

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

FA 7.302

Forschungsstelle: Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen  
(ISE) (Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. R. Roos)

Bearbeiter: Plachkova-Dzhurova, P. / Schwarzmann, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale  
Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2022

### 1 Einleitung

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 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 Verdichtungszustand möglichst genau zu bestimmen. Aufgrund der offenporigen Struktur wird aktuell das Ausmessverfahren (Verfahren D) nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 angewendet. Dieses 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.

Das Ziel des Projekts war es deshalb, 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 das Untersuchungsprogramm so aufgestellt, um zum einen das bisher nach Regelwerk für offenporigen Asphalt anzuwendende Ausmessverfahren 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 (WSV-PK), als auch Marshall-Probekörper (MPK) und

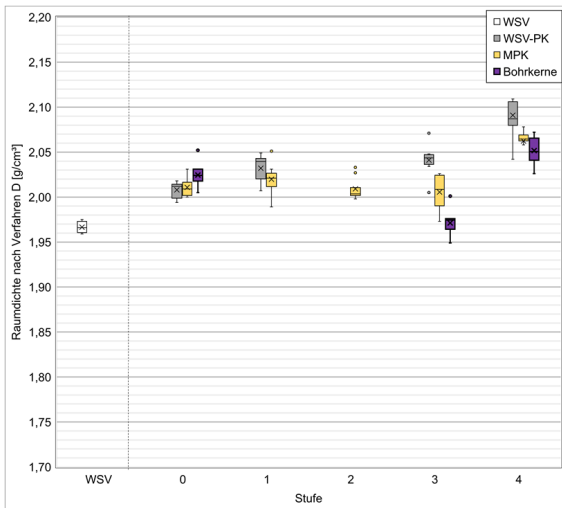
Bohrkernproben aus der fertigen Schicht (BK) hergestellt und verglichen. Die Probekörper weisen Unterschiede in den geschliffenen Flächen (Ober-/Unterseite, Mantelfläche) und Variationen der Dicke auf. Aus diesem Grund wurden diese in mehreren Bearbeitungsstufen (Stufe WSV, 0 bis 4) untersucht. Durch Abschleifen der Unter- oder Oberseite wurde dementsprechend schrittweise die Rauigkeit und auch die Probekörperhöhe reduziert. 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 3D-Scan ("HandyScan")
- TP Asphalt-StB Teil 19, Durchlässigkeit von Asphalt-Probekörpern

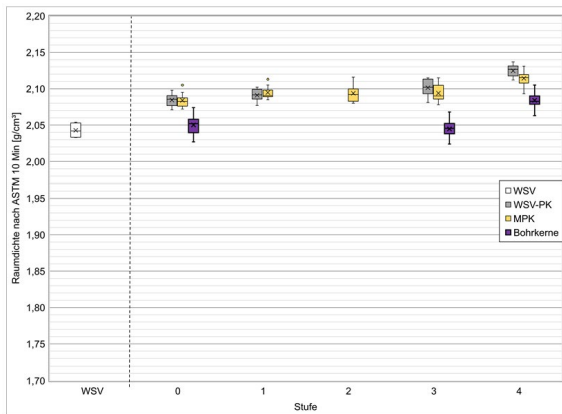
### 2 Ergebnisse Raumdichteverfahren

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. In Bild 1 sind beispielhaft die Raumdichten der Variante V1 in Form von Box-Plots dargestellt. Die statistischen Kenngrößen 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 beziehungsweise unterhalb der Antennen), Median (Querstrich in der Box) und Mittelwert (Kreuz) sind direkt erkennbar.

Die mit dem ASTM ermittelten Raumdichten liegen grundsätzlich auf einem höheren Niveau als die Raumdichten, 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. In Bild 2 sind beispielhaft die Ergebnisse von V1 dargestellt.



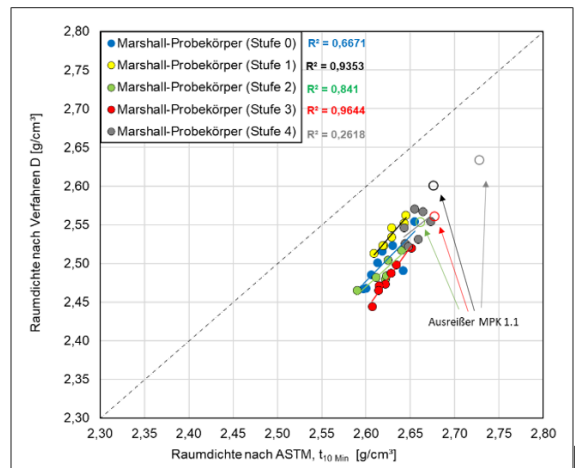
**Bild 1: Raumdichten nach Verfahren D (V1)**



**Bild 2: Raumdichten nach ASTM (V1)**

Bei einem direkten Vergleich der beiden Verfahren zeigt sich noch mal deutlich, dass die Raumdichten nach dem Verfahren D grundsätzlich kleiner sind als die Raumdichten, die nach den ASTM berechnet werden. Diese Beobachtung trifft für alle Probekörperarten zu. 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 aufgebrachte Vakuum die Folie an die oberflächennahen Hohlräume an, sodass diese nicht zum Volumen gezählt werden.

