

Numerische Simulation der Rissausbreitung in flexiblen Asphaltbefestigungen infolge von Verkehrslasten

FA 9.189

Forschungsstellen: RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen (isac) (Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oeser)

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (ISBS) (Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing. M. P. Wistuba)

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

Bearbeiter: Oeser, M. / Wang, D. / Liu, P. / Wistuba, M. P. / Büchler, S. / Wellner, F. / Ascher, D.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Oktober 2015

1 Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung von Grundlagen zur Simulation des Rissverhaltens von flexiblen Straßenbefestigungen. Mit diesen Grundlagen soll ein besserer Einblick in die komplizierten Zusammenhänge zwischen Mikrorissbildung, der Entstehung von Makrorissen und der Ausbreitung von Rissen vorgelegt werden. Dabei wurde auf experimentell gestützte Erkenntnisse zum Rissverhalten von Asphalt und zur Rissausbreitung in üblichen Ermüdungsversuchen und auch statischen Versuchen zum Risswachstum zurückgegriffen. Weiterhin sollten Grundlagen für eine verbesserte Übertragung der in diesen Versuchen erzielten Ergebnisse auf das Rissverhalten in realen Straßenbefestigungen erarbeitet werden. Mit diesen Grundlagen können wichtige Zusammenhänge für die Prognose der Lebensdauer und Restlebensdauer von flexiblen Straßenbefestigungen aufgestellt werden, die perspektivisch in die Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen im Rahmen innovativer Dimensionierungsstrategien einfließen sollen.

2 Untersuchungsmethodik

Die Mechanismen der Rissentstehung von Asphalten lassen sich zuerst experimentell mit zeitraffenden statischen und dynamischen Versuchen studieren, um genaue Kenntnis über die belastungsabhängigen Rissverläufe in Asphalten zu erlangen. Zur Analyse der Rissausbreitung von Asphalten waren die Ansätze des Kohäsivzonenmodells der kommerziellen FE-Software ABAQUS heranzuziehen. Das simulierte Risswachstum war mit dem in Bruchversuchen zu beobachtenden Rissbildern und Mechanismen zu vergleichen, um das entwickelte numerische Modell auf seine Genauigkeit zu prüfen. Nach Abschluss der Entwicklung der bruchmechanischen Grundlagen für Asphalte sollten an einem standardisierten Befestigungsaufbau numerische Simulationen zur Rissfortpflanzung und zu den Rissbildern durchgeführt werden. Durch die Untersuchungen der Mechanismen der Rissausbreitung in realen Straßenbefestigungen unter Verkehr sollten Aussagen zur

Verteilung der Rissbildung beziehungsweise des Risswachstums über den Querschnitt der Befestigung getroffen werden.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Experimentelle Untersuchungen

Zur Identifikation von Makrorissen in Befestigungen und Probekörpern sowie zur Bestimmung der Spannungskonzentrationen an den Rissspitzen waren verschiedene Materialprüfungen durchzuführen, die vom Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig (ISBS) und der Professur für Straßenbau des Instituts für Stadtbauwesen und Straßenbau der TU Dresden (ISSD) bearbeitet wurden. Spannungsoptische und photogrammetrische Methoden erlauben es, den Spannungsverlauf und die zeitlichen und räumlichen Änderungen der Spannungen während des Versuchs zu visualisieren. Es war zu prüfen, ob spannungsoptische Methoden an stark inhomogenen Materialien Aussagen zur Rissentstehung und Ausbreitung erlauben und ob mit diesen Methoden die für bruchmechanische Formulierungen essenziellen Erkenntnisse zu Spannungskonzentrationen an Rissspitzen erhalten werden können. Dieses Verfahren sollte mit einem numerischen Modell gekoppelt werden, um eine zutreffende Beschreibung des Makrorissproblems in Asphalten zu gewährleisten.

