



Chiara Riccardi

Mechanistic Modeling of Bituminous Mortars to Predict Performance of Asphalt Mixtures Containing RAP

2017

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades einer Doktor-Ingenieurin/eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 21.02.2017

Disputation am: 08.05.2017

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Wistuba
Prof. Ing. Massimo Losa

Vorwort des Herausgebers

Die Arbeit von Frau Chiara Riccardi, M.Sc., ist im Bereich der Recyclingtechnologien von Asphaltstraßen angesiedelt. Bei der Wiederverwendung von Asphalt besteht die Herausforderung darin, das versprödete Altbitumen in das neue Asphaltmischgut einzubinden und gezielt mit frischem Bitumen zu verjüngen, ohne dabei Einbußen in den Gebrauchseigenschaften des neuen Asphalts hinnehmen zu müssen. Die Prüfung der Gebrauchseigenschaften von Asphalt mit Recyclinganteilen erfolgt heute mit Hilfe von Laborprüfungen, die mit einem hohen Aufwand in Bezug auf Probenherstellung, -prüfung und -auswertung verbunden sind. Die Eigenschaften des Altbitumens werden bestimmt, indem dieses zuerst aus dem Altasphalt durch ein Rückgewinnungsverfahren herausgelöst wird. Nachteilig dabei ist, dass die Eigenschaften des Altbitumens durch das Rückgewinnungsverfahren selbst verändert werden, was bisher wegen Alternativlosigkeit hingenommen wird.

Chiara Riccardi widmet sich in ihrer Arbeit der Prüfung und der Modellierung des rheologischen Stoffverhaltens von Bitumen, Asphaltmörtel (das ist das Gemenge aus Bitumen und feinen Gesteinskörnungen) und Asphalt. Sie nutzt in ihrer Bauform einheitliche rheologische Modelle, die für alle diese Materialphasen Gültigkeit haben, weil das Gebrauchsverhalten von Asphalt wesentlich (neben der inneren Asphaltstruktur) von den Bitumeneigenschaften bzw. von den Mörtel­eigenschaften gesteuert wird. Zunächst beleuchtet sie die Eigenschaften von Asphaltmörtel mit Recyclinganteilen, in dem sie aus dem Altasphalt die feine Kornfraktion aussiebt, die durch das 0,15 mm Sieb hindurchgeht. So umgeht sie das aufwendige Rückgewinnungsverfahren von Altbitumen. Dann nutzt sie bereits bestehende Modellansätze, die einerseits zur Modellierung von frischem Bitumen und andererseits zur Modellierung von Asphalt ohne Recyclinganteile bekannt sind. Sie prüft die Anwendung dieser Modelle und überträgt sie auf den Asphaltmörtel mit Recyclinganteilen, indem sie die Modellparameter anpasst. So findet sie eine lineare Korrelation im doppelt-logarithmischen Maßstab zwischen der charakteristischen Zeit von Bitumen, jener von Mörtel und jener von Asphalt, sodass sie den komplexen E-Modul von Asphalt mit dem 2S2P1D-Modell prognostizieren kann. Schließlich führt sie zahlreiche Laborprüfungen an ausgewählten Bitumen, Mörtel und Asphalten durch und validiert damit ihr Modell. Als Ergebnis liegt eine neue Vorgehensweise vor, mit der man den maximalen Anteil an Recyclingasphalt in einem neuen Asphaltmischgut mit deutlich reduziertem Prüfaufwand abschätzen kann, indem man (1.) vergleichsweise wenig aufwendige Bitumen- und Mörteluntersuchungen im Labor durchführt und sich (2.) die Extraktion des Bindemittels aus dem Altasphalt erspart.

Diese Arbeit wurde von Chiara Riccardi ab 2013 im Rahmen des Promotionsprogramms XXIX am Institut für Straßenwesen und am Institut für Civil and Roads Engineering bei Prof. Massimo Losa als Dissertation bearbeitet und mit der Disputation in Wolfenbüttel am 8. Mai 2017 erfolgreich abgeschlossen. Ich freue mich sehr, dass sie ab Dezember 2016 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Straßenwesen gewonnen werden konnte. Ich wünsche ihr beruflich und privat weiterhin viel Erfolg!

Braunschweig, im June 2017
Michael P. Wistuba

Abstract

In last decades the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) materials in asphalt mixtures has seen a significant expansion for economical and environmental reasons. Nevertheless, there are still two important issues which have not been effectively solved: the first regards the characterization of the aged binder contained in RAP; the second concerns the ability to predict the performance of asphalt mixture composed with high RAP content.

