden kann, obwohl das gewählte Signifikanzniveau von 5 % knapp nicht eingehalten werden kann.

Zur Bewertung der Güte des Modells, d. h. wie gut die Raumdichte mit den beiden Einflussgrößen beschrieben wird, wird wie bereits in Kapitel 3.5 beschrieben das korrigierte Bestimmtheitsmaß herangezogen. Dieses liegt selten über 80 %. Bei jeweils drei Strecken (V1, V2 und V5) liegt es über 70 %. Das bedeutet, dass die Veränderungen in der Raumdichte nach Verfahren D bis zu 71 % (bei V1), 76 % (V2) und 80 % (bei V5) mit dem gewählten Modell erklärt werden können. In den übrigen Fällen

gibt es weitere Variablen, die hier nicht erfasst wurden.

Bei der Raumdichtebestimmung nach ASTM ist jeweils nur die Probekörperhöhe signifikant. Auch hier liegt das Bestimmtheitsmaß nur bei drei Strecken (V1, V4 und V5) über 70 %. Das bedeutet, dass grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen allen untersuchten Variablen besteht, allerdings gibt es außer der Rauigkeit und der Probekörperhöhe weitere Faktoren, die das Modell bestimmen.

Die Standardisierten Koeffizienten erlauben einen direkten Vergleich zum Einfluss der Rauigkeit und der Probekörperhöhe. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Rauigkeit bei dem Verfahren D mit Ausnahme der Strecke V1 deutlich größer ist als die Probekörperhöhe. Bei der Vakuumabdichtung zeigt sich, dass der Unterschied grundsätzlich nicht so groß ist, auch wenn jeweils die Probekörperhöhe bei V1, V4 und V5 als Einflussgröße signifikant wird. Im direkten Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Verfahren D wird zudem ersichtlich, dass die Rauigkeit beim Ausmessen einen größeren Einfluss hat als bei dem Verfahren nach ASTM.

Zielgröße	WSV-Probekörper							
	Variante	Einflussgrößen	Signifikanz Einflussgröße	Koeffizienten	Standardisierte Koeffizienten	Konstante	r <sup>2</sup> <sub>korrr</sub>	Signifikanz Ges.-Modell
Raumdichte (Verfahren D)	V1	Rauigkeitsindex	JA (,074)	-0,062	-0,451	2,117	71,0 %	JA N = 31
		Probekörperhöhe	NEIN (,093)	-0,002	-0,422			
	V2	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,215	-1,109	2,527	75,8 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	NEIN (,380)	0,001	0,255			
	V3	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,101	-0,705	1,942	61,6 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	NEIN (,271)	0,000	-0,104			
	V4	Rauigkeitsindex	JA (,006)	-0,062	-0,854	1,926	58,2 %	JA N = 30
		Probekörperhöhe	NEIN (,781)	0,000	0,081			
	V5	Rauigkeitsindex	JA (,002)	-0,066	-0,662	1,872	80,3 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	NEIN (,206)	-0,001	-0,256			
	V6	Rauigkeitsindex	JA (,008)	-0,079	-0,540	1,931	53,1 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	NEIN (,458)	-0,001	-0,224			

Tabelle 14: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdichte nach Verfahren D (WSV-PK)

Zielgröße	WSV-Probekörper							
	Variante	Einflussgrößen	Signifikanz Einflussgröße	Koeffizienten	Standardisierte Koeffizienten	Konstante	r <sup>2</sup> <sub>korrr</sub>	Signifikanz Ges.-Modell
Raumdichte (ASTM)	V1	Rauigkeitsindex	NEIN (,798)	-0,005	-0,064	2,161	70,7 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	JA (,003)	-0,002	-0,793			
	V2	Rauigkeitsindex	NEIN (,323)	-0,038	-0,336	2,649	57,7 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	NEIN (,183)	-0,001	-0,457			
	V3	Rauigkeitsindex	NEIN (,156)	-0,036	-0,412	2,005	57,7 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	NEIN (,187)	-0,001	-0,383			
	V4	Rauigkeitsindex	NEIN (,093)	-0,024	-0,407	2,011	74,4 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	JA (,050)	-0,001	-0,482			
	V5	Rauigkeitsindex	NEIN (,180)	-0,019	-0,314	1,935	70,7 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	JA (,023)	-0,001	-0,555			
	V6	Rauigkeitsindex	NEIN (,175)	-0,034	-0,455	1,967	43,1 %	JA N = 32
		Probekörperhöhe	NEIN (,464)	-0,001	-0,243			

Tabelle 15: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdichte nach ASTM (WSV-PK)

Die entsprechenden Ergebnisse der MPK sind in Tabelle 16 und Tabelle 17 abgebildet. Die korrigierten Bestimmtheitsmaße liegen mit Ausnahme der Variante V2 bei Verfahren D alle unter 70 %. Das Niveau der Bestimmtheitsmaße ist grundsätzlich sehr niedrig. In Abschnitt 5.3.1 und 5.3.2 wurde bei den MPK jeweils in Abhängigkeit der einzelnen Probekörper ein starker Zusammenhang zwischen der

Rauigkeit respektive der Probekörperhöhe und der Raumdichte festgestellt. Die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse bestätigen, dass diese beiden Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Raumdichte haben, weisen dennoch aufgrund der niedrigen Bestimmtheitsmaße des Modells darauf hin, dass es auch andere, stärkere Einflüsse geben muss.

