

Beschreibung zum Forschungsantrag

1. Forschungsthema

Ermittlung und Parametrisierung der Hohlraumverteilung in Asphaltprobekörpern durch asphaltpetrologische Methoden

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Vorstellung von Qualität und Qualitätsprüfung im Asphaltstraßenbau wird noch heute durch das „Technical Memorandum -Investigation of the Design and Control of Asphalt Paving Mixtures“ [Department of the Army Corps of Engineers, 1948] geprägt. Dieses Werk entstand im Kontext gestiegener Verkehrsbeanspruchungen und höheren Bauaufkommens während des zweiten Weltkrieges in den USA und sollte die Qualitätssicherung der Straßenbauwerke durch Anforderungswerte und zugehörige, einfach durchzuführende Laborversuche gewährleisten, wodurch gleichzeitig jedoch die optische Gefügebeurteilung in den Hintergrund geriet.

Dabei spielen Parameter des inneren Gefüges einer Asphaltsschicht eine wichtige Rolle für die späteren Gebrauchseigenschaften. Dazu zählen sowohl die Verteilung der Gesteinskörnung, örtliche Ansammlungen von Mastix, Größe und Verteilung von Hohlräumen, sowie das Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen. All diese Faktoren können Einflüsse auf die Verformungsresistenz, die Anfälligkeit gegenüber der Einwirkung von Wasser und Sauerstoff und damit verbunden auf die Dauerhaftigkeit der Asphaltbefestigung haben. In den standardisierten Prüfverfahren für Asphalte sind ebendiese Gefügemerkmale unterrepräsentiert.

In dem hier beantragten Forschungsvorhaben soll das Augenmerk auf den Parameter Hohlraum gelegt werden. Dieser wird zurzeit mit einem volumetrischen Absoluthohlraumgehalt (in Prozent des Gesamprobenvolumens) angegeben. In der Regel wird er ermittelt, indem die Raumdichte eines Asphaltprobekörpers mittels Tauchwägung nach dem archimedischen Prinzip bestimmt und in Beziehung zur Rohdichte des Materials gesetzt wird, welche zuvor ebenfalls durch ein Wägev erfahren bestimmt wurde. Sowohl das Verfahren der Raumdichtebestimmung (in Deutschland nach den TP Asphalt-StB, Teil 8 [FGSV, 2012]) als auch das Verfahren der Rohdichtebestimmung (TP Asphalt-StB, Teil 5 [FGSV, 2013]) sind dabei streuungsbehaftet und verfälschen somit den daraus errechneten Hohlraumgehalt. Darüber hinaus ist das so ermittelte Ergebnis ein Mittelwert ohne Information über die Geometrie und Verteilung der Hohlräume im Probekörper. Dessen ungeachtet wird dieser unspezifische Mittelwert regelmäßig zur Beurteilung komplexerer technischer Wirkungszusammenhänge wie z.B. die Durchlässigkeit für Wasser bzw. Luft oder die Standfestigkeit herangezogen. In diesem Kontext haben Absoluthohlraumgehalte als Grenzkriterien auch Eingang in

das Regelwerk gefunden. Es ist jedoch offensichtlich, dass Lage, Größe und Geometrie (Morphologie) von Hohlräumen in einem mehrphasigen Baustoff abhängig von dessen Zusammensetzung und Bearbeitung (z.B. Mischung und Verdichtung) sind und Einfluss auf seine technischen Eigenschaften nehmen müssen. Als Beispiel sei eine überverdichtete Asphaltdeckschicht genannt, deren Hohlraumgehalt durch Mörtelaufstieg oberflächennah deutlich geringer ist als im unteren Schichtbereich. Eine solche Schicht kann zwar die regelwerkseitigen Anforderungen an einen mittleren Absoluthohlraumgehalt erfüllen, ist aber dennoch technisch problematisch z.B. aufgrund einer erhöhten Verformungsanfälligkeit und ungenügender Griffigkeit an der Oberfläche. Auch die Vernetzung von Hohlräumen trägt zu den Schichteigenschaften bei. So kann ein Asphalt viele kleine und isolierte Hohlräume aufweisen. Bei gleichem Absoluthohlraumgehalt kann das Hohlraumgefüge eines anderen Asphaltes jedoch aus einer geringen Anzahl großer und vernetzter Hohlräume bestehen. Ein Asphalt mit der letztgenannten Hohlraumanordnung ist eher anfällig für Frostschädigungen oder Rissentwicklung. Gelegentlich suggerieren konventionelle Untersuchungen sogar zunächst einen Einbauerfolg, der vor Ablauf der Frist für Mängelansprüche trotzdem zu Gewährleistungsarbeiten und damit einem hohen Ausführungsrisiko führt. So werden immer wieder Asphaltdeckschichten als anforderungskonform festgestellt, die bereits augenscheinlich auffällig sind und im Laufe der Frist für Mängelansprüche beanstandet werden. Ursache kann eine ungünstige Hohlraumverteilung über die Dicke einer Schicht sein, die aber trotzdem einen zulässigen Gesamthohlraumgehalt aufweist. Bei einigen Sonderasphalten werden darüber hinaus gezielt spezifische Hohlraumgefüge angestrebt, um verschiedene Nutzungseigenschaften zu gewährleisten. So sollen offenporige Asphalte (PA) ein über die Höhe gleichmäßig verteiltes, verbundenes Hohlraumnetz aufweisen, um Schallenergie zu absorbieren bzw. Wasser abzuleiten. Diese Beispiele zeigen, dass es für viele Fragestellungen der Qualitätsplanung und Qualitätsprüfung im Asphaltstraßenbau nicht ausreicht, das Hohlraumgefüge von Asphalten mittels einer einzelnen Zahl zu beschreiben. Die Qualität einer eingebauten Schicht, insbesondere ihre innere Gefügestruktur, kann hingegen nur durch differenziertere Hohlraumanalysen beurteilt werden. Eine solche Ermittlung von Verteilungen zur räumlichen Anordnung und Größen von Hohlräumen wäre insofern aufschlussreich, als sie den Baubeteiligten geeignete Informationen zur stetigen Optimierung von Baustoffgemischen und Einbauprozessen hinsichtlich einer günstigeren Hohlraumverteilung bereitstellt. Mit konventionellen Methoden, wie z.B. Tauchwägungen, sind solch differenzierte Gefügebetrachtungen praktisch nicht möglich. Für ausführende KMU des Asphaltstraßenbaus ist die Unkenntnis des Hohlraumgefüges mit einem hohen Gewährleistungsrisiko verbunden. Insbesondere zur Herstellung unregelmäßiger Flächen aus Asphalt mit hohen Anforderungen an die Einbauqualität (z.B. kommunale Straßen und Plätze) werden häufig KMU beauftragt. Sie können bei Reklamationen hinsichtlich der