In der Spannungsoptik wird polarisiertes Licht durch einen durchsichtigen Werkstoff geleitet und die erzeugte Phasenverschiebung anschließend optisch dargestellt. Über eine weiße Lichtquelle wird ein Spektrum von Strahlen unterschiedlicher Frequenzen ausgesendet. Mithilfe eines Polarisationsfilters werden diese Lichtwellen so gefiltert, dass sie nur in einer Richtung schwingen. Beim Durchlauf des Lichts durch die Probe wird das Licht verlangsamt (Brechungsindex), bleibt aber in der gleichen Schwingungsrichtung (isotropes Verhalten). Daher ist hinter dem Analysator keine Lichtwelle zu beobachten. Bei Belastung verändert sich die Teilchendichte und das Material reagiert anisotrop, das heißt, der Brechungsindex innerhalb der Probe verändert sich. Bei nicht durchsichtigen Proben kann die Reflexionspolaroskopie verwendet werden, bei der ein transparenter Kunststoff (eine ca. 4 mm dicke Folie) mithilfe eines optisch reflektierenden Klebers auf der Probe befestigt wird. Das Funktionsprinzip zeigt Bild 1, links.

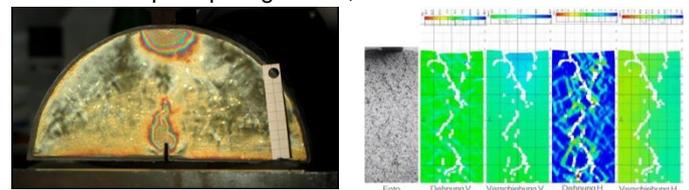


Bild 1: Links: Reflexionspolaroskopie am Beispiel 3PHZBV, rechts: Foto von der für die Photogrammetrie beschichteten Oberfläche sowie Visualisierung der vertikalen und horizontalen Verformungen und Dehnungen beim Spaltzug-Schwellversuch

Mithilfe der Photogrammetrie kann ein bestehendes feines Muster auf der Oberfläche der Probekörper genutzt werden, um Verformungen und Dehnungen zu berechnen. Dazu wird die

Oberfläche der plangeschliffenen Proben mit einer weißen Grundierung und einem schwarzen Punktmuster aus Grafitlack beschichtet. Die Beschichtung kann einerseits dafür verwendet werden, dass durch die weiße Grundierung die bei Belastung auftretenden dunklen Risse (Bild 1, rechts) kontrastreicher sichtbar gemacht werden. Andererseits kann durch das feine schwarze Punktmuster eine Struktur genutzt werden, die über Photogrammetrie-Software die Berechnung von Verformungen und Dehnungen ermöglicht.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Rissentstehung und Rissausbreitung an Asphaltprobekörpern experimentell untersucht und visuell dargestellt. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden drei Prüfverfahren eingesetzt: Statische 3-Punkt-Halbzylinder-Biegeversuche (3PHZBV) in Anlehnung an die DIN EN 12697-44 bei +5 °C, dynamische 3-Punkt-Halbzylinder-Biegeversuche bei 10 Hz und +5 °C sowie Spaltzug-Schwellversuche (SZSV) zum Ermüdungsverhalten gemäß der AL Sp-Asphalt 09.

Da für unterschiedliche Asphaltarten auch ein unterschiedliches Verhalten zur Rissentstehung erwartet wurde, kamen drei Asphaltarten zum Einsatz: AC 22 T S, AC 16 B S und AC 8 D S. Jede der drei Asphaltarten wurde um eine Variante mit einem erhöhten Bindemittelgehalt erweitert, sodass insgesamt sechs Asphaltvarianten untersucht wurden. Während der Versuche wurden die Messdaten der Probekörper aufgezeichnet und diese sowohl für die Spannungsoptik als auch für die Photogrammetrie in regelmäßigen Abständen fotografiert (dynamische 3PHZBV und SZSV im 2-Sekunden-Rhythmus) beziehungsweise gefilmt (statische 3PHZBV mit 100 und 500 B/s beziehungsweise 30 B/s).