In Bild 3 sind beispielhaft für die Marshall-Probekörper der Variante V2 die Zusammenhänge grafisch zwischen den Raumdichten nach Verfahren D und denjenigen nach dem Verfahren nach ASTM dargestellt. Die einzelnen Stufen 0 bis 4 sind dabei farblich gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass ein guter Zusammenhang zwischen den beiden Verfahren besteht.



**Bild 3: Raumdichten am MPK nach Verfahren D über der Raumdichte nach ASTM (V2)**

Die Zusammenhänge wurden auch für die anderen Varianten und Probekörperarten bestätigt. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße zeigen, dass die Korrelationen bei den Marshall-Probekörpern und bei den WSV-Probekörpern grundsätzlich besser sind als diejenigen bei den Bohrkernen. Dies erscheint plausibel, da bei den Probekörpern im Labor eine reproduzierbarere 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.

Die durchgeführten Messungen unter Wiederhol- beziehungsweise 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.

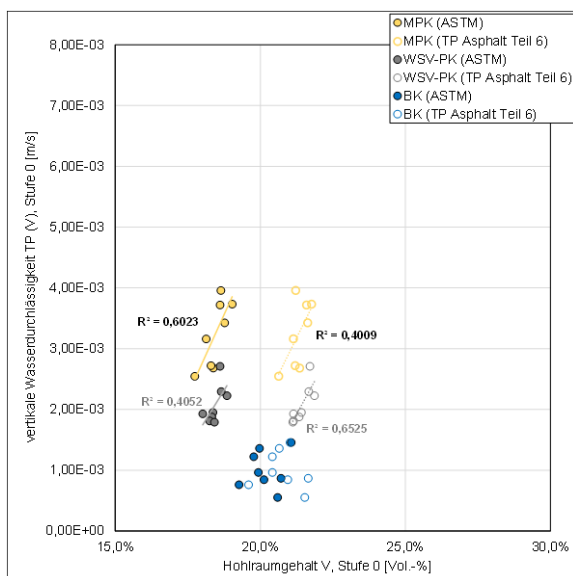
Eine noch bessere Erfassung der oberflächennahen Hohlräume kann nur durch Scanverfahren wie den im Rahmen des Forschungsprojekts angewendeten 3D-HandyScan erreicht werden. Es hat sich gezeigt, dass die Oberfläche sehr gut abgetastet wird und ein reales Bild der Morphologie entsteht, jedoch die mathematische 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.

### 3 Ergebnisse Wasserdurchlässigkeit

Die grundsätzliche Erwartungshaltung bei der Wasserdurchlässigkeit ist, dass die Durchlässigkeit in einer gewissen Form mit dem Hohlraumgehalt und damit auch automatisch mit der Raumdicke in Verbindung steht. Hohe Hohlraumgehalte sollten in aller Regel auch hohe Durchlässigkeiten nach 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 4 ist die vertikale Durchlässigkeit TP(V) von V1 über dem Hohlraumgehalt aus der Raumdicke nach Vakuumabdichtung (ASTM) und nach den TP Asphalt-StB, Teil 6 berechneten Hohlraumgehalte 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 beziehungsweise 65 %. Die Ergebnisse der Bohrkern liegen als Punktwolken im Diagramm und ergeben keinen sinnvollen Zusammenhang.