Zielgröße	Marshall-Probekörper							
	Variante	Einflussgrößen	Signifikanz Einflussgröße	Koeffizienten	Standardisierte Koeffizienten	Konstante	r <sup>2</sup> <sub>korrr</sub>	Signifikanz Ges.-Modell
Raumdichte (Verfahren D)	V1	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,132	-1,231	2,070	51,5 %	JA N = 39
		Probekörperhöhe	JA (,006)	0,001	0,661			
	V2	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,228	-1,315	2,643	75,8 %	JA N = 40
		Probekörperhöhe	JA (<,001)	0,002	1,030			
	V3	Rauigkeitsindex	JA (,003)	-0,092	-0,970	1,852	17,5 %	JA N = 40
		Probekörperhöhe	JA (,012)	0,001	0,805			
	V4	Rauigkeitsindex	JA (,003)	-0,084	-1,028	1,916	22,8 %	JA N = 40
		Probekörperhöhe	JA (<,001)	0,001	0,903			
	V5	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,078	-1,146	1,853	27,3 %	JA N = 40
		Probekörperhöhe	JA (<,001)	0,001	0,976			
	V6	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,121	-1,047	1,916	42,4 %	JA N = 40
		Probekörperhöhe	JA (,067)	0,001	0,474			

Tabelle 16: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdichte nach Verfahren D (MPK)

Zielgröße	Marshall-Probekörper							
	Variante	Einflussgrößen	Signifikanz Einflussgröße	Koeffizienten	Standardisierte Koeffizienten	Konstante	r <sup>2</sup> <sub>korrr</sub>	Signifikanz Ges.-Modell
Raumdichte (ASTM)	V1	Rauigkeitsindex	JA (,003)	-0,053	-0,818	2,125	40,6 %	JA N = 40
		Probekörperhöhe	NEIN (,464)	0,000	0,188			
	V2	Rauigkeitsindex	JA (,002)	-0,071	-0,724	2,708	55,8 %	JA N = 39
		Probekörperhöhe	NEIN (,288)	0,000	0,233			
	V3	Rauigkeitsindex	JA (,015)	-0,046	-0,690	1,961	38,5 %	JA N = 38
		Probekörperhöhe	NEIN (,854)	0,000	0,050			
	V4	Rauigkeitsindex	JA (,006)	-0,043	-0,782	2,006	28,8 %	JA N = 39
		Probekörperhöhe	NEIN (,324)	0,000	0,267			
	V5	Rauigkeitsindex	JA (,001)	-0,034	-0,932	1,935	34,6 %	JA N = 38
		Probekörperhöhe	NEIN (,132)	0,000	0,405			
	V6	Rauigkeitsindex	JA (,033)	-0,027	-0,528	1,966	32,3 %	JA N = 40
		Probekörperhöhe	NEIN (,732)	0,000	-0,082			

Tabelle 17: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdichte nach ASTM (MPK)

In der Tabelle 18 und Tabelle 19 können die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse der BK nachvollzogen werden. Zur Interpretation stehen beim Verfahren D vier Varianten zur Verfügung: V1, V2, V3 und V6. Dabei ist der Einfluss der Rauigkeit stets signifikant, bei zwei Strecken (V1 und V6) ist noch zusätzlich ein signifikanter Einfluss von Probekörperhöhe festzustellen. Der Höhenunterschied der Bohrkern von Variante V1 und V6 lag ca. bei 15 mm bis 20 mm. Bei den anderen ändert sich dieser Parameter von Stufe 0 und Stufe 3 um ca. 5 mm, so dass das Model keinen signifikanten Einfluss der Probekörperhöhe zeigt. Werden beide Einflussfaktoren signifikant, ist der Einfluss der Rauigkeit in der Regel doppelt so groß wie der Einfluss der Probekörperhöhe.

Die Raumdichten nach ASTM bei den Varianten V3 und V5 zeigen an, dass auch bei den Bohrkernen

davon auszugehen ist, dass es einen Einfluss der Rauigkeit gibt, der aber im Vergleich zu den Raumdichten nach Ausmessen deutlich kleiner ist. Die multiple Regression von Variante V2 ist mit knapp 80 % hoch bestimmt, ergibt aber der Signifikanz zur Folge an, dass die Probekörperhöhe einen größeren Einfluss nimmt als die Rauigkeit. Es ist davon auszugehen, dass damit trotz der Signifikanz der Zusammenhang nicht zielsicher bewertet und viel mehr auch wieder mit dem sehr kleinen Höhenunterschied von ca. 5 mm zusammenhängt. Vielmehr kann man auch hier von einem Einfluss der Rauigkeit ausgehen, da das Signifikanzniveau von 12,4 % zwar deutlich über den festgelegten 5 % liegt, aber der Einfluss für die Variante V2 auch bei der einfachen linearen Regression aus Abschnitt 5.3.1 deutlich zu erkennen war (siehe Bild 81).