Für die statischen 3PHZBV konnte mit der Spannungsoptik nachgewiesen werden, dass die Probekörper bis zum Riss annähernd spannungsfrei waren und erst durch den auftretenden Riss schlagartig brachen. Dabei konnte der Rissfortschritt (in der Regel < 1 s) von der Kerbe zur Oberseite des Probekörpers dokumentiert werden. Die dynamischen 3PHZBV wiesen ein ähnliches Verhalten auf. Aufgrund der geringeren Belastungen konnten die Probekörper jedoch einem auftretenden Riss länger Stand halten. Nach ca. 80 – 90 % der Versuchsdauer trat ein Riss an der Kerbe auf, dessen Risspitze dann langsam (gegenüber den statischen 3PHZBV) zur Oberseite wanderte. Auch dieser Rissfortschritt konnte fotografisch dokumentiert werden. Die SZSV zeigten, dass bereits nach dem ersten Drittel der Versuche in der Probekörpermitte eine so starke Verformung stattfand, dass das Verfahren der Spannungsoptik keine Differenzierung bezüglich der Isochromaten mehr zuließ. Es konnte keine Rissentstehung dokumentiert werden.

Die Reflexionspolariskopie, als spezielles Verfahren der Spannungsoptik, hat sich als geeignetes Instrument erwiesen, Verformungen innerhalb beziehungsweise an der Oberfläche der Probekörper nachzuweisen, sofern die Verformungen nicht zu groß werden. Dabei können auftretende Risse während eines Versuchs erkannt und dokumentiert werden. Für nachfolgende Projekte wird vorgeschlagen, die bestehenden Einschränkungen bezüglich der zeitlichen Zuordnung von Fotos und Messdaten zu lösen.

3.2 Simulation der Rissausbreitung mit ABAQUS

Auf Basis der Literaturrecherche wird das Kohäsivzonenmodell für die Simulation der Rissausbreitung von Asphalt festgelegt. Als Prüfverfahren wird der 3-Punkt-Halbzylinder-Biegeversuch (s. Bild 2, links) bestimmt, der die Entstehung von Rissen vorsieht und die Rissbreite und Risslänge vorgibt. Anhand der Ergebnisse des 3PHZBV (s. Bild 2, rechts) werden die initialisierten Werte für drei wichtige, bruchmechanische Parameter bei einer vorgesehenen Temperatur von +5 °C ermittelt: die maximale Kohäsionsfestigkeit T^0 , die Bruchenergiedichte G_c und die Steifigkeit K^0 der Kohäsionselemente. Diese werden anschließend als Eingangsgrößen in ein Kohäsivzonenmodell mithilfe der kommerziellen FE-Software ABAQUS überführt. In einem Optimierungsprozess werden die initialisierten Parameter für das Kohäsivzonenmodell so lange variiert (beziehungsweise kalibriert), bis eine optimale Anpassung der gemessenen Kraft-Verschiebungs-Kurve mit der berechneten Kurve erreicht wird (mithilfe der Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen) (s. Bild 3).

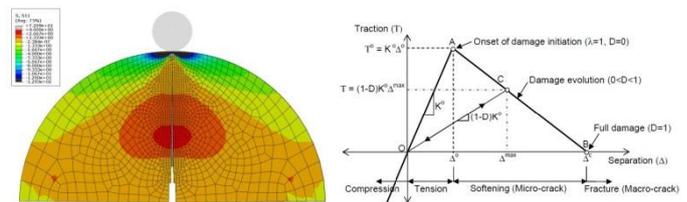


Bild 2: Links: Dreidimensionales FE-Modell für den Probekörper des 3PHZBV, rechts: Schematische Darstellung eines typischen bilinearen Spannungs-Separations-Gesetzes für das Kohäsivzonenmodell