Einbauqualität nicht auf differenzierte Untersuchungen zurückgreifen. Die Ursachen des mangelhaften Einbauergebnisses sind somit für sie nachträglich kaum noch erklärbar und können auch in künftigen Projekten nicht abgestellt werden. Gleiches gilt für den Bau von Verkehrswegen mit überörtlicher Verbindungsfunktion, der ebenfalls Betätigungsfeld von KMU ist. Die in dieser Projektbeschreibung vorgeschlagenen Untersuchungen schaffen die Möglichkeit, die Strukturen von Asphaltbefestigungen sichtbar zu machen. Durch Dokumentation der zugrundeliegenden Material- und Einbaubedingungen, sowie Erfahrungssammlung und -austausch können bereits kurzfristig Zusammenhänge erkannt und Strukturen beim Einbau systematisch hinsichtlich eines geeigneten Gefüges beeinflusst werden. Der Hohlraum, seine Verteilung und sein Anteil sollen dabei als wichtigste Parameter zuerst angesprochen werden. Durch entsprechende Weiterentwicklung der Auswertemethodik können an Probekörpern, die mit den im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Techniken präpariert wurden, auch weitere Analysen, z.B. hinsichtlich Korngrößenverteilungen, Kornausrichtungen oder Mastixgehalten durchgeführt werden. Hierdurch lägen den KMU ohne zusätzlichen Aufwand weitere wichtige Erkenntnisse zur Qualitätssicherung vor. Die angedachten Verfahren sollen dabei mittelfristig das bestehende Regelwerk ergänzen und damit zu weiteren Qualitätsverbesserung von Asphaltbefestigungen führen.

Neben den erwähnten Lerneffekten für asphalttechnologische Zusammenhänge und der Verbesserung der Einbauqualität, sowie einer geeigneteren Qualitätsbeurteilung, bieten sich durch die vorgeschlagenen Verfahren auch Ansatzpunkte für eine Produktentwicklung durch KMU. Denkbar ist in diesem Zusammenhang die Konzeption (teil-)automatisierter Präparations- und Auswertegeräte.

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Die beschriebene Problemstellung und ihre Lösung sind von großer volks- und betriebswirtschaftlicher Relevanz. Es gilt, eine effiziente Straßeninfrastruktur unter optimiertem Einsatz natürlicher und monetärer Ressourcen bereitzustellen. Die Einbauqualität ist dabei auch heute noch in hohem Maße von individuellen Erfahrungen abhängig und nur schwer rational bzw. automatisiert zu steuern. So kommt es durch misslungene Abstimmung der Materialien und Einbau-/Verdichtungsverfahren zu unnötig häufigen Sanierungsarbeiten. Die damit verbundenen Streitigkeiten und Kosten stellen ein erhebliches wirtschaftliches Risiko für die KMU im Asphaltstraßenbau dar und führen nicht zwangsläufig zu einer langfristigen Qualitätsverbesserung. Zudem verhindert die Beseitigung von vermeidbaren Schäden die optimale Nutzung des Verkehrsnetzes und lässt Zeitverzögerungen für Pendler und Transporte entstehen. Die im Forschungsprojekt entwickelten Methoden können KMU im

Anschluss als Anleitungen, sowie in Workshops zur Verfügung gestellt werden. Das Verfahren soll dabei so einfach wie möglich gestaltet werden, dass die Durchführung schnell, problemlos und im besten Fall sogar baubegleitend erfolgen kann. Die gewonnenen Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Mischgut- und Einbauparameter können den KMU vermittelt werden. Somit ist es für sie möglich den Einfluss ihrer Arbeitsschritte auf die Qualität ihrer Leistung nachvollziehen und im Sinne eines lebenszyklusorientierten Qualitätsverständnisses stete Verbesserungen in Folgeprojekten generieren. Eine solche Qualitätsverbesserung sichert langfristig die Wettbewerbsfähigkeit der KMU und könnte durch entsprechenden Erfahrungsaustausch auch einen brancheninternen „Qualitätswettbewerb“ anstoßen. Die Untersuchungsergebnisse liegen darüber hinaus nicht nur in abstrakten Zahlen vor, welche einer fachkundigen Interpretation bedürfen, sondern werden auch bildlich veranschaulicht, was sie einer breiteren Zielgruppe verständlich zugänglich macht. Hierdurch wird es möglich, Qualitätsgedanken auch auf der Ausführungsebene zu diskutieren und praktische Erkenntnisse mit theoretischen Überlegungen zu verknüpfen. Eine Berücksichtigung des räumlichen Hohlraumgefüges bei der Qualitätssicherung und -prüfung scheint insbesondere bei der zunehmenden Anzahl von Sonderasphalten mit charakteristischen Anforderungen an eine bestimmte Hohlraumverteilung geboten. KMU, die diese Entwicklung durch Überprüfung der eigenen Leistungsfähigkeit begleiten, können sich hier Wettbewerbsvorteile verschaffen. Für KMU der Prüftechnikbranche öffnen sich zudem neue Geschäftsfelder in der Konstruktion entsprechender Präparations- und Analysegeräte. Hier ergeben sich durch den Baustoff Asphalt Anforderungen, die von bestehenden Prüfgeräten aus anderen Branchen nur bedingt erfüllt werden. Auch Prüfstellen als Kleinunternehmen können ihre Wettbewerbsposition durch Expertise auf diesem neuen Prüfgebiet stärken. Existenzgründungen auf diesem Gebiet sind nicht ausgeschlossen.