Regarding the first problem, the current methods are based on extraction and recovery of the RAP binder using solvents; however, these methods are not fully accurate since they can alter the rheological properties of the binder. For this reason, in the present work, a new procedure to back-calculate the rheological properties of the aged binder contained in RAP materials and of the blends composed with fresh and RAP binder, was developed. This is based on DSR tests performed on mortars, composed by mixing the fine fraction of the RAP aggregate with virgin binder. Using the Nielsen model, specifically adapted to asphalt mortars' case and the Voigt model, the rheological properties of RAP binder can be back-calculated from mortars tests. The present procedure has two advantages: the aged binder contained in RAP is tested as it is after the milling process, avoiding any further treatments, while the testing campaign is centered on the mortar phase, which is one of the most important phases governing the properties of the mixtures and, therefore, the performance of asphalt pavements.

Regarding the second problem, a multi-scale approach based on rheological model (2 Spring, 2 Parabolic Elements, 1 Dashpot, 2S2P1D model) and on empirical models (Hirsh e Witzak models) was developed to predict the rheological properties of asphalt mixture containing RAP materials, starting from tests on asphalt mortars and taking into account the grading of the aggregates and the volumetric composition of the mixtures.

This methodology allows to make reliable previsions for both the problems addressed, as demonstrated by the results of the validation tests carried out in this doctoral thesis. In addition, the present research provides innovative solutions to address some of the issues which are currently of particular importance for the purposes of extending the use of RAP material in the production of asphalt mixture.

Key words: RAP, mortar, blend, rheology, Nielsen model, Voigt model, 2S2P1D model, Hirsh model, Witzak model.

Abstract

In den vergangenen Jahrzehnten hat der Einsatz von Ausbauasphalt beziehungsweise Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Asphaltmischgut aus ökonomischen und ökologischen Gründen eine deutliche Ausweitung erfahren. Jedoch gibt es bezüglich zwei wichtiger Aspekte, noch keine effektiven Lösungsansätze: Der erste Aspekt ist die Charakterisierung des im RAP enthaltenen gealterten Bitumens; Der zweite Aspekt betrifft die Prognose der Gebrauchseigenschaften von Asphalt mit einem hohen Zugabeanteil von RAP.

Hinsichtlich des ersten Problems beruhen die derzeitigen Verfahren auf der Extraktion und Wiedergewinnung des RAP-Bindemittels unter Verwendung von Lösemitteln; Diese Verfahren sind jedoch nicht hinreichend genau, da sie die rheologischen Eigenschaften des Bindemittels verändern können. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit ein neues Verfahren zur Rückrechnung der rheologischen Eigenschaften des in RAP-Materialien enthaltenen gealterten Bindemittels und der Verschneidung des frischen und des RAP-Bindemittels entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf DSR-Analytik, die an Asphaltmörteln durchgeführt wurde. Die Asphaltmörtel wurden aus dem feinen Anteil des RAP und frischem Bindemittel zusammengesetzt. Auf Basis des Voigt-Modells in Kombination mit dem Nielsen-Modell, das speziell bezüglich der Asphaltmörteleigenschaften angepasst wurde, können die rheologischen Eigenschaften des RAP-Bindemittels aus den Ergebnissen der DSR-Analytik zurückberechnet werden. Das vorliegende Verfahren bietet zwei Vorteile: Das im RAP enthaltene gealterte Bindemittel kann direkt nach dem Fräsvorgang getestet werden ohne weitere Konditionierung. Weiterhin konzentrieren sich die Untersuchungen an der Asphaltmörtelphase, welche maßgebenden Einfluss auf die Asphaltmischguteigenschaften und den resultierenden Gebrauchseigenschaften hat.

In Bezug auf das zweite Problem wurde ein Mehrskaliges Modell angewandt, das auf einem rheologischen Modell (2 Spring (Federn), 2 Parabolische Elemente, 1 Dämpfer, 2S2P1D Modell) und auf empirischen Modellen (Hirsh e Witczak Modelle) basiert, um die rheologischen Eigenschaften des Asphalts zu prognostizieren. Die Eingangsparameter des Mehrskaligen Modells werden mittels DSR-Analytik am Asphaltmörtel unter Berücksichtigung der Korngrößenverteilung und der volumetrischen Zusammensetzung bestimmt.

Die Validierungsergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die entwickelte Methodik eine zuverlässige Prognose der angesprochenen Aspekte ermöglicht. Darüber hinaus bieten die referierten Ergebnisse innovative Lösungsansätze, um die Verwendung von RAP in der Asphaltmischgutproduktion zu maximieren.

Schlüsselwörter: RAP, Asphaltmörtel, Rheologie, Nielsen Modell, Voigt Modell, 2S2P1D Modell, Hirsh Modell, Witczak Modell.