Zielgröße	Bohrkerne							
	Variante	Einflussgrößen	Signifikanz Einflussgröße	Koeffizienten	Standardisierte Koeffizienten	Konstante	r <sup>2</sup> <sub>korrr</sub>	Signifikanz Ges.-Modell
Raumdichte (Verfahren D)	V1	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,278	-1,204	2,011	81,6 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	JA (<,001)	0,002	0,645			
	V2	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,296	-1,017	2,507	91,0 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,687)	0,001	0,064			
	V3	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,166	-1,132	1,900	82,8 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,127)	0,001	0,263			
	V4	Rauigkeitsindex	NEIN (,408)	-0,104	-0,420	1,844	2,9 %	NEIN N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,851)	0,001	0,096			
	V5	Rauigkeitsindex	JA (,002)	-0,133	-0,917	1,812	33,2 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	JA (,068)	0,001	0,505			
	V6	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,223	-1,161	1,890	85,8 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	JA (<,001)	0,001	0,503			

Tabelle 18: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdichte nach Verfahren D (BK)

Zielgröße	Bohrkerne							
	Variante	Einflussgrößen	Signifikanz Einflussgröße	Koeffizienten	Standardisierte Koeffizienten	Konstante	r <sup>2</sup> <sub>korrr</sub>	Signifikanz Ges.-Modell
Raumdichte (ASTM)	V1	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,108	-0,791	2,085	61,0 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,931)	0,000	-0,016			
	V2	Rauigkeitsindex	NEIN (,124)	-0,063	-0,378	2,804	79,9 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	JA (,031)	-0,003	-0,544			
	V3	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,104	-1,032	1,961	88,1 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,329)	0,000	0,105			
	V4	Rauigkeitsindex	NEIN (,212)	-0,125	0,038	1,932	20,6 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,934)	0,000	-0,559			
	V5	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,091	-1,026	1,904	75,2 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,244)	0,000	0,205			
	V6	Rauigkeitsindex	JA (<,001)	-0,116	-0,918	1,937	66,5 %	JA N = 24
		Probekörperhöhe	NEIN (,317)	0,000	0,149			

Tabelle 19: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdichte nach ASTM (BK)

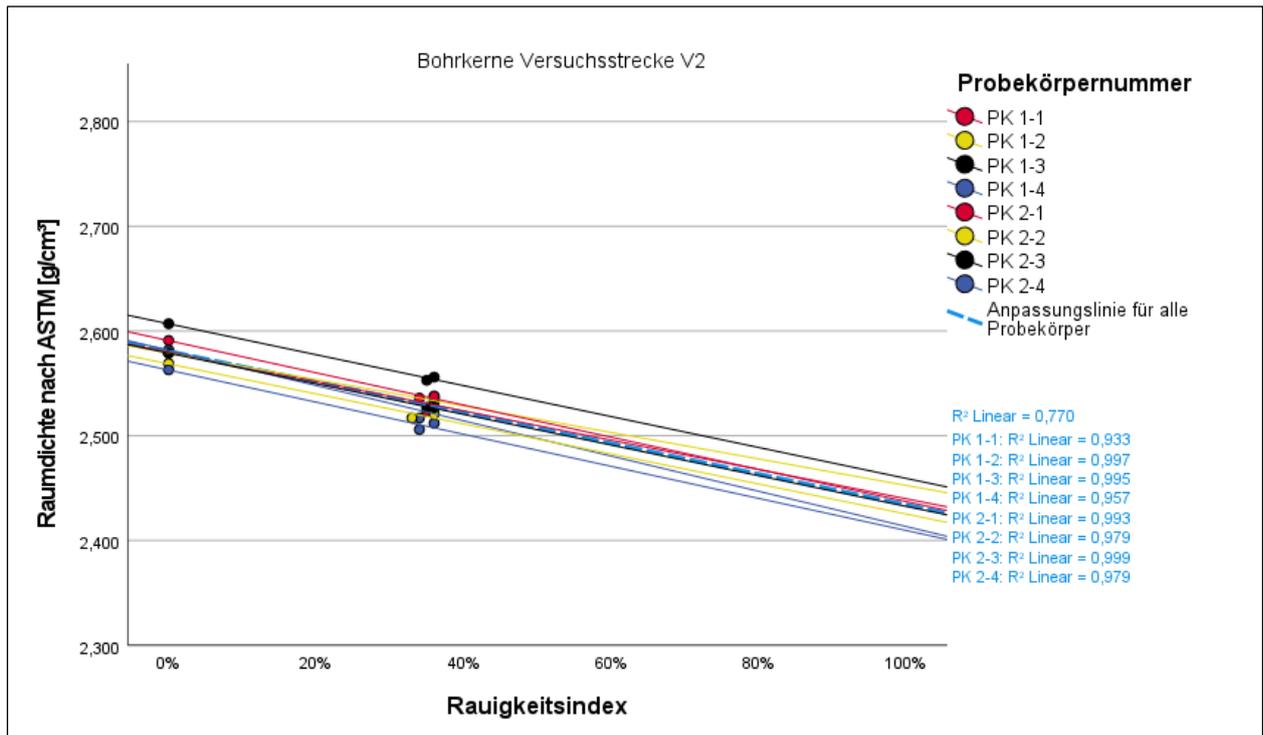


Bild 81: Regressionsanalyse der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Rauigkeitsindexes für Variante V2 für die Bohrkernkerne

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Ziel dieses Projektes war die Ableitung von zuverlässigen Kenngrößen, um die Volumeneigenschaften wie Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand von offenporigen Asphalten möglichst genau zu bestimmen und damit das Mischgut zielgerichteter zu konzipieren und besser beschreiben zu können. Dafür wurden alternative Verfahren (weiter)entwickelt, geprüft und evaluiert. In diesem Zusammenhang wurden die Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Prüfdicke, aber auch der Art der Probekörperherstellung auf die Ergebnisse systematisch untersucht. Das Ganze geschah auf der Grundlage von Mischgutproben und Bohrkernen aus sechs Strecken, die die einzelnen Varianten (V1 bis V6) darstellen. Daraus wurden verschiedene Probekörperarten hergestellt:

- Walzsektor verdichtete Asphalt-Probekörperplatten (WSV-Platten) nach den TP Asphalt-StB, Teil 33 [23],
- Zylindrische Probekörper aus den WSV-Platten (WSV-PK),
- Marshall-Probekörper (MPK) nach den TP Asphalt-StB, Teil 30 [22] und

- Zylindrische Probekörper aus den Bohrkernen (BK).