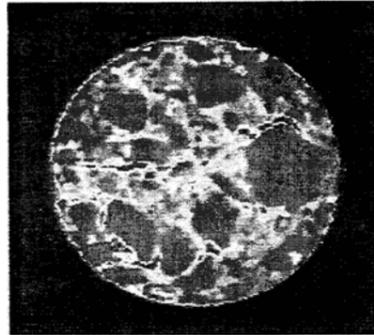
3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

Für eine umfassende Charakterisierung des Hohlraumgefüges in einem Asphaltprüfkörper erscheinen optische Verfahren am geeignetsten. Hierbei wurde in der Literaturrecherche besonderes Augenmerk auf die röntgenoptische CT-Analyse, die in Verbindung mit Asphalt bereits erprobt wurde, und die lichtoptische Analyse von An- und Dünnschliffen, die im Asphaltbereich bisher kaum Beachtung findet, gelegt. Die beiden Methoden werden im Folgenden mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.

In der internationalen Forschung des Asphaltstraßenbaus wurde die Beurteilung des Hohlraumgefüges lange Zeit vernachlässigt. Mit dem Aufkommen der Computertomographie (CT) in der Humanmedizin in den 1970er Jahren wurde eine Entwicklung ausgelöst, welche versuchte, die Technik auch auf die zerstörungsfreie Prüfung von Materialgefügen zu übertragen [Kalender, 2006]. Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren zur Visualisierung von Dichtestrukturen in einem Prüfkörper, das auf der gemessenen Abschwächung von Röntgenstrahlen aus unterschiedlichen Durchstrahlungsrichtungen und deren rechnerischer Verarbeitung basiert. Während beim klassischen Röntgenverfahren lediglich ein einziges Schattenbild der in Durchstrahlungsrichtung überlagerten Dichtestrukturen erzeugt wird, können mittels Computertomographie beliebige Schnittebenen mit sehr geringen Überlagerungsstörungen betrachtet werden. An den Schnittbildern werden dann einzelne Bildpunkte des Gefüges anhand ihrer errechneten Dichte grauwertcodiert dargestellt. Hohlräume erscheinen schwarz, Mastix grau und Grobkorn (je nach Mineralstoffrohndichte) hellgrau. Zur qualitativen Beurteilung werden häufig nur die grauwertcodierten Rohbilder betrachtet. Zur automatisierten Quantifizierung von Gestalt- und Verteilungsparametern müssen jedoch Bildanalysealgorithmen angewandt werden. Selbige können die Pixel mit gewünschten Grauwerten (z.B. die Hohlraumphase) anhand von pixelorientierten, konturorientierten oder regionenorientierten Segmentierungsverfahren isolieren. Meist werden hierzu pixelorientierte Schwellenwertverfahren genutzt. Durch Objekterkennungsalgorithmen kann dann die isolierte Menge der Pixel gleichartiger Grauwerte in Einzelobjekte (Hohlräume) unterteilt werden. Diese Extraktion von Einzelobjekten wurde aber an CT-Aufnahmen von Asphalten erst exemplarisch erprobt. Die ersten Anwendungen von Hohlraumanalysen an CT-Aufnahmen von Asphaltprobekörpern wurden in der Schweiz im Jahr 1983 dokumentiert. Partl (1983) erstellte erste CT-Aufnahmen von Gussasphaltprobekörpern, in denen er zerstörungsfrei Hohlraumeinschlüsse mit einem Durchmesser von ca. 2,0 mm nachweisen konnte. Eine vergleichsweise schwache Röntgenquelle (60 keV) limitierte jedoch den maximalen Probekörperdurchmesser auf ca. 50 mm und die identifizierbare Mindestgröße von Strukturunterschieden auf $> 0,7$ mm. In den USA wurden im Rahmen eines 1989 an die University of Southern California vergebenen SHRP-Projektes (SHRP-A-656) innovative Methoden zur Erforschung der Materialeigenschaften von Asphalten entwickelt. Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes war die Bestimmung der Eignung von CT-Scannern zur Gefügebeurteilung von Asphalten, sowie die Entwicklung eines Standard-Scanverfahrens mit Auswertalgorithmen. In der daraus hervorgegangenen Veröffentlichung von Synolakis et al. (1993) wird die systematische Erprobung der unterschiedlichen Scan-Parameter und damaligen Auflösungsgrenzen diskutiert. Die Autoren schlagen eine Schichtdicke von 3 mm vor, wobei die kleinste detektierbare Objektgröße bei ca. 1 mm liegt. Die resultierende Unschärfe, besonders in Bereichen mit geringer Dichte (siehe invertierte Abbildung

unten), ist nicht zuletzt der Grund, weshalb die Autoren eine Bestimmung der Hohlraumverteilung mit der genutzten Technik (130 keV Röntgenquelle) ausschließen. Anschließende Veröffentlichungen der Autoren zielten daher verstärkt auf die Analyse von Verformungen ab (z.B. Hatebur, 1991; Synolakis et al., 1995).



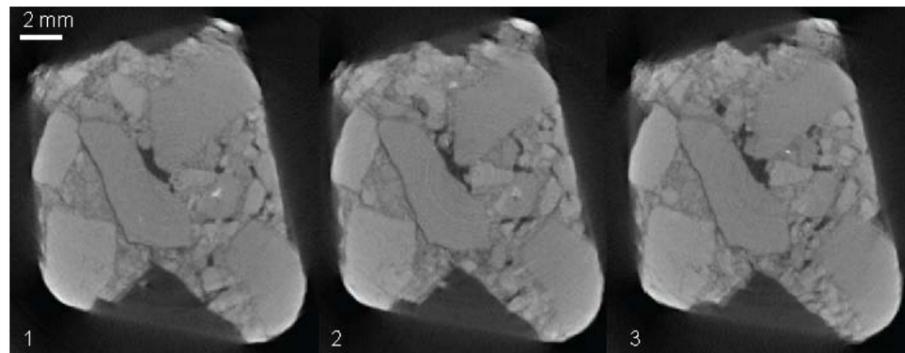
Invertierte CT-Aufnahme eines Bohrkerns mit grobkörnigem Mischgut aus dem SHRP-Projekt [Synolakis et al., 1993]

Einen deutlichen Aufschwung hat das CT-Verfahren in der Asphaltforschung später in den USA erfahren (v.a. ausgehend von Masad et al. (1999) und Shashidhar (1999)), wobei erstmals auch der Fokus auf der Analyse der Hohlraumverteilungen lag. In Europa wurden systematische Hohlraumanalysen an CT-Schnittbildern (soweit bekannt) erstmals durch Remijn (2005) und Nielsen (2007 a/b) durchgeführt. Weitere Arbeiten sind aus Südamerika und Asien bekannt.