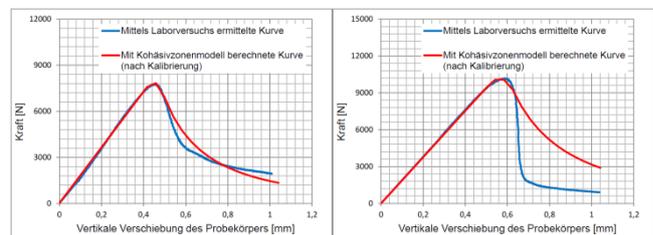


Bild 3: Vergleich der in Laborversuchen ermittelten und der mit dem Kohäsivzonenmodell berechneten Kraft-Verschiebungs-Kurve (links: Asphaltbinderschicht, Probe B252A; rechts: Asphaltdeckschicht, Probe D412A)

Anhand der Ergebnisse der numerischen Simulation kann grundsätzlich festgestellt werden, dass die Rissausbreitung in der Asphaltbinderschicht mit dem Kohäsivzonenmodell sehr gut beschrieben werden kann (s. Bild 3, links). Für die Proben der Asphaltdeck- und der Asphalttragschicht, die spontanere Brüche aufweisen, pflanzen sich die Risse im 3PHZBV nach der ersten Makrorissbildung viel schneller fort als die im Kohäsivzonenmodell simulierten (zum Beispiel Asphaltdeckschicht, s. Bild 3, rechts). Das beobachtete Phänomen, dass die Asphaltbinderschicht besser übereinstimmende Ergebnisse aufweist, kann zudem nicht ausreichend beschrieben werden, weil die Untersuchungsergebnisse an einzelnen Proben stets mit zufallsbedingten Schwankungen verbunden sind. Die senkrechten Rissverläufe im Kohäsivzonenmodell spiegeln die Realität im 3PHZBV nicht zu 100 % wider. Auf den Bildern aus der Spannungsoptik und der Photogrammetrie ist zu erkennen, dass die

Körner über der Kerbe die Verformungen/Rissverläufe nachweislich umlenken können.

Nach Abschluss der Entwicklung der bruchmechanischen FE-Modelle für Asphalte wird an einem standardisierten Befestigungsaufbau eine numerische Simulationen zur Rissfortpflanzung und zu den Rissbildern durchgeführt. Für die Modellierung wird ein typischer Oberbau für hochbelastete Straßen in

Deutschland gemäß RStO 12 ausgewählt. Bei der numerischen Simulation wird davon ausgegangen, dass ein Makroriss an der Unterseite der Asphalttragschicht vor der statischen Belastung bereits existiert. In Bild 4 ist sehr gut zu erkennen, wie sich der Riss in Abhängigkeit von der Belastung von der Spitze der Kerbe durch die gesamte Asphaltbefestigung fortsetzt.

