



DOCTORAL THESIS

Extension of a multiscale model for hot mix asphalt stiffness prediction to introduce binder aging into pavement design

submitted in satisfaction of the requirements for the degree
Doctor of Science in Civil Engineering
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

DISSERTATION

Erweiterung des Mehrskalensmodells für die Vorhersage der Steifigkeit von Asphalt zur Berücksichtigung der Bitumenalterung in der Oberbaudimensionierung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. Lukas Eberhardsteiner, B.Sc.

Matr.Nr.: 0425851

Fasangartengasse 101/1/11, 1130 Wien, Österreich

Gutachter:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Ronald Blab**

Institut für Verkehrswissenschaften - Forschungsbereich für Straßenwesen

Technische Universität Wien

Gußhausstraße 28/230-3, 1040 Wien, Österreich

Prof. Dr.-Ing. habil. **Frohmut Wellner**

Professur für Straßenbau

Technische Universität Dresden

Georg-Schumann-Straße 7, 01062 Dresden, Deutschland

Wien, im August 2014

.....

Abstract

The current design approach for bituminous pavement constructions in Austria allows for straight forward determination of the different layer thicknesses, but limitations in the appropriate consideration of design parameters have to be accepted. There is no possibility to take detailed traffic data regarding the appearance of vehicle types or their gross weight and axle load distribution into account. Furthermore, the composition of the hot mix asphalt (HMA) used in bituminous layers is linked only empirically to the mechanical behavior. Hence the characteristics of the actually used asphalt concrete remain unconsidered. However, an analytical approach for the pavement design in Austria was recently developed resolving these limitations by introducing design levels regarding the traffic load as well as HMA stiffness and fatigue behavior. Thereby, the experimental effort increases with decreasing requirements for design reserves.

Pavement life and required design reserve are related to the fatigue behavior of the pavement layers, which is affected by the resulting stresses in the pavement construction. These stresses are not only influenced by the load induced through heavy traffic, but also by the materials stiffness behavior. Consequently, the stiffness of HMA has a huge impact on the design result and its accurate consideration within the design method is an important task. Many of the currently used semi-empirical design models only take elastic material properties into account and, hence, fail to describe important aspects of the viscoelastic behavior of asphalt concrete. Additionally, they reach their limits, when complex phenomena like failure, fatigue damages or aging effects need to be considered.

Continuum micromechanics provides an efficient and powerful framework for estimating viscoelastic stiffness properties on the basis of volumetric, morphologic and mechanical characteristics of the constituents of the material. The observation of a material on different, reasonably chosen lengths scales allows for describing such mechanical effects where they occur.

As only the volumetric composition and the mechanical properties of the bitumen – obtained from DSR tests – and of the aggregate are needed, a considerable reduction of the experimental efforts to characterize and to predict the HMA viscoelastic stiffness behavior can be realized. Furthermore, an increase in reliability of stiffness prediction compared to state-of-the-art semi-empirical material models can be achieved.

The reliable determination of "universal" input parameters for such a model seems crucial. Hence, detailed investigation of the mechanical behavior of the viscoelastic binder used in HMA, the bitumen, were performed. Static and dynamic tests using the experimental setup of the Dynamic Shear Rheometer (DSR) showed a huge impact of the temperature distribution within the bitumen sample. Additionally, a good correlation between static and dynamic results could be proven.

A further step towards "universal" input parameters for an existing multi-step homogenization scheme for HMA is the extension of the micromechanical model by a bitumen scale. Thereby, a structural concept is derived from the idea of SARA fractionation separating bitumen into saturates, aromatics, resins and asphaltenes on the basis of polarity considerations. Before this concept is examined by tests on artificially composed binders with a defined asphaltene content, the validity of these precipitated bitumen in terms of rheological behavior and microstructure is confirmed. Moreover, the effects of aging on the microstructure are analyzed and described by the derived micromechanical model.