In den zahlreichen Veröffentlichungen aus dieser Zeit haben sich diverse Anwendungsfelder für Hohlraumanalysen herauskristallisiert. Hierzu gehören unter anderem:

- Vergleich der Verdichtung von Laborprobekörpern und Ausbauproben
- Untersuchung der Durchlässigkeit von Asphalten
- Untersuchung der Gleichmäßigkeit von Asphalten
- Schadensanalysen
- Dreidimensionale Modellierung von Asphalten

Häufig wird dabei die begrenzte Auflösung der Schnittbilder als limitierender Faktor des Erkenntnisgewinns genannt, wobei hier mit der Zeit Steigerungen in begrenztem Umfang erzielt werden konnten. So konnte in der Schweiz die maximale Probekörpergröße bereits früh auf 300 mm erhöht und die kleinste detektierbare Größe auf 0,2 mm verringert werden (siehe Jönsson et al. 2002)). Hierzu kam ein Computertomograph mit einer stärkeren Röntgenquelle zum Einsatz. Weitere Auflösungssteigerungen wurden hingegen durch den Einsatz von Mikro-bzw. Nano-CT-Systemen (high resolution CT (HRCT)) mit mikrofokaler Röntgenquelle erzielt. Dabei können zwar nur kleine Probekörperbereiche erfasst werden, diese jedoch mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern. Nachstehende Abbildung zeigt die erreichbare Auflösung eines modernen HRCT-Systems am Beispiel eines Ausbaustückes einer geschädigten Asphaltbefestigung.



HRCT-Schnittbilder in unterschiedlichen Tiefen eines Ausbaustückes einer geschädigten Asphaltbefestigung [Gopalakrishnan et al., 2006]

Für die Untersuchung des Hohlraumgefüges ganzer Asphaltprobekörper sind hochauflösende HRCT-Aufnahmen aufgrund der kleinen Ausschnittgröße jedoch ungeeignet. Normale CT-Systeme, die ganze Probekörper scannen können, haben hingegen eine zu geringe Auflösung. Aufgrund dieser Limitierungen wurde die Computertomographie für die angestrebten Untersuchungen als ungeeignet eingestuft.

Zudem sind die Untersuchungen nur mit hohem Kostenaufwand zu realisieren. Eine Anwendung in KMU wäre hier nicht möglich, schon gar nicht in eigenen Räumlichkeiten.

Der Fokus wird daher auf die Analyse von An- und Dünnschliffen gerichtet. Diese Methoden sind ursprünglich der Petrologie und Mineralogie zuzuschreiben. In den der Mitte des letzten Jahrhunderts wurde der Nutzen von petrographischen Analysen in der Betontechnik wahrgenommen. Besonders in den 50er und 60er Jahren wurde viel Pionierarbeit auf diesem Gebiet geleistet (Walker, Lane & Stutzman, 2006). Heute ist die Betonpetrographie ein eigener Berufszweig, der häufig von Geologen, Mineralogen oder Materialwissenschaftlern ausgeübt wird. Anwendung finden die An- und Dünnschliffanalysen, sowie weitere Methoden (z.B. Rasterelektronenmikroskopie) insbesondere bei Schadensfällen. Die Erfahrung zeigt, dass die Betonpetrographie eine exzellente Methode zur Gefügecharakterisierung und für Schadensanalysen darstellt. Dementsprechend gibt es heute ganze Präparationsanleitungen für Betonpetrographische Probekörper, wie z.B. in Walker, Lane & Stutzman (2006). Trotz des großen Erfolgs petrologischer Methoden in der Betontechnik wurden diese in der Asphalttechnologie bisher nur untergeordnet eingesetzt. Erste Untersuchungen wurden in den frühen 80er Jahren des letzten Jahrhunderts von Angst (1982 und 1983) in der Schweiz durchgeführt. In der Folge wurde die Idee nochmals in Dänemark aufgegriffen (Neidel & Eriksen, 1990, Eriksen et al., 1992; Eriksen, 1992 a-b; Eriksen, 1993; Danish Road Institute, 1993). Trotz erfolgreicher Erprobung in der Herstellung von An- und Dünnschliffen waren doch die Limitierungen in der Anschliffgröße von maximal 100x100 mm und in der Rechenkapazität für automatische Bildanalysen Faktoren die schließlich dazu führten, dass es keine weiteren Entwicklungen auf diesem Gebiet gab. Bis ins Jahr 2015 gab es nur exemplarische Anwendungen der Methodik, aber keine systematischen Untersuchungen an Asphalten. Durch die Veröffentlichung von Hart (2015) wurde der Begriff Asphaltpetrologie aufgeworfen und die petrologischen Methoden gerieten wieder in den Blick der Forschung. Für die Analyse von Hohlraumgehalten und -verteilungen erscheinen hochauflösende Aufnahmen von An- und Dünnschliffen sinnvoll. Diese müssen, um auch kleinste Poren zu erkennen, von ausgezeichneter Qualität sein. Die Bilder der Proben sollen im Anschluss bildanalytisch ausgewertet werden um die entsprechenden Parameter zu ermitteln.

Folgt man den Anleitungen aus dem betonpetrographischen Bereich wird schnell deutlich, dass dort auf herkömmliche Präparationsgeräte, wie sie in jeder Schliffpräparation vorhanden sind, zurückgegriffen werden kann. Bei der Übertragung auf den Baustoff Asphalt treten hier jedoch einige Herausforderungen auf, die es zu lösen gilt. Als größter Faktor muss hier das Bitumen genannt werden. Während des Sägens und Schleifens können hohe Temperaturen entstehen, die das Bitumen weich werden lassen und zu Verschmierungen führen. Auch die großen Härteunterschiede von Bitumen und Gesteinskörnung führen insb. beim Schneiden zu Problemen, wie z.B. Kornzertrümmerungen. Dabei ist die Offenlegung einer möglichst repräsentativen Schnittebene im Probekörper ohne Gefügezerstörung die wesentliche Voraussetzung der asphaltpetrologischen Hohlraumanalysen. Das Schnittbild einer herkömmlichen Steintrennmaschine würde zu falschen Ergebnissen führen, da kleine Hohlräume nicht freigelegt werden. Zudem ist die weitere Präparation sehr zeitaufwendig, da große Unebenheiten der Oberfläche umständlich herausgeschliffen werden müssen. Der Einsatz von Präzisionstrennmaschinen liefert ebenere und weniger gestörte Schnittbilder.