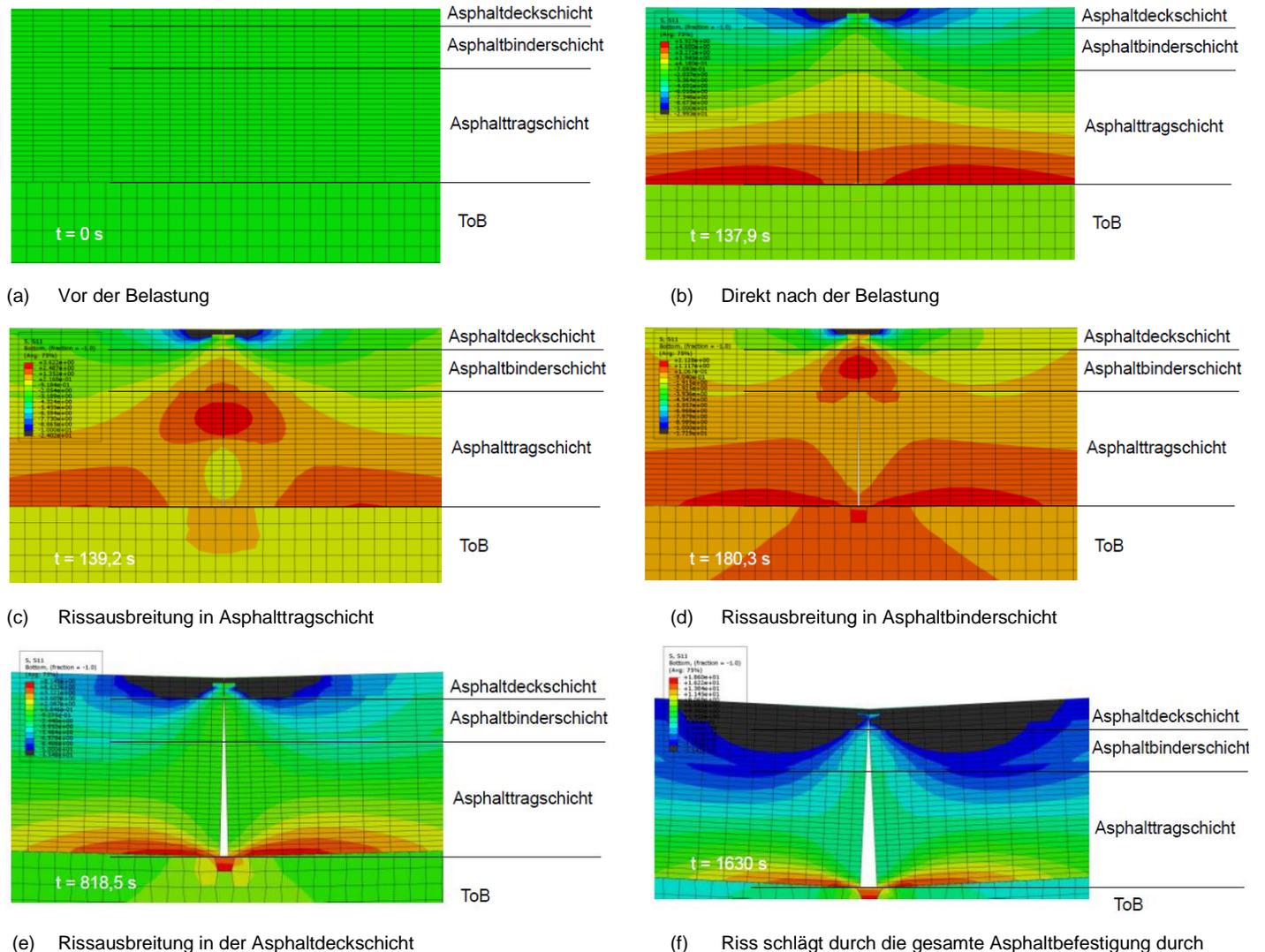


Bild 4: Spannungsverteilung und Rissausbreitung in numerischer Simulation mit Kohäsivzonenmodell in ABAQUS

Die zeitliche Entwicklung der Risse in der Asphaltbefestigung (s. Bild 5) zeigt einen stark degressiven Verlauf mit einer zunächst (in der Asphalttragschicht) schneller werdenden, anschließend aber immer langsamer werdenden Rissausbreitung (in der Asphaltdeckschicht).