Kurzfassung

Die Dimensionierung nach der derzeit gültigen österreichischen Richtlinie RVS 03.08.63 erlaubt eine schnelle und einfache Bemessung der Schichtdicken einer bituminösen Straßenbefestigung. Hierbei ergeben sich jedoch Einschränkungen in Bezug auf die exakte Ermittlung der Eingangsparameter. Es besteht beispielsweise keine Möglichkeit, detaillierte Informationen zur Auftretenswahrscheinlichkeit einzelner Fahrzeugtypen oder deren Gesamtgewichts- oder Achslastverteilung in Betracht zu ziehen. Außerdem wird das Materialverhalten (Steifigkeits- sowie Ermüdungseigenschaften) des Asphalts in den bituminösen Schichten unabhängig von der Mischgutzusammensetzung betrachtet, wodurch die Eigenschaften des tatsächlich eingesetzten Asphalts unberücksichtigt bleiben. Aus diesem Grund wurde kürzlich ein analytischer Ansatz für die Bemessung bituminöser Straßen in Österreich entwickelt, bei der diese Einschränkungen durch die Einführung von Bemessungsstufen für die Eingangsparameter Verkehrsbelastung, Asphaltsteifigkeit sowie Ermüdungsverhalten von Asphalt überwunden werden sollen. Dabei sinken die zu berücksichtigenden Bemessungsreserven mit steigendem experimentellen Aufwand.

Das Ermüdungsverhalten wird durch die resultierenden Spannungen in der Oberbaukonstruktion beeinflusst, die nicht nur von der Verkehrsbelastung, sondern auch von der Materialsteifigkeit abhängig sind. Das Steifigkeitsverhalten des eingesetzten Asphalts hat daher großen Einfluss auf das Bemessungsergebnis und dessen korrekte Ermittlung spielt eine wichtige Rolle in der Bemessung von bituminösen Straßenoberbauten. Derzeit verwendete semi-empirische Modelle betrachten elastisches Materialverhalten. Dies entspricht zwar einer guten Näherung, vernachlässigt allerdings wichtige Aspekte des tatsächlich viskoelastischen Verhaltens von Asphalt. Außerdem stoßen diese Modelle an ihre Grenzen, wenn komplexe Materialeigenschaften, wie Festigkeit, Ermüdung oder Alterung beschrieben und vorhergesagt werden sollen.

Kontinuums-Mikromechanik bietet einen effizienten und leistungsfähigen Rahmen zur Abschätzung viskoelastischer Steifigkeitscharakteristiken auf Basis der volumetrischen, morphologischen und mechanischen Eigenschaften der Bestandteile eines Materials. Die Beobachtung eines Materials auf unterschiedlichen, vernünftig gewählten Längenskalen erlaubt die Beschreibung mechanischer Effekte genau dort, wo diese auftreten.

Da lediglich die volumetrische Zusammensetzung sowie die mechanischen Eigenschaften von Bitumen, geprüft in DSR-Versuchen, und dem verwendeten Korngemisch benötigt werden, kann eine erhebliche Reduktion des Versuchsaufwandes zur Charakterisierung und Vorhersage des viskoelastischen Steifigkeitsverhaltens von Asphalt realisiert werden. Zudem wird die Zuverlässigkeit der Steifigkeitsvorhersage im Vergleich zu derzeit verwendeten semi-empirischen Materialmodellen erhöht.

Die zuverlässige Bestimmung universal gültiger Eingangsparameter für solche Modelle ist entscheidend für deren Vorhersagequalität. Daher wurde die Identifikation des mechanischen Verhaltens von Bitumen in statischen und dynamischen Versuchen mit einem dynamischen Scherrheometer (DSR) detailliert untersucht, wobei die Auswirkungen der Temperaturverteilung innerhalb des geprüften Bitumenfilms aufgezeigt wurde. Außerdem wurde der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus statischen und dynamischen Prüfungen bestätigt.

Ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung universal gültiger Eingangsparameter für ein bestehendes Mehrskalmodell für Asphalt ist die Erweiterung dieses Modells um die Bitumenebene. Dabei wird der Aufbau eines repräsentativen Volumselements auf Basis der so genannten SARA-Fraktionierung abgeleitet, bei der Bitumen in gesättigte Kohlenwasserstoffe (saturates), Aromate (aromatics), Harze (resins) und Asphaltene (asphaltenes) aufgespalten wird. Zur Validierung dieses Konzepts wurden aus diesen Fraktionen künstliche Bitumen mit definiertem Asphaltengehalt hergestellt, wobei deren Gleichwertigkeit mit Bitumen in Form von rheologischem Verhalten und der Mikrostruktur bestätigt wurde. Überdies hinaus wurden die Auswirkungen von Alterung auf die Mikrostruktur von Bitumen untersucht und die auftretenden Effekte mit Hilfe des präsentierten Modells beschrieben.