Eine entsprechende Präzisionstrennmaschine wurde am FG Straßenwesen der TU Darmstadt aus eigenen Mitteln angeschafft. Aus ersten Untersuchungen wird deutlich, dass unabhängig von der Asphaltart sehr gute Schnittergebnisse erzielt werden können.

Die Hohlraumanalyse an An- und Dünnschliffen beruht im Gegensatz zur CT-Technologie nicht auf einer Farbcodierung von Dichteunterschieden, sondern auf tatsächlichen Farbwerten des Probekörpers.

Aus obigen Abbildungen ist ersichtlich, dass sich die Hohlräume farblich kaum von der umgebenden Gesteins- bzw. Mastixphase abheben. Zur Identifizierung der Hohlräume anhand von Pixel-Farbinformationen ist deshalb eine Hervorhebung nötig. Im Rahmen einer ersten Literaturstudie wurden hierzu erste Lösungsansätze gefunden, die in der straßenbaulichen Forschung bis heute lediglich exemplarisch genutzt wurden. In Eriksen [1993] und Hart [2015] wurden die Hohlräume z.B. mit farbllichem bzw. fluoreszierendem Epoxidharz imprägniert, was jedoch weiteres Schleifen zum Entfernen überschüssigen Harzes an der Oberfläche erfordert (Anschliff). Gleiches gilt beim Verspachteln der freigeschnittenen Hohlräume mit Gips, wie es in einem Forschungsvorhaben zur Optimierung lärmarmer Asphalte an der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt wurde (Radenberg et al., 2014). Das Schleifen der imprägnierten Probekörper kann auch bis zu einer Enddicke des Präparats von wenigen Mikrometern durchgeführt werden, wodurch die Gesteine lichtdurchlässig werden (Dünnschliff).

Der Schleifprozess bei Asphaltproben unterscheidet sich ebenfalls erheblich von dem in der Betontechnologie. Auch hier ist die thermische Empfindlichkeit von Bitumen das Hauptkriterium.

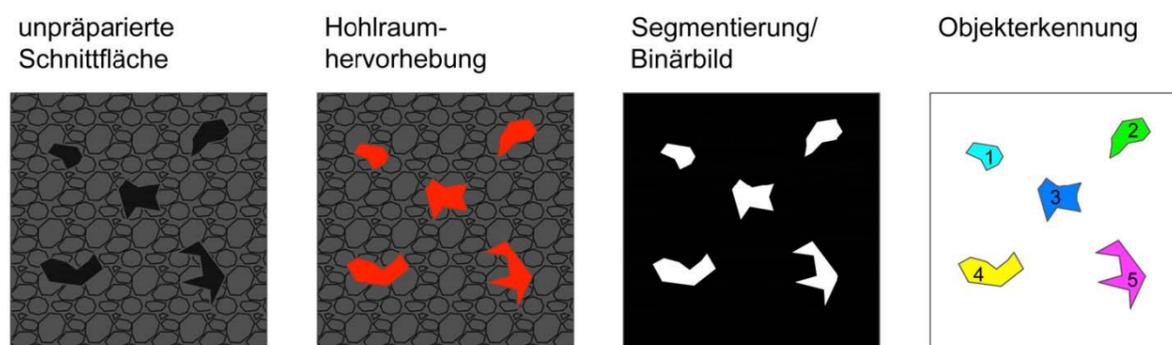
Während des gesamten Schleifprozesses muss eine kontinuierliche Abführung der entstehenden Wärme gewährleistet sein. Eine Kühlung mit Wasser ist, je nach verwendetem Bitumen, nicht ausreichend. Hier ist es nötig ein geeignetes Verfahren zu entwickeln um Asphaltprobekörper prozesssicher, ohne Bitumenverschmierungen, anschleifen zu können.

An den fertiggestellten An-und Dünnschliffen gilt es ein Bildaufnahmeverfahren zu nutzen, das hochauflösende Abbildungen von großen Probekörperausschnitten produzieren kann. Hierfür kommen die Digitalfotografie und Flachbettscanner in Betracht, mit deren Hilfe exemplarisch freigelegte Probekörperebenen erfasst werden können.

An den Aufnahmen der so präparierten Probekörper mit farblich hervorgehobenen Hohlräumen werden zur Segmentierung (ebenso wie beim CT-Verfahren) Bildanalysetechniken mit Schwellenwertverfahren angewandt, die Pixel mit Farbwerten innerhalb eines vordefinierten Bereiches der Hohlraumphase zuordnen.

In zuvor genannten Veröffentlichungen wurden diese Bildinformationen lediglich dazu genutzt, Teilhohlraumgehalte für verschieden große, vertikale Abschnitte zu bestimmen, indem der identifizierte Anteil von Pixeln der Hohlraumphase horizontal aufsummiert und der Gesamtpixelanzahl je Zeile gegenübergestellt wurde.