Diese wurden in mehreren Bearbeitungsstufen (Stufe WSV, 0 bis 4) untersucht. Das Untersuchungsprogramm ist in Kap. 3.3 beschrieben und bestand aus den folgenden Prüfverfahren:

- Ausmessverfahren (Verfahren D) nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 [18] zur Bestimmung der Raumdichte,
- Vakuumverfahren nach den ASTM D6752/D6752M-18 [3], ebenfalls zur Bestimmung der Raumdichte,
- Horizontale und vertikale Wasserdurchlässigkeit in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 19 [20] und
- 3D-HandyScan zur digitalen Aufnahme der Probekörperoberfläche zur Ermittlung des Volumens und anschließend der Raumdichte der Probekörper.

Erwartungsgemäß wurden bei den unterschiedlichen Probekörperarten aufgrund der Verdichtung auch unterschiedliche Kenngrößen ermittelt. Die Streuung der Ergebnisse selber sowie deren Änderung über die Stufen ist ebenfalls unterschiedlich und ändert sich innerhalb der sechs Varianten. Eine feste Reihung der Probekörper aufgrund der Herstellungsart war nicht zu erkennen.

Es zeigte sich, dass die Raumdichten nach dem Verfahren D grundsätzlich kleiner sind als die Raumdichten, die nach den ASTM berechnet werden. Die Ursache dafür liegt darin, dass bei dem Ausmessverfahren immer größere Volumina ermittelt werden, weil der Messschieber die oberflächennahen Hohlräume in aller Regel übermisst. Bei dem Verfahren nach ASTM passt sich durch das aufgebrauchte Vakuum die Folie in die oberflächennahen Hohlräume an, so dass diese nicht zum Volumen gezählt werden.

Eine noch bessere Erfassung der oberflächennahen Hohlräume kann nur durch Scanverfahren wie den im Rahmen dieses Forschungsprojekts angewendeten 3D-HandyScan erreicht werden. Es hat sich gezeigt, dass die Oberfläche sehr gut abgetastet wird und ein reales Bild der Morphologie entsteht, jedoch die mathematische Modellbildung noch nicht ausreichend auf Asphaltprobekörperstrukturen angepasst ist, sodass hier noch eine große Fehleranfälligkeit existiert. Außerdem fehlt es noch an ausreichenden Referenzmessungen, die die Plausibilität des Verfahrens sicherstellen. Dies bringt noch eine sehr zeitaufwändige Nachbearbeitung mit CAD-Programmen und einen relativ großen Einfluss des entsprechenden Anwenders mit sich.

Der 3D-HandyScan kann zukünftig ein hilfreiches Verfahren sein, ist jedoch für den regelmäßigen Einsatz in der Praxis aktuell noch nicht ausgereift.

Die durchgeführten Messungen unter Wiederhol- bzw. Vergleichsbedingungen zeigten, dass die Streuungen bei dem Vakuumverfahren nach ASTM tendenziell kleiner sind als diejenigen beim Verfahren D. Das Vakuumverfahren nach ASTM hat sich zudem als reproduzierbar und wenig fehleranfällig erwiesen. Es kann bei entsprechender Einweisung und Arbeitsanleitung zielsicher und vergleichbar durchgeführt werden. Die Anschaffungskosten für die benötigte Messtechnik des Vakuumverfahrens sind im Vergleich zu sonst üblichen Messgeräten gering. In der Regel sollte es ausreichen, ein gemäß Norm entsprechend leistungsfähiges Vakuumgerät sowie die passenden Folienbeutel als Verbrauchsmaterial zu beschaffen. Alle anderen Materialien oder Gerätschaften, wie zum Beispiel ein temperiertes Wasserbad zur Raumdichtebestimmung, werden in den Prüfeinrichtungen als vorhanden vorausgesetzt.

Die statistischen Auswertungen haben den Einfluss der Probekörperhöhe und der Rauigkeit auf die

Raumdichten nach Verfahren D bestätigt. Dementgegen war bei dem Vakuumverfahren in aller Regel kein signifikanter Einfluss der Probekörperhöhe feststellbar. Dem Einfluss der Rauigkeit gegenüber erweist sich das Verfahren als deutlich robuster. Der Einfluss der Verdichtungsart ist auf zweierlei Hinsicht erkennbar: Zum einen liegen die Ergebnisse teilweise auf einem anderen Niveau und zum anderen sind die Streuungen unterschiedlich. Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit der MPK zeigen z. B. die statistischen Auswertungen in Bezug auf die Einflüsse der Probekörperhöhe und Rauigkeit inhomogene Ergebnisse. Die WSV-Probekörper erlauben an dieser Stelle zielsichere Rückschlüsse auf die Mischguteigenschaften einer Entnahmestelle.