Acknowledgements

I would like to express my gratitude towards a number of individuals who have helped make this research possible. First, my two advisors, Prof. Massimo Losa and Prof. Michael Wistuba, which gave me the possibility to do this incredible experience that really changes my life. Thanks for guiding and supporting me during these three years, also in the tough moments.

I would like to thank Dr. Augusto Cannone Falchetto for his precious support and help.

I would like to thank Prof. Pietro Leandri and Ing. Patrizia Rocchio for their advices and encouragement during the years.

I would like to thank all the ISBS team for helping me with the huge amounts of laboratory tests, and also for their support during my stay in Braunschweig.

I would like to thank all my friends (the old and the new one) with whom I share many of the joys and challenges of these three years.

I would like to thank my family for their love, support, and constant encouragement over the years. In particular, I would like to thank my brother for always staying close to me even if he was physically far away.

Lastly, and most importantly, I would like to thank my future husband, Gaspare, for his love, support, and patience throughout this process, without which I most certainly would not have succeeded.

Finally, I would like to thank and dedicate this thesis to my mother, Giovanna. Although it has been years since you have passed, I still take your teaching and your dreams with me, every day.

Index

<i>Abstract (in English)</i>	i
<i>Abstract (in Italian)</i>	ii
<i>Abstract (in German)</i>	iii
<i>Acknowledgements</i>	iv
<i>Index</i>	v
Chapter 1	1
1. Introduction	1
1.1 Context	1
1.2 Objective	1
1.3 Overview of the methodology	2
1.4 Innovative Aspects	3
1.5 Practical application of the procedure	4
Chapter 2	5
2. Literature review	5
2.1 Existing models	5
E.1 2S2P1D Model	5
E.2 Empirical Models to determine the complex modulus of mixtures from the complex modulus of binders	8
E.2.1 Hirsch model	8
E.2.2 Witczak 1-40D model	9
E.3 Nielsen model	9
E.4 Voigt Model	12
E.5 Arrhenius Model	13
2.2 Master Curves	13
2.2.1 Christensen Anderson Maresteanu (CAM) model.....	13
2.2.2 Sigmoidal model.....	14
Chapter 3	15
3. Estimation of the rheological properties of RAP binders avoiding the extraction and recovery method	15
3.1 Development of a new procedure to estimate the RAP binder properties from results on mortar tests	15
3.1.1 Development of the Enhanced Nielsen model (N.1)	16
3.1.2 Description of materials and tests.....	18
3.1.2.1 Artificial RAP source.....	20
3.1.2.2 Italian RAP source	24
3.1.2.3 English RAP source	31
3.1.2.4 German RAP source.....	36
3.1.3 Practical application of the procedure	42

3.1.3.1 Calibration of the Enhanced Nielsen model parameters on BSRAP mortar	42
3.1.3.2 Extension of the calibrated Enhanced Nielsen model to SRAP mortars	45
3.1.3.3 Application of the Voigt model to estimate the rheological properties of RAP binder	47
3.1.3.4 Global validation of the procedure	50
3.1.3.5 Application of the procedure to Italian RAP source	53
3.2 Implementation of a new procedure to back-calculate the Performance Grade (PG) of binders from Master Curves.....	55
3.2.1 High Temperature PG	57
3.2.2 Low Temperature PG	59
3.3 Determination of the maximum amount of RAP that can be added in a mixture without compromising its performance.....	63
3.3.1 Blending charts to determine the maximum amount of RAP	63
3.3.2 Analytical procedure to determine the maximum amount of RAP	65
Chapter 4.....	69
4. Implementation of the 2S2P1D Model for multiscale modeling of asphalt mixtures... 69	
4.1 Extension of the 2S2P1D model to binder/mortar (N.2)	69
4.1.1. Materials and Tests	70
4.1.2 Calibration of the 2S2P1D model	72
4.1.3 Relationship between the characteristic times of binder and of mortar	74
4.1.3.1 Influence of RAP percentage	75
4.1.4 Validation	78
4.2 Extension of the 2S2P1D model to mortar/mixture (N.3)	82
4.2.1. Materials and Tests	83
4.2.1.1 Asphalt mixtures	83
4.2.1.2 Asphalt mortars and asphalt blends	89
4.2.2 Calibration of the 2S2P1D model	89
4.2.3 Relationship between the characteristic time of mortar and of mixture	90
4.2.4 Validation	91
4.3 2S2P1D Model linking binder/mixture phases.....	92
4.3.1. Materials and Tests	93
4.3.2 2S2P1D model fitting and determination of the α parameter	96
4.3.3 Multiple-regression analysis of parameter α	98
4.4 Summary	99
Chapter 5.....	103
5. Empirical models	103
5.1 Hirsch model	103
5.2 Witczak model.....	106
5.3 Summary	109
Chapter 6.....	113
6. Conclusion	113
References	115
ANNEX 1.....	123