Basierend auf dem Energiekonzept wird ein Zusammenhang zwischen den numerischen Simulationen mit statischer Belastung und den dynamischen 3-Punkt-Halbzylinder-Biegeversuchen hergestellt, sodass Rückschlüsse auf das Rissverhalten von realen Asphaltbefestigungen (wie zum Beispiel die zulässigen Lastwechsel bis zum Versagen der gesamten Fahrbahnbefestigung) auf Basis der Ergebnisse der Simulation gezogen werden können. Durchschnittlich konnten im Spaltzug-Schwellversuch für die Asphalttragschicht ca. 5 000 Lastwechsel bis

zur Makrorissbildung durchgeführt werden, während für die reale Befestigung mittels des Kohäsivzonenmodells 48 435 Lastwechsel aufsummiert für die gesamte Asphaltbefestigung durchgeführt werden konnten. Daraus ergibt sich ein Faktor von ca. 9,7 zur Abschätzung der Rissausbreitung für gegebene Materialien bei einer Temperatur von +5 °C. Mit den entwickelten Modellen können somit Aussagen zur Verteilung der Rissbildung beziehungsweise des Risswachstums über den Querschnitt der Befestigung getroffen werden.

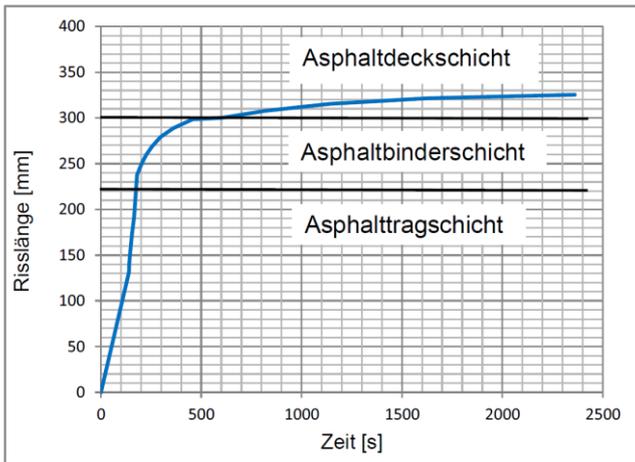


Bild 5: Entwicklung der Risslänge in Abhängigkeit von der Zeit

4 Schlussfolgerungen

Anhand der Untersuchungsergebnisse lässt sich grundsätzlich feststellen, dass sowohl die gewählte Modellierungsweise mithilfe der Methode der Finiten Elemente als auch die gewählten Materialansätze für die Straßenbaustoffe realitätsnahe Ergebnisse liefern. Die entwickelten Kohäsivzonenmodelle für die untersuchten Asphalte erlauben es, das Rissverhalten von Straßen im Computer zu simulieren und den Aufbau sowie die Materialien zu optimieren. Sie liefern daher einen wichtigen Beitrag zu einer wirtschaftlicheren und sichereren Dimensionierung von Straßenbefestigungen.

Da im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Rissausbreitung nur unter vorgesehener Temperatur und Last analysiert wurde, besteht Forschungsbedarf vor allem darin, das Rissverhalten der untersuchten Asphalte unter verschiedenen Temperaturen und Belastungsszenarien experimentell näher zu betrachten. Hierfür sollen die bruchmechanischen Parameter ermittelt und als Eingangsgrößen in ein Kohäsivzonenmodell überführt werden. Liegen genug Erkenntnisse/Untersuchungen vor, kann eine exakte Prognose der Lebensdauer der Asphaltbefestigung nach Eintritt der Makrorissbildung ermöglicht werden. Die entwickelten Kohäsivzonenmodelle können somit die Rechenverfahren in den RDO Asphalt 09 zur Dimensionierung der Asphaltbefestigungen sinnvoll ergänzen, um mithilfe realitätsnäherer Modellierungen die Genauigkeit der prognostizierten Beanspruchungszustände zu verbessern und die Güte, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit der rechnerischen Dimensionierungsmethode weiter zu steigern.

Weiterer Forschungsbedarf besteht noch darin, die entwickelten Kohäsivzonenmodelle durch Parallelisierung der Rechenaufgabe zu optimieren und somit die Rechenzeit für die dreidimensionale Analyse weiter zu reduzieren. Ferner sind weitere Materialeigenschaften und Stoffmodelle (zum Beispiel Viskoelastizität für die Kontinuumselemente) einzubinden.