Die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit hat sich als indirekte Methode zur Bestimmung bzw. Beurteilung der Raumdichte respektive des Hohlraumgehalts als nicht zielführend erwiesen. Sie ist sehr zeitaufwendig und benötigt einen großen Einsatz von Leitungswasser. Die an einem Probekörper bestimmten Werte sind bei einer vierfachen Bestimmung sehr gut reproduzierbar, bei Prüfung von anderen Probekörpern der gleichen Entnahmestelle sind jedoch große Streuungen in den Ergebnissen festzustellen. Die Wasserdurchlässigkeit ist in vertikale Richtung grundsätzlich größer als horizontal. Eine feste Reihung in Abhängigkeit der Probekörperform oder andere systematische Zusammenhänge konnten nicht festgestellt werden. Dies wird auf die innere Hohlraumstruktur zurückgeführt, die zum Teil auch schon abhängig vom jeweiligen Probekörper ist und wohl den größten Anteil am Einfluss auf das Durchfluss- bzw. Durchlässigkeitsverhalten nimmt. Selbst bei gleichen Probekörpern mit gleichem Hohlraumgehalt kann die bestimmte Wasserdurchlässigkeit abweichen, da die Hohlraumstruktur nach außen nicht per se zusammenhängend und damit wasserführend sein muss. Walzsektor verdichtete Platten können nicht nach den Vorschriften aus der TP-Asphalt geprüft werden, da der Durchfluss an Wasser zu groß ist um den geforderten Wasserstand zu erreichen, selbst wenn mit Hilfe von mehreren Wasserleitungen gleichzeitig versucht wird den Wasserstand zu erreichen. Wenn WSV-Platten geprüft werden sollen, muss ein Verfahren mit abnehmendem Wasserstand unter Zuhilfenahme eines Vakuums zum Einsatz kommen.

## 7 Empfehlungen und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Probekörperhöhe und die Oberflächenbeschaffenheit einen Einfluss auf die ermittelte Raumdichte haben. Eine Veränderung führt nicht zwingend zu kleineren Streuungen, kann jedoch das Niveau der Werte und damit die Bewertung deutlich verändern. Insbesondere bei den Raumdichten, die durch Ausmessen nach Verfahren D bestimmt wurden, wurden große Unterschiede festgestellt. Daher ist es wichtig eine einheitliche Probekörperhöhe festzulegen. Die in Stufe 3 untersuchten 30 mm eignen sich sehr gut dafür, da sie sich auch aus Bohrkernen gut gewinnen lassen, wenn als Abdichtung eine SAMI-Schicht verwendet wird und entsprechen von der Unterseite viel Material weggenommen werden muss. In Abhängigkeit der Abdichtung der PA-Deckschicht steigen große Mengen von Bindemittel in den Hohlräumen der Bohrkern auf und beeinflussen die Raumdichte. Zum Teil waren Bindemittelreste aus der Abdichtung auch noch bis zu einer Probekörperhöhe von 34 mm bis 35 mm feststellbar.

Um den Einfluss Oberflächenbeschaffenheit zu reduzieren, sollte im Labor zur Bestimmung des Verdichtungsgrads die Bezugsraumdichte an entsprechend vorbereiteten WSV-Probekörper ermittelt werden. Herstellungsbedingt haben diese, analog der Bohrkern aus der Straße, eine glatte Mantelfläche. Nach dem Sägen bzw. Schleifen auf einer Höhe von 30 mm wird die Unterseite glatt und die Rauigkeit damit genau so wie bei den Proben in situ. Außerdem sind die Probekörper aus den walzsektorverdichteten Asphaltprobepplatten aufgrund der Verdichtungsart eher vergleichbar mit den Bohrkernen. Das Verdichtungsregime sollte nach M OPA [10] gewählt werden oder einer weiteren Optimierung unterzogen werden. Dazu sollten jedoch weitere Untersuchungen mit Mischgut durchgeführt werden, das während des Einbaus entnommen wird und mit variierenden Regime-Optionen im Labor verdichtet wird. Die Marshall-Probekörper, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt zur Bestimmung der Bezugsraumdichte herangezogen werden, sind auf Grund der Geometrie, der Verdichtungsart und der teilweise inhomogenen Zusammenhänge bei den multiplen Regressionsanalysen nicht dafür geeignet.

Bei der Evaluation der angewandten Prüfverfahren ergeben sich folgende Empfehlungen:

Es zeigte sich, dass die Verfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit als indirekte Prüfung des Hohlraumgehalts bzw. der Raumdichte nicht geeignet sind. Es wird empfohlen auf Wasserdurchlässigkeitsprüfungen im Zusammenhang mit der Raumdichtebestimmung von offenporigem Asphaltmischgut abzusehen.

Die Ergebnisse des Vakuumverfahrens nach ASTM D6752M-18 zeigen, dass das Verfahren einige Vorteile hat und deutlich robuster gegenüber dem Einfluss unterschiedlicher Probekörpergeometrien ist als das Verfahren D. Auch im Rahmen von einem anderen kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhaben FE 07.0288/2016/EGB wurden gute Erfahrungen bei der Prüfung von hohlraumreichen Asphalten in diesem Verfahren gemacht. Es wird daher empfohlen, diesen Ansatz weiter zu verfolgen und für künftige Raumdichtebestimmungen an offenporigen Asphaltarten als auch für Sorten hohlraumreicher Asphalte (z.B. SMA LA), die Prüfung nach ASTM D6752/D6752M-18 [3] ins nationale Regelwerk zu implementieren. Damit könnten die Raumdichte und auch der Verdichtungsgrad in der Praxis zielsicherer bewertet werden. Dafür sollte eine entsprechende Arbeitsanleitung ausgearbeitet und Vergleichsversuche in mehreren Laboratorien durchgeführt werden. Dabei ist besonders auf die Folienstärke und die Ablesezeit zu achten. Aufgrund der Erfahrungen im Rahmen des Projektes wird empfohlen, die Folienstärke auf den festen Wert von 150 µm und die Ablesezeit auf 10 Minuten nach Einlegen in das Wasserbad festzulegen. Im Vergleich zu dem Verfahren D ist mit keinem größeren Mehraufwand zu rechnen. Vielmehr ist nach Einweisung des Personals mit deutlich weniger Fehlerquellen zu rechnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die aktuell gültigen und nach Regelwerk einzuhaltenden Hohlraumgehalte auf Grundlage von Raumdichten nach Verfahren D festgelegt wurden. Beim Verwenden des Vakuumverfahrens nach ASTM müssen auch die Grenzwerte für die Hohlraumgehalte vergleichend neu bestimmt und definiert werden.