Chapter 1

1. Introduction

1.1 Context

In the last decades, the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) materials in asphalt mixtures has seen a significant expansion due to the increase of materials costs, and to a deeper understanding for a more environmentally oriented construction process (Kennedy et al., 1998; Holtz and Eighmy, 2000, McGraw et al., 2010; Wistuba et al., 2012; Radenberg et al., 2012, Cannone Falchetto et al., 2012). The use of RAP can increase the sustainability of asphalt pavements by reducing the use of new asphalt binder and virgin aggregates and by limiting material disposal (Hansen and Copeland, 2014).

Despite the massive use of RAP in the production of asphalt pavement, an accurate estimation of the rheological properties of the aged binder contained in RAP materials is still a challenge. In literature phenomenological and theoretical relations are available for evaluating performance of asphalt mixtures starting from binder properties. Yet, relevant problems arise when these approaches are used for RAP that are related mainly to difficulties in determining properties of the aged RAP binder.

Current methodologies used to determine properties of the RAP binder are based on the extraction and recovery method, as specified in EN 12694, EN12697 and in AASHTO T164, but many research studies (Stroup-Gardiner and Nelson, 2000; Ma and Zhang, 2008; Ma and Huang, 2008) consistently showed that this method is not accurate for many reasons: 1) it alters the binder properties; 2) the solvent extraction produces binder hardening, as shown by Kondrath, 2009 and Burr et al., 1991. Further concerns are associated to the presence of residual solvent after recovery and to the further aging of binder during the heating process. For example, researches indicated even 0.5% residual solvent could cause a 50% decrease in viscosity (Peterson et al., 2000).

These problems considering, its difficult to predict reliably mixture performance from properties of the blend of fresh and RAP binders, and, therefore, its difficult to determine the maximum percentage of RAP, without elaborate asphalt mixture testing, that can be added into a mixture without compromising its rheological and mechanical performance.

1.2 Objective

In order to overcome the limitations listed in the previous section, this thesis focuses on an analytical forward and inverse modeling with the aim of predicting RAP-modified asphalt materials performance across the different material phases. Asphalt mixture is commonly modeled as a composite material consisting of three constituents: air voids, asphalt binder and aggregate of different size and shape. In

the past and more recently, different research efforts have conventionally identified a number of phases within asphalt mixture: asphalt mastic, mortar, fine aggregate matrix (FAM). In particular, asphalt mastic contains fillers ranging from $1\mu\text{m}$ to $75\mu\text{m}$ in a binder matrix; mortar containing fine aggregate particles from $75\mu\text{m}$ to $150\mu\text{m}$ in a mastic matrix (Arshadi et al., 2014); and FAM are composed of fine aggregate particles smaller than 1.18 mm or 2.36 mm, depending on the Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS) of the mixture (Underwood et al., 2013), in a mortar matrix. The goal of the present thesis is achieved through the possibility of experimentally measuring the properties of binders, mortars and mixtures, while avoiding extraction and recovery of the RAP binder, and by rheological modeling the interrelation between the different material phases (a detailed explanation of the methodology is presented in the following section).

This approach will be validated through a preliminary investigation of different mechanical properties for limited types of material factor-level combinations (such as particles content, binder type, RAP source, aging levels).

The research plan consists in the development of a new procedure, that is based on a multi-phase approach, for predicting the mechanical properties of asphalt mixture, such as Complex modulus E^* and phase angle δ , from those of binders and mortars; particularly, these latter are composed of a selected fine fraction of RAP (passing the 0.15 mm sieve) and fresh binder. Based on this procedure, the extraction and recovery method is avoided, and the RAP binder contained in the selected fraction of the RAP can be used directly for testing, avoiding any further type of treatment (solvent extraction, oxidation). Moreover, tests on asphalt mixtures samples that are costly and time consuming, can be avoided or considerably reduced.

The proposed procedure can be used also in the inverse mode for determining properties of binders directly from tests on mortars; by this way, existing models, specifically adapted, can be used directly to predict the mechanical properties of mixtures from binder properties avoiding the extraction and recovery of the RAP binder.

1.3 Overview of the methodology

The methodology used in the present study is summarized in the flow chart of Figure 1; letter E identifies the existing models while letter N indicates the newly proposed linking relationships between the different material phases, which are addressed in this thesis.