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

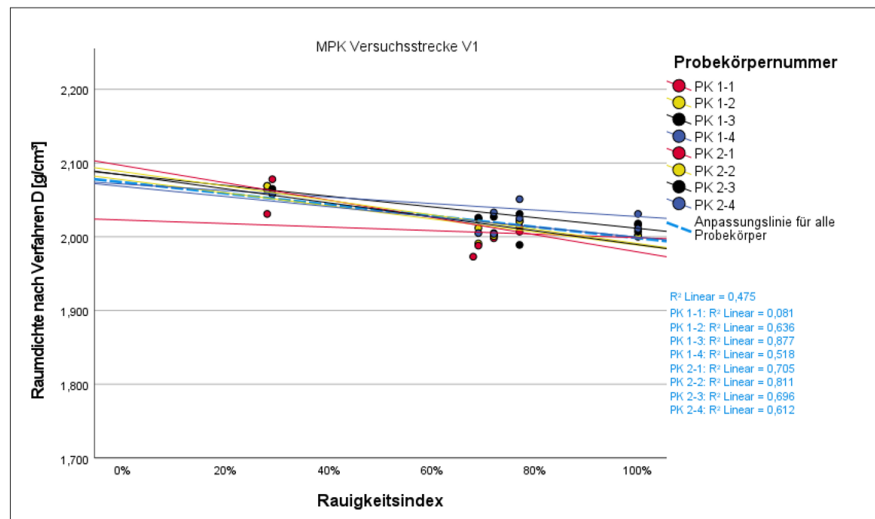


**Bild 4:** Vertikale Wasserdurchlässigkeit TP(V) über dem Hohlraumgehalt V nach den TP Asphalt-StB und ASTM der Variante V1

Resümierend lässt sich feststellen, dass sich die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit als indirekte Methode zur Bestimmung beziehungsweise Beurteilung der Raumdicke respektive des Hohlraumgehalts als nicht zielführend erwiesen hat. 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- beziehungsweise 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 mithilfe 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.

### 4 Einflüsse auf die Ergebnisse

In Abhängigkeit der Probekörperart (MPK, Bohrkern und WSV-Probekörper) sowie der Stufe sind die Außenseiten der Probekörper entsprechend unterschiedlich rau. Daher wurde zur Beurteilung des Einflusses der herstellungsbedingten Makrorauheit auf die bestimmte Raumdicke der sogenannte "Rauigkeitsindex" eingeführt. Aufgrund der Vorüberlegungen sollte die Raumdicke 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 Verfahren nach ASTM sollte der Einfluss auf die ermittelten Raumdichten weniger ausgeprägt sein, da die Oberflächenstruktur durch die dicht anliegende Plastikfolie genauer erfasst wird.



**Bild 5:** Änderung der Raumdichte nach Verfahren D in Abhängigkeit des Rauigkeitsindex (V1, MPK)

Die statistischen Auswertungen haben den Einfluss der Probekörperhöhe und der Rauigkeit auf die Raumdichten nach Verfahren D bestätigt. Am Beispiel der MPK der V1 in Bild 5 kann festgehalten werden, dass diese zu Beginn allseitig rau sind, das heißt, sie haben einen Rauigkeitsindex von 100 % und am Ende ist nur noch die Mantelfläche rau, das heißt 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 plausible lineare Zusammenhänge zu erkennen. Die Steigungen der Regressionsgeraden fallen in der Regel bei dem Verfahren nach ASTM kleiner aus als beim Verfahren D, was ein Indiz dafür ist, dass der Einfluss der Rauigkeit bei dem Vakuumverfahren kleiner ist als bei dem Ausmessverfahren (siehe Tabelle 1).

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 zum Beispiel 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.

**Tabelle 1:** Übersicht der Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit des Raumdichteverfahrens und der MPK von Variante V1 (markiert: R² ≥ 80%)

Einfluss	Rauigkeit	Verfahren D			ASTM			
		Stelle	Probekörper	m	n	R²	m	n
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

## 5 Empfehlungen

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. 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 entsprechend von der Unterseite viel Material weggenommen werden muss.

Um den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit zu reduzieren, sollte im Labor zur Bestimmung des Verdichtungsgrads die Bezugsraumdichte an entsprechend vorbereiteten WSV-Probekörpern ermittelt werden. Herstellungsbedingt haben diese, analog den Bohrkernen aus der Straße, eine glatte Mantelfläche. Nach dem Sägen beziehungsweise 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 WSV-Platten aufgrund der Verdichtungsart eher vergleichbar mit den Bohrkernen. Das Verdichtungsregime sollte nach M OPA gewählt werden oder einer weiteren Optimierung unterzogen werden. Dazu sollten jedoch weitere Untersuchungen mit Mischgut, das während des Einbaus entnommen wird und mit variierenden Regime-Optionen im Labor verdichtet wird, durchgeführt werden. Die Marshall-Probekörper, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt zur Bestimmung der Bezugsraumdichte herangezogen werden, sind aufgrund 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

beziehungsweise der Raumdichte nicht geeignet sind. Es wird empfohlen, auf Wasserdurchlässigkeitsprüfungen im Zusammenhang mit der Raumdichtebestimmung von offenporigem Asphaltmischgut in Zukunft 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. Es wird daher empfohlen, diesen Ansatz weiter zu verfolgen und für künftige Raumdichtebestimmungen an offenporigen Asphaltarten die Prüfung nach ASTM D6752/D6752M-18 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 Projekts wird dazu empfohlen, die Folienstärke auf den festen Wert von 150  $\mu\text{m}$  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.