## Literatur

- [1] Alber, S.: Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung, Veröffentlichung des Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Heft 46, 2013
- [2] A.E. Alvarez, A.E. Martin, C. Estakhri, J.W. Button, Z. Kraus, N. Prapaitrakul, C.J. Glover, Evaluation and Recommended Improvements for Mix Design of Permeable Friction Courses Report No. FHWA/TX-08/0-5262-3, Texas Department of Transportation, Austin, Texas, 2007
- [3] ASTM D6752/D6752M – 18, Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Asphalt Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method, ASTM International, 2018
- [4] Cooley, Jr., L.A., Brain D. P., M.R. Hainin., M.S. Buchanan., and J. Harrington., Bulk Specific Gravity Round-Robin Using the CoreLok Vacuum Sealing Device. NCAT Report 02-11, 2002
- [5] DIN EN 12697-19: Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 19: Durchlässigkeit der Probekörper; Deutsche Fassung EN 12697-19:2012
- [6] DIN EN 13108-20: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen - Teil 20: Typprüfung; Deutsche Fassung EN 13108-20:2016
- [7] DIN 18035 - Teil 6: Sportpltze Kunststoffflchen, Ausgabe Juli 1992 (zurck-gezogen)
- [8] Goebbels, J., Meinel, D., Ntel, J., Recknagel, C.: Charakterisierung von offenporigem Asphalt mit Computertomographie, DGZfP-Jahrestagung 2007 - Poster 23, 2007
- [9] Hall, K. D., F. T. Griffith, and S. G. Williams. Examination of Operator Variability for Selected Methods for Measuring Bulk Specific Gravity of Hot Mix Asphalt Concrete. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1761, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2001, pp. 81-85.
- [10] M OPA, Merkblatt fr Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt, Köln: FGSV, Ausgabe 2013
- [11] Recknagel, C.: Verbundprojekt „Leiser Straenverkehr 2“, Teilprojekt „Strukturanalyse von Offenporigen Asphalten“ (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 74, S. 167-188, 2012
- [12] Renken, P.: Besonderheiten bei der Prüfung des Hohlraumgehaltes und des Verdichtungsgrades offenporiger Asphaltdeckschichten, Bitumen, S. 46-50, 62. Jahrgang, Heft 2, 2000
- [13] Renken, P., Wistuba, M.: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte, Schriftenreihe Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 118, Bergisch Gladbach, 2018
- [14] Ripke, O.: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen“, Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Schriftenreihe Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft 57, Bergisch Gladbach, 2009
- [15] Schi-Juehn, L.: Steuerung des Hohlraumgehaltes von Drnasphalt im Hinblick auf die Optimierung seiner bautechnischen Eigenschaften, Veröffentlichung des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 41, 1993
- [16] Schäfer, V.: Das neue Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt, Straße und Autobahn, Heft 10, S. 782-789, 2014
- [17] TL Asphalt-StB: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Köln: FGSV; Ausgabe 2007/Fassung 2013
- [18] TP Asphalt-StB: Technische Prüfvorschrift für Asphalt, TP Asphalt-StB, Teil 6: Raumdichte von Asphalt-Probekörpern, Köln: FGSV; Ausgabe 2012
- [19] TP Asphalt-StB: Technische Prüfvorschrift für Asphalt, TP Asphalt-StB, Teil 8: Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad Korngrößenverteilung, Köln: FGSV; Ausgabe 2012
- [20] TP Asphalt-StB: Technische Prüfvorschrift für Asphalt, TP Asphalt-StB, Teil 19: Durchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern, Köln: FGSV; Ausgabe 2009

- [21] TP Asphalt-StB: Technische Prüfvorschrift für Asphalt, TP Asphalt-StB, Teil 27: Probenahme, Köln: FGSV; Ausgabe 2020
- [22] TP Asphalt-StB: Technische Prüfvorschrift für Asphalt, TP Asphalt-StB, Teil 30: Herstellung von Marshall-Probe-körpern mit dem Marshall-Verdichtungs-gerät (MVG), Köln: FGSV; Ausgabe 2007
- [23] TP Asphalt-StB: Technische Prüfvorschrift für Asphalt, TP Asphalt-StB, Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probe-platten im Laboratorium mit dem Walz-sektor-Verdichtungsgerät (WSV), Köln: FGSV; Ausgabe 2007
- [24] Zhang, Y.: Extending the Lifespan of Po-rous Asphalt Concrete, Technische Universität Delft, 2015
- [25] ZTV Asphalt-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächen-befestigungen aus Asphalt, Ausgabe 2007