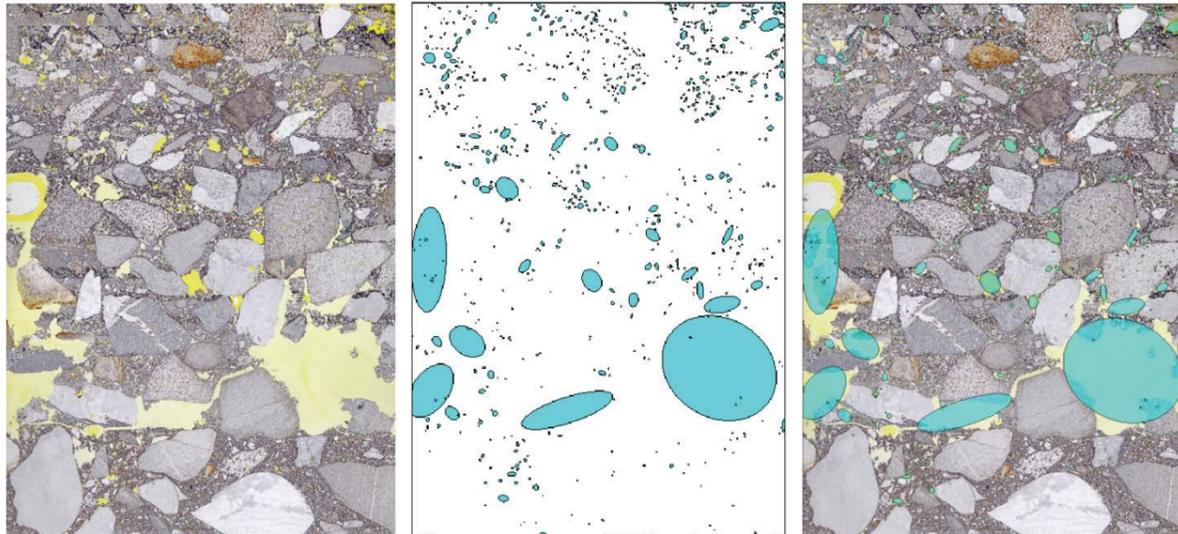
Durch zusätzliche Implementierung von Objekterkennungsalgorithmen (Objektextraktion) in die Methode zur digitalen Bildanalyse lässt sich jedoch die Hohlraumphase des zuvor segmentierten Bildes in einzelne „Hohlraumobjekte“ unterteilen. Für ähnliche Aufgabenstellungen wird in diesem Zusammenhang häufig der so genannte „Freeman-Code“ [Freeman, 1961] in der Ausprägung „4-neighbourhood“ oder „8-neighbourhood“ herangezogen.



Arbeitsschritte zur Erkennung einzelner Hohlraumobjekte an präparierten Asphaltprobekörpern

Da damit die Lage der einzelnen Pixel eines jeden Hohlraumobjektes bekannt ist, können über geometrische und statische Beziehungen auch u.A. die Größe und Ausrichtung für jedes Objekt

bestimmt werden. Nachfolgende Abbildungen zeigen die identifizierten Hohlraumobjekte im Dünnschliff eines PMA-Schadensfalles, welche zur Visualisierung der Vereinzelung durch flächengleiche Ellipsen gleicher Ausrichtung markiert werden.



Identifizierte Hohlräume an einem Dünnschliff eines PMA-Schadensfalles und deren Visualisierung als Ellipse [Tielmann, Quelle des Dünnschliff-Rohbildes: Hart]

Durch Ablage der Geometrie- und Positionsdaten eines jeden Hohlraumobjektes in einer Datenbank können weitere statistische und räumliche Verteilungen erstellt werden. Im Rahmen des vorgesehenen Projektes gilt es, die technisch relevanten Verteilungen zu identifizieren und deren Berechnung und graphische Ausgabe in einem Algorithmus umzusetzen. Gegebenenfalls können auch mittels 3D-Texturanalysen Hohlräume in ausreichender Auflösung identifiziert werden. Dies wurde auf Forschungsebene bislang nicht erprobt. Bei einer Texturanalyse mittels 3D-Scanner könnte auf die Kunstharzimprägnierung und die Schleifvorgänge verzichtet werden. Die Identifizierung von Hohlräumen geschieht dann nicht anhand von Pixelfarbwerten, sondern Tiefenkoordinaten (bezogen auf die glatte, geschnittene Probekörperoberfläche). Die weiteren Schritte zur Objekterkennung und Parametrisierung wären sehr ähnlich zur oben beschriebenen Bildanalyse.

3.2 Arbeitshypothese

Ziel des vorgesehenen Projektes ist es, ein Präparations- und Analyseverfahren zur differenzierten Beschreibung der Hohlraumverteilung von Asphalten zu konzipieren, welches durch eine relativ einfache und wenig zeitintensive Durchführung mittelfristig zur Praxistauglichkeit reifen wird. Gegenüber konventionellen Verfahren zur Hohlraumgehaltsbestimmung kann hierdurch eine höhere Aussagekraft hinsichtlich der Hohlraumverteilung erreicht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse können dann zum Verständnis der Wechselwirkungen von Asphaltbestandteilen, sowie zur

Optimierung von Mischungen und Einbauprozessen beitragen. Beispielsweise können die Einwirkungen von kleinen Abweichungen der Sieblinie oder des Bindemittelgehalts, aber auch die der Einbautemperatur auf das Hohlraumgefüge dargestellt werden. Möglicherweise können kleine Anpassungen der Parameter zu einer deutlich besseren Struktur und damit einer längeren Haltbarkeit der Asphaltbefestigung führen.

Im Einzelnen sollen zunächst bisherige Erkenntnisse aus dem Bereich der Präparation von Anschliffen zusammengetragen und die Verfahren experimentell weiterentwickelt werden. Als Ausgangspunkt sind vor allem Bohrkerne aus bestehenden Asphaltbefestigungen vorgesehen. Für gezielte Fragestellungen sollen auch Laborprobekörper, wie Marshall-Probekörper und Walzsektorplatten zum Einsatz kommen. Es werden bewusst beide Formen der Verdichtung von Probekörpern gewählt um Unterschiede bezüglich Homogenität, Kornzertrümmerung und interner Struktur zu bewerten und schlussendlich die geeignete Variante für Modellversuche zu wählen. Die Verarbeitung möglichst verschiedener Mischgutarten und -sorten (und damit verschiedener Hohlraumgeometrien, Bindemittel, Gesteinsarten) soll die Konzeption eines möglichst universell anwendbaren Präparationsverfahrens unterstützen. Neben der Erprobung geeigneter Scantechnologien soll ferner ein Algorithmus zur automatisierten, rechnergestützten Hohlraumanalyse aufgestellt werden. Hierzu gilt es zunächst für den konkreten Anwendungsfall geeignete Bildanalyse- und Objekterkennungstechniken zu identifizieren und weiterzuentwickeln, auf deren Basis dann Hohlraumobjekte aus den Scanbildern isoliert werden können. Die als asphalttechnologisch relevant identifizierten, morphologischen Hohlraummerkmale können dann numerisch anhand der Pixelinformationen der einzelnen Hohlraumobjekte berechnet und in einer Datenbank abgelegt werden. Aus der Gesamtheit der Datenbankeinträge werden dann Verteilungen zur Charakterisierung des räumlichen Hohlraumgefüges abgeleitet. Auch hier sollen möglichst unterschiedliche Hohlraumgefüge der Präparate die Konzeption stützen.

