

**ALE Formulation of Inelastic,
Temperature-Dependent and Fluid-Infiltrated
Layered Pavement Structures at Loading by
Steady State Rolling Tires**

**ALE Formulierung inelastischer,
temperaturabhängiger und fluidinfiltrierter
geschichteter Fahrbahnstrukturen
unter der Belastung stationär rollender Reifen**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Ines Wollny
geboren am 02. März 1985 in Dresden

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Oeser
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Assistant Professor Ph.D. Steve WaiChing Sun
Columbia University New York

Tag der Einreichung: 19. September 2017

Tag der Verteidigung: 23. Januar 2018

Summary

Pavements, which are one key element of the world wide infrastructure, are exposed to increasing traffic loads as well as changing climatic conditions. Thereby, pavement damage like ruts and cracks occurs even nowadays before the end of the expected lifetime. In order to enable the future design of more durable pavements, first of all, the structural and temperature dependent behavior of the layered pavement structures at rolling tire load must be investigated and understood. Since experimental investigations are intensive in cost and time and, further, limited to the experimental boundary conditions, a numerical investigation of pavements at rolling tire load is obvious and advantageous.

The present work presents a framework for a realistic and numerically efficient modelling of layered, temperature dependent and inelastic pavements as well as fluid infiltrated soils at steady state rolling tire load. The numerical model bases on an arbitrary LAGRANGIAN-EULERIAN (ALE) formulation that describes the interaction between steady state rolling tire and the pavement in a relative kinematic manner by introducing a moving reference frame. One key aspect of the present work is the consideration of the inelastic and temperature dependent properties of the pavement materials in the ALE frame. Further, the structural behavior of pavements is significantly influenced by the properties of the layer bond between the single pavement layers. An adequate representation of the bonding properties in the ALE pavement model is reached in the presented work by the implementation of a temperature dependent viscoelastic cohesive zone model, which is enhanced to consider a normal stress dependent shear stiffness. In order to enable the consideration of the temperature dependent material and layer bond properties, the mechanical ALE pavement model is coupled to a transient thermal computation of the pavement cross-section under climatic impact. One further key aspect of the present work is the treatment of fully saturated porous media (e.g. soil materials) at rolling tire load. Therefore, a novel poromechanical ALE formulation is derived and implemented. Finally, the thermomechanical ALE pavement model as well as the poromechanical ALE model of a fully saturated subsoil are coupled sequentially to an ALE tire model in order to obtain realistic tire loads as impact on the pavement and subsoil, respectively. Several numerical computations verify the derived models and demonstrate their potential for numerical structural investigations.

Zusammenfassung

Straßen sind als ein enorm wichtiger Bestandteil der weltweiten Infrastruktur auch zukünftig weiter steigenden Verkehrslasten sowie sich ändernden klimatischen Einflüssen ausgesetzt. Dabei treten Straßenschäden wie Spurrinnen und Risse bereits heutzutage vor dem Ende der geplanten Lebensdauer in Straßenkonstruktionen auf. Um zukünftig dauerhaftere Fahrbahnen entwickeln und herstellen zu können, muss zunächst das temperaturabhängige Strukturverhalten der geschichteten Fahrbahnkonstruktionen unter der Belastung rollender Reifen untersucht und verstanden werden. Da experimentelle Untersuchungen zeit- und kostenintensiv und die Untersuchungsmöglichkeiten zusätzlich durch die experimentellen Randbedingungen limitiert sind, ist eine numerische Analyse der Fahrbahnen unter Reifenlast naheliegend und zielführend.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Rahmen für eine realitätsnahe und gleichzeitig numerisch effiziente Modellierung von geschichteten, temperaturabhängigen und inelastischen Fahrbahnen sowie von mit Wasser infiltrierten Böden unter der Belastung stationär rollender Reifen bereitgestellt. Die vorgeschlagene numerische Modellierung basiert auf einer sogenannten Arbitrary LAGRANGIAN EULERIAN (ALE)-Formulierung, welche die Interaktion zwischen dem stationär rollenden Reifen und der Fahrbahn durch die Einführung einer bewegten Referenzkonfiguration in einer relativkinematischen Betrachtungsweise beschreibt. Ein wesentlicher Aspekt der vorliegenden Arbeit ist dabei die Berücksichtigung der inelastischen und temperaturabhängigen Charakteristiken der Fahrbahnmaterialien in der ALE-Formulierung. Weiterhin beeinflusst das Verbundverhalten zwischen den einzelnen Fahrbahnschichten das Strukturverhalten der Fahrbahnen signifikant. Eine adäquate Berücksichtigung dieses Einflusses im ALE-Fahrbahnmodell wird durch die Implementierung eines temperaturabhängigen viskoelastischen Kohäsivzonenmodells erreicht, welches um eine normalspannungsabhängige Schersteifigkeit erweitert wird. Um die temperaturabhängigen Material- und Schichtenverbundeigenschaften im mechanischen ALE-Fahrbahnmodell berücksichtigen zu können, wird dieses mit einer transienten thermischen Berechnung des Fahrbahnquerschnitts infolge klimatischer Einflüsse gekoppelt. Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Modellierung vollständig gesättigter poröser Medien (z.B. Böden) unter rollender Reifenlast. Hierfür wird eine neue porenmechanische ALE-Formulierung entwickelt und implementiert. Anschließend werden das thermomechanische ALE-Fahrbahnmodell und das porenmechanische ALE-Modell der vollständig gesättigten Medien sequentiell mit einem ALE-Reifenmodell gekoppelt, um die Reifenlasten realitätsnah im Modell der Fahrbahn sowie der gesättigten Medien erfassen zu können. Mittels mehrerer numerischer Berechnungen werden die entwickelten Modelle verifiziert und ihr Potential für umfassende Strukturuntersuchungen herausgestellt.