## Tabellen

- Tabelle 1: Kompositionelle Merkmale der Mischgüter aus den Erstprüfungen sowie geplante Schichtdicken und Abdichtungsart
- Tabelle 2: Probemengen
- Tabelle 3: Schema Stufen des Untersuchungsprogramms inkl. Prüfverfahren
- Tabelle 4: Wasserdurchlässigkeitsprüfungen
- Tabelle 5: Bestimmtheitsmaße in [%] des linearen Zusammenhangs zwischen der Raumdicke nach ASTM und der Raumdicke nach Verfahren D der TP Asphalt-StB für die MPK
- Tabelle 6: Bestimmtheitsmaße in [%] des linearen Zusammenhangs zwischen der Raumdicke nach ASTM und der Raumdicke nach Verfahren D der TP Asphalt-StB für die WSV-PK
- Tabelle 7: Bestimmtheitsmaße in [%] des linearen Zusammenhangs zwischen der Raumdicke nach ASTM und der Raumdicke nach Verfahren D der TP Asphalt-StB für die BK
- Tabelle 8: Übersicht der Regressionskoeffizienten sowie der Bestimmtheitsgrade (V1, WSV-PK, markiert:  $R^2 \geq 80\%$ )
- Tabelle 9: Übersicht der Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens und der MPK von Variante V1 (markiert:  $R^2 \geq 80\%$ )
- Tabelle 10: Übersicht aller Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens der Bohrkern von Variante V1-V6 (Grün:  $R^2 > 80\%$ )
- Tabelle 11: Übersicht der Steigungen in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens (WSV-PK, V2)
- Tabelle 12: Übersicht der Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens (MPK, V1, Grün:  $R^2 \geq 80\%$ )
- Tabelle 13: Übersicht der Steigungen in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens (BK, V6)
- Tabelle 14: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdicke nach Verfahren D (WSV-PK)
- Tabelle 15: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdicke nach ASTM (WSV-PK)
- Tabelle 16: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdicke nach Verfahren D (MPK)
- Tabelle 17: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdicke nach ASTM (MPK)
- Tabelle 18: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdicke nach Verfahren D (BK)
- Tabelle 19: Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse für die Raumdicke nach ASTM (BK)

## Bilder

- Bild 1: Hohlraumtypen in Anlehnung an LIN [1]
- Bild 2: Einhüllende von PA Probekörpern nach RENKEN [12]
- Bild 3: Vakuumgerät .
- Bild 4: Prüfprinzip der vertikalen Durchlässigkeit gem. TP Asphalt-StB, Teil 19 [20]
- Bild 5: Prüfprinzip der horizontalen Durchlässigkeit gem. TP Asphalt-StB, Teil 19 [20]
- Bild 6: Rendering aus 3D-Modell eines Asphalt- Probekörpers
- Bild 7: Computertomografie von einem Teil eines Marshall-Probekörpers
- Bild 8: Schematische Darstellung eines Histogramms von gemessenen Grauwerten [8]
- Bild 9: Übersicht der Lage der Untersuchungsstrecken .
- Bild 10: Probenahme des Mischgutes an der Verteiler- schnecke
- Bild 11: Bohrkernentnahme
- Bild 12: Bohrkern einer Untersuchungsstrecke
- Bild 13: Grundaufbau Wasserdurchlässigkeit
- Bild 14: Glaszylinder für Probekörper ( $\varnothing$  100-150 mm)
- Bild 15: Aufbau und Abdichtungsvariante des Prüfstands zur Bestimmung der horizontalen Durchlässigkeit in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 19 [20]
- Bild 16: 3D-Scan eines Bohrkerns von der Vorder- und Rückseite
- Bild 17: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V1
- Bild 18: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V1
- Bild 19: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V2
- Bild 20: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V2
- Bild 21: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V3
- Bild 22: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V3
- Bild 23: Ansicht der PA-Schicht des BK 1.2 der Entnahmestelle 1 (links) und des BK 2.2 der Entnahmestelle 2 (rechts) der V4
- Bild 24: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 1
- Bild 25: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 2
- Bild 26: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 1
- Bild 27: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V4, Entnahmestelle 2
- Bild 28: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V5
- Bild 29: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V5

- Bild 30: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V6
- Bild 31: Box-Plot-Diagramm der Hohlraumgehalte der Raumdichten nach Verfahren D für die einzelnen Probekörperarten der Variante V6
- Bild 32: Zeitlicher Verlauf der Raumdichten im Wasserbad nach Vakuumabdichtung (V1), durchgezogene Linie: Probekörper der Entnahmestelle 1, gestrichelte Linie: Entnahmestelle 2
- Bild 33: Box-Plot Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten und in Abhängigkeit der Dauer im Wasserbad von Variante V1
- Bild 34: Box-Plot Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten und in Abhängigkeit der Dauer im Wasserbad von Variante V2
- Bild 35: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V3
- Bild 36: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V4, Entnahmestelle 1
- Bild 37: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V4, Entnahmestelle 2
- Bild 38: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V5
- Bild 39: Box-Plot-Diagramm der Raumdichten nach ASTM für die einzelnen Probekörperarten nach 10 Minuten im Wasserbad von Variante V6
- Bild 40: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V1
- Bild 41: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V2
- Bild 42: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V2 an der Entnahmestelle 1 (1-1 bis 1-4)
- Bild 43: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V2 an der Entnahmestelle 2 (2-1 bis 2-4)
- Bild 44: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V3
- Bild 45: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V4 an der Entnahmestelle 1 (1-1 bis 1-4)
- Bild 46: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V2 an der Entnahmestelle 4 (2-1 bis 2-4)
- Bild 47: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V5
- Bild 48: Vertikale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart für die Variante V6
- Bild 49: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V1
- Bild 50: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V2
- Bild 51: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V3
- Bild 52: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V4, Entnahmestelle 1
- Bild 53: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V4, Entnahmestelle 2