Eine Weiterentwicklung der Auswerterroutinen nach Projektende könnte eine Bestimmung weiterer Asphaltkenngößen an den Präparaten ermöglichen. Denkbar wäre beispielsweise die Bestimmung der Korngrößenverteilung, des Mastixgehaltes oder der Kornausrichtungen.

Zusätzlich zur reinen Analyse von Hohlraumverteilungen und -gehalten sollen auch die beeinflussenden, mikrostrukturellen Ursachen näher untersucht werden. Beispielsweise können poröse Gesteine größere Mengen von Bitumen aufnehmen. Ist dieses Material zu einem hohen Prozentsatz in der Asphaltmischung enthalten, so kommt es zu einem höheren Hohlraumgehalt, da weniger Bindemittel zur Verfügung steht, das diese ausfüllen kann. Hier ist die Anfertigung und

qualifizierte Auswertung von Dünnschliffen angestrebt. Hier gilt es zu erwähnen, dass im FG Straßenwesen der TU Darmstadt ein wissenschaftlicher Mitarbeiter mit abgeschlossenem Studium in Angewandten Geowissenschaften eingestellt wurde. Für das beantragte Forschungsprojekt kann auf seine Expertise in der Anfertigung von Dünnschliffen, sowie in der mineralogischen und petrologischen Auswertung zurückgegriffen werden.

5.1 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende

Ein praxistaugliches Konzept zur Durchführung von Hohlraumanalysen zeichnet sich dadurch aus, dass es in seiner Komplexität und seinem Zeiterfordernis nicht wesentlich über den Aufwand einer konventionellen Hohlraumgehaltsbestimmung hinausgehen darf. Gleichzeitig sollten die Investitionskosten für die Geräteausstattung gering sein. Das Konzept, das am Ende dieses Projektes stehen soll, ist genau auf die Erfüllung dieser Anforderungen ausgerichtet. An Ausstattung werden (nach derzeitigem Kenntnisstand) lediglich eine Steintrennmaschine, Verfüllmasse, Schleifmaterial, eine Scaneinrichtung und ein Computer benötigt. Ein Großteil davon ist in gut ausgestatteten Asphaltlaboren bereits vorhanden. Die anfallenden Investitionskosten für eventuell nötige Neuanschaffungen halten sich durch hohe Standzeiten der Geräte in vertretbaren Grenzen. Der tatsächliche Arbeitsaufwand soll für einen geschulten Laboranten nach kurzer Einarbeitung ähnlich der derzeit üblichen Methode zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes sein, liefert aber einen deutlich höheren Erkenntniswert. KMU haben damit ohne wesentliche Steigerung des Aufwandes die Möglichkeit, einen tieferen Einblick in die Produkte ihrer Arbeit zu gewinnen und daraus im Rahmen des eigenen Qualitätsmanagements Verbesserungen zu generieren. Dies ist insbesondere für Hersteller von Asphaltmischgut und für Baufirmen interessant. Erstere können im Rahmen ihrer Erstprüfung direkt An- und Dünnschliffe aus Laborprobekörpern herstellen und daran die Hohlraumverteilung bestimmen. Hier können über die Variation der Sieblinie und des Bindemittelgehalts direkt Anpassungen am Hohlraumgefüge vorgenommen werden. Letztere profitieren von den umfassenderen Hohlraumanalysen aus der Mischgutherstellung, da sie ein besseres Produkt erhalten. Zudem kann die eigene Einbauqualität zeitnah nach Erkalten der Fläche überprüft werden. Insbesondere im Bezug auf Einbautemperatur und Verdichtungsarbeit (Vorverdichtung des Fertigers und Walzverdichtung) können so zeitnahe Optimierungen für folgende Einbauflächen durchgeführt werden. Da von Seiten der ausführenden KMU keine zusätzlichen Entwicklungen nötig sind, hängt eine Umsetzung in der Praxis lediglich von der geeigneten Verbreitung der Projekterkenntnisse und dem Erprobungswillen ab. Die praktische Umsetzung kann also als wahrscheinlich angesehen werden.

Die Anwendung optischer Analyseverfahren kann auch dazu führen, die Verwendung gesundheitsschädlicher Lösemittel im Labor weiter zu reduzieren. KMU der Prüfgerätebranche können sich an der Entwicklung beteiligen und für die Ausstattung von asphalttechnologischen Laboren neue Geräte entwickeln.

5.2 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Bereits während der Projektbearbeitung werden Teilerkenntnisse in den projektbegleitenden Ausschusssitzungen unter Beteiligung von Industrievertretern präsentiert und diskutiert. Diese Kommunikation sichert bereits früh den Transfer in das Umfeld der KMU.

Die abschließenden Ergebnisse des Projektes sollen in einem ausführlichen Schlussbericht festgehalten werden. Darüber hinaus ist eine Anleitung zur Präparation der Probekörper vorgesehen, die einfach zu verstehen sein soll, dabei jedoch ausreichend detailliert ist. Für interessierte Laboranten aus den KMU werden Workshops angeboten, in denen die Präparationstechniken erlernt werden können. Der Algorithmus zur Hohlraumanalyse wird dokumentiert und kann gegebenenfalls durch einen KMU mit Expertise in der Softwareentwicklung in ein Produkt überführt werden. Ferner sind Veröffentlichungen in einschlägigen Branchenzeitschriften und auf der Homepage des DAV geplant.

Als Plattform zur Diskussion und Verbreitung der Ergebnisse bietet sich auch die Internationale Gesellschaft für Asphaltpetrologie e.V. an. Diese gemeinnützige Vereinigung unterstützt die Entwicklung und Verbreitung von petrologischen Analyseverfahren in der Asphaltbranche und pflegt engen Kontakt zur antragstellenden Forschungsstelle.

TU Darmstadt
Institut für Straßenwesen
Otto-Berndt-Str. 2
64287 Darmstadt

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald
Projektleiter: Akad.-Dir. Dr.-Ing. Stefan Böhm

7. Literaturverzeichnis

Angst, C.: Der Einfluß der Verdichtung auf die mechanischen Eigenschaften bituminöser Schichten, Bitumen, Vol. 2/1982, 75-82, 1982.

Danish Road Institute: Microscopic Analysis of Asphalt Concrete Mixtures, Preparation Techniques for Plane Sections / Preparation Techniques for Thin Sections, Information Guide, 1993

Department of the Army Corps of Engineers: Investigation of the Design and Control of Asphalt Paving Mixtures -Technical Memorandum No. 3-254, Vol. 1-3, Waterways Experiment Station (U.S.), Mississippi River Commission, Vicksburg Mai 1948

Eriksen, K.; Wegan, V.; Krarup, J.: Air Void content and other air characteristics of Asphalt concrete by image analysis, Strategic Highway Research Program, Contract no: SHRP88-AIIR-13, Phase 2, 1992

Eriksen, K. (a): Air Void characteristics in asphalt concrete samples from the compaction study, Strategic Highway Research Program, Contract no: SHRP-88-AIIR-13, Phase 3a,

Eriksen, K. (b): Homogeneity of Air Voids in Asphalt Aggregate Mixtures Compacted by different Methods at different Temperatures. Strategic Highway Research Program, Contract no: SHRP-88-AIIR-13, Phase 3b, 1992

Eriksen, K.: Microscopical Analysis of Asphalt-Aggregate Mixtures Related to Pavement Performance, Danish Road Institute, Notiz 245, 1993

Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 5 -Rohdichte von Asphalt, Ausgabe 2013, FGSV Verlag, Köln 2013

Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Teil 8 -Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad, Ausgabe 2012, FGSV Verlag, Köln 2012

Freeman, Herbert: On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations, IRE Transactions on Electronic Computers, Vol. EC-10, S. 260-268, 1961

Gopalakrishnan, Kasthurirangan; Ceylan, Halil; Inanc, Feyzi; Gray, Joseph; Heitzman, Michael Alan: Characterization of Asphalt materials using X-ray high-resolution computed tomography imaging techniques; Proceedings of 2006 T&DI Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, S.

437-454, Atlanta, Georgia (USA) 30.4.-3.5.2006

Hart, Rainer: Asphaltpetrologie -Einsichten in Asphalt, in: Straße und Autobahn, Ausgabe 8/2015, S. 529-533, Kirschbaum Verlag, Köln 2015

Hatebur, A.: Möglichkeiten der Mikrofokus-Röntgenanlage der EMPA zur zerstörungsfreien Prüfung von belasteten Bitumenproben, interner EMPA Report, Abteilung zerstörungsfreie Prüfung/Drahtseilprüfung, 1991

Jönsson, Magnus; Partl, Manfred N.; Flisch, Alexander: Comparison of Different Compaction Methods Using X-ray Computer Tomography, Report No. 113/12 (EMPA No. FE 840544), Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf (Schweiz) 2002

Kalender, W. A.: Computertomographie. Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen, 2. überarb. und erw. Auflage, Publicis Corporate Publishing, Erlangen Masad, E.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; Harman, T.: Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis, in: Journal of Computing in Civil Engineering, April 1999, S. 88-95, 1999

Neidel, A.; Eriksen, K.: Thin sections of asphalt concrete preparations. Strategic Highway Research Program, Contract no: SHRP-88-AIIR-13, Phase 1, Subtask 1.1-1, 1990

Nielsen, Carsten B.: Microstructure of porous pavements -Experimental Procedures, Danish Road Institute, Technical Note 47, März 2007 a

Nielsen, Carsten B.: Clogging of porous pavements -Assessment of test sections, Danish Road Institute, Technical Note 54, März 2007 b

Partl, M. N.: Zum isothermen Kriechen eines bituminösen Mörtels unter mehrstufiger Belastung, Dissertation, ETH Zürich, ETHZ Nr.7317, 1983

Radenberg, Martin: Neue Entwicklungen bei lärmarmen Fahrbahndecken, Vortrag an der Fachtagung „Straßen- und Brückenerhaltung mit System“, Germersheim 10.04.2014

Radenberg, Martin; Stöckert, Ulrike; Gottaut, Christian; Beckenbauer, Thomas; Recknagel, Christoph; Root, Viktor; Dogmen, Willy; Hübner, Ralf: Optimierung der lärmtechnischen und bautechnischen Wirksamkeit und Nutzungsdauer dichter Asphaltdeckschichten, Teilvorhaben VI.II im Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 3“, BASt Förderkennzeichen: 19 U 10016, Schlussbericht, 2014

Remijn, Ir. M.: A methodology for the analysis of computerized tomography scans of asphalt cores

using Amira software, Memoirs of the centre of Engineering Geology in the Netherlands, No. 233, TU Delft, 2005

Shashidhar, N.: X-ray tomography of asphalt concrete, Transportation Research Record, 1681, S. 186-192, 1999

Stein, D. (Hutschenreuther IG): Porous Mastic Asphalt PMA in der Praxis und Anwendung – Ein Zwischenstand, Vortrag am XV. Weimarer Straßenbau + Baustoffsymposium, 21.03.2013, abgerufen unter: http://www.hutschenreuther.de/PDF/STEIN_PMA-15.pdf, Zugriffsdatum: 01.06.2015, 17:05

Synolakis, C.E.; Leahy, R. M.; Singh, M.B.; Zhou, Z.; Song, S.M.; Shannon, D.S.: Development of an Asphalt Core Tomographer, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-656, National Research Council, Washington D.C. (USA) 1993

Synolakis, C.E.; Zhou, Z.; Leahy, R.M.: Determination of Internal Deformation Field in Asphalt Cores Using X-Ray Computer Tomography, Transportation Research Record 1526, 1995

Walker, H.N.; Lane, D.S.; Stutzman, P.E.: Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete: A Petrographic Manual, Federal Highway Administration Report No. FHWAHRT-04-150, 2006