- Bild 54: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V5
- Bild 55: Horizontale Wasserdurchlässigkeit, sortiert nach Versuchsaufbau, Stufe und Probekörperart der Variante V6
- Bild 56: Raumdichte an ausgewählten Probekörpern der Variante V4 bestimmt auf der Grundlage von 3D-Scans
- Bild 57: Raumdichte an ausgewählten Probekörpern der Variante V5 bestimmt auf der Grundlage von 3D-Scans
- Bild 58: Raumdichte an ausgewählten Probekörpern der Variante V6 bestimmt auf der Grundlage von 3D-Scans
- Bild 59: Darstellung des 3D-Modells eines MPK in Stufe 0
- Bild 60: Raumdichten am MPK nach Verfahren D über der Raumdichte nach ASTM (V2)
- Bild 61: Gegenüberstellung der Raumdichten nach Verfahren D bzw. ASTM und den mittels HandyScan bestimmten Raumdichten der Strecke V5 in Stufe 0
- Bild 62: Gegenüberstellung der Raumdichten nach Verfahren D bzw. ASTM und den mittels HandyScan bestimmten Raumdichten der Strecke V5 in Stufe 3
- Bild 63: Gegenüberstellung des 3D-Modells mit den in Stufe 3 aufgenommenen Fotos von Bohrkern 2-2
- Bild 64: Raumdichten der Proben aus Stufe 0 und Stufe 3 mittels 3D-Scan über der Raumdichte nach Verfahren D (V5)
- Bild 65: Raumdichten der Proben aus Stufe 0 und Stufe 3 mittels 3D-Scan über der Raumdichte nach ASTM (V5)
- Bild 66: Ermittelte Spannweiten der bestimmten Raumdichten für die MPK (V3-V6)
- Bild 67: Ermittelte Spannweiten der bestimmten Hohlraumgehalte für die MPK (V3-V6)
- Bild 68: Vertikale Wasserdurchlässigkeit TP(V) über dem Hohlraumgehalt V nach den TP Asphalt-StB und ASTM der Variante V1
- Bild 69: Horizontale Wasserdurchlässigkeit über dem Hohlraumgehalt V nach den TP Asphalt-StB und ASTM der Variante V1
- Bild 70: Änderung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex (V1, WSV-PK)
- Bild 71: Änderung der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit vom Rauigkeitsindex (V1, WSV-PK)
- Bild 72: Änderung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex (V1, MPK)
- Bild 73: Änderung der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex (V1, MPK)
- Bild 74: Regressionsanalyse der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex für Variante V1 für die Bohrkern
- Bild 75: Regressionsanalyse der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex für Variante V1 für die Bohrkern
- Bild 76: Grafische Darstellung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (WSV-PK, V2)
- Bild 77: Regressionsanalyse der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (MPK, V1)
- Bild 78: Regressionsanalyse der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (MPK, V1)
- Bild 79: Grafische Darstellung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (BK, V6)

Bild 80: Grafische Darstellung der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Probekörperhöhe (BK, V6)

Bild 81: Regressionsanalyse der Raumdichte nach ASTM in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex für Variante V2 für die Bohrkerne

# Schriftenreihe

## Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Straßenwesen“

### 2023

**S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen**

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

**S 188: Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörrnitz**

Kuhnsch

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

**S 189: Optimierung der Zusammensetzung Offenporiger Asphalte zur Verbesserung des Nutzungsverhaltens**

Radenberg, Breddemann

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

**S 190: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Bauweisen mit Betondecke der Belastungskategorie Bk100**

Ressel, Engel, Ferraro, Alber, Garrecht, Mielich, Wellner, Kamratowsky, Kraft

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

**S 191: Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteilanteilen**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher, Schindler

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

**S 192: Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen**

Čičković, Bald, Middendorf

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

**S 193: Materialsteifigkeit des Straßenbetons im Verlauf des Ermüdungsprozesses**

Bolz, Wellner, Lindner, Schulze

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

**S 194: Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur**

**Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen**

Wellner, Sommer, Clauß, Spanier, Villaret, Tschernack, Villaret, Gebhardt

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

**S 195: Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement**

Berthold, Großmann

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

**S 196: Eignung konventioneller Prüfverfahren für Recycling-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte im Erdbau**

Huber, Birle, Heyer, Demond

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

**S 197: Lösungsstudie zur Umsetzung der ASR A5.2 im Kontext mit der Herstellung von Betonfahrbahndecken**

Tschernack, Gebhardt, Villaret

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

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

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

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

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

Steffen, Brendel

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

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

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

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

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

Breitenbücher, Neumann, Curbach, Baumgärtel

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

## 2024

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

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Müller

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

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

Beckenbauer, Gebhardt, Riwe, Tschernack, Villaret

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

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

Moormann, Liebl, Schlee

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

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

Roos, Plachkova-Dzhurova, Schwarzmann

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

---

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](http://www.schuenemann-verlag.de)

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



ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-808-9  
<https://doi.org/10.60850/bericht-s205>

[www.bast.de](http://www.bast.de)