A Dynamic ALE Formulation for Transient Simulations of Multilayered Inelastic Pavement Structures Subjected to Moving Loads

Eine dynamische ALE-Formulierung für transienter numerischer Berechnungen von mehrschichtigen, inelastischen Fahrbahnen unter beweglicher Lasten

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von
M.Sc. Atul Anantheswar

Gutachter: **Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske**
Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle
Technische Universität Dresden

Prof. Dr. Hao Wang
Rutgers University New Jersey

Tag der Verteidigung: 31. August 2026

Institut für
Statik & Dynamik
der Tragwerke

Technische
Universität
Dresden

Summary

Pavements, or roadways in general, are a crucial part of the transportation network, which is regarded as one of the critical infrastructures necessary for the smooth functioning of society. Technologies such as a digital twin of the road, therefore, play a vital role in prolonging the useful life of such infrastructure, through enhancements brought about from their application in design, operation and maintenance areas. Pavement structures are typically long and are generally homogeneous in the longitudinal direction. During the design phase of such structures, engineers typically use simulation strategies to estimate the response of pavements under the action of expected wheel loads from traffic. In some cases, transient simulations of such structures subjected to moving wheel loads may be necessary. However, if conventional simulation techniques are used, the entire length of pavement along the path of the moving wheel load would need to be considered in the analysis. Moreover, if a digital twin of the road is to be established, it would require several such simulations to make accurate predictions of pavement performance.

This thesis provides detailed documentation of the developments involved in derivation and implementation of a novel dynamic Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formulation, which has been demonstrated to dramatically improve the efficiency of transient numerical simulations of pavements subjected to moving loads. This formulation takes advantage of the possibility to introduce a moving reference frame afforded by the ALE approach. This reference frame can then be conveniently moved at the same velocity as that of the moving load. Doing so, offers a new perspective from the moving reference frame, in which, the load appears stationary while material of the pavement appears to flow beneath the load. This perspective can then be used as a sliding window over the path followed by the wheel load. Hence, the domain to be considered in the analyses can be significantly truncated, and only the relevant region of pavement in the immediate vicinity of the wheel load would need to be considered. This approach greatly improves the efficiency of simulations by limiting the domain, which needs to be considered.

The developed dynamic ALE formulation enables efficient parallel simulations to obtain the transient response of multilayered inelastic pavement structures. It is also able to capture the effects of acceleration, deceleration and changes in amplitude of the wheel loads. Simulation of wheel movement over curved paths is also significantly simplified. These aspects are thoroughly investigated in this thesis, and extensive numerical simulations are reported to highlight capabilities of the dynamic ALE formulation.

Zusammenfassung

Straßen bilden das zentrale Element des Verkehrsnetzes, welches als eine der kritischen Infrastrukturen für die reibungslose Funktion der Gesellschaft angesehen wird. Technologien wie ein digitaler Zwilling der Straße haben ein großes Potential zur Optimierung dieser Infrastruktur. Ihr Einsatz ermöglicht vielseitige Verbesserungen in den Bereichen Design, Betrieb und Wartung. Fahrbahnstrukturen sind typischerweise lang und in Längsrichtung homogen. Während der Entwurfsphase solcher Strukturen verwenden Ingenieure bisher überwiegend statische und stationäre Berechnungsmethoden, um die Reaktion der Fahrbahn unter der Wirkung erwarteter Radlasten aus dem Verkehr zu schätzen. Oft maßgebende Einwirkungen aus dynamischen Radlasten sowie Fahrmanövern wie Beschleunigen, Bremsen und Kurvenfahrten können allerdings mit statischen und stationären Berechnungen nicht ausreichend erfasst werden, was einen sehr hohen Rechenaufwand mit sich bringt. In diesen Fällen sind transiente numerische Berechnungen der Fahrbahn unter der Wirkung beweglicher Radlasten erforderlich. Allerdings muss bei der Verwendung konventioneller transienter Lagrangescher Berechnungsmethoden die gesamte Länge der Fahrbahn entlang des Weges der beweglichen Radlast in der Analyse berücksichtigt werden. Wenn ein digitaler Zwilling der Straße etabliert werden soll, wären eine Vielzahl solcher Berechnungen erforderlich, um genaue Vorhersagen der Fahrbahneigenschaften zu treffen.

Diese Dissertation bietet eine detaillierte Dokumentation der Entwicklung und Implementierung eines neuartigen dynamischen Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)-Formulierungsansatzes, der eine signifikante Effizienzsteigerung transienter numerischer Berechnungen von Fahrbahnen unter der Wirkung beweglicher Lasten ermöglicht. Diese Formulierung basiert auf dem klassischen ALE-Ansatz, wobei ein bewegliches Bezugssystem eingeführt wird. Dieses Bezugssystem wird mit der gleichen Geschwindigkeit wie die bewegten Last verschoben. Dadurch wechselt die Beobachterperspektive: die Last erscheint stationär, während das Material der Fahrbahn unter dieser Last vorbei fließt. Der Bereich, der in dieser Analyse berücksichtigt werden muss, kann erheblich reduziert werden, da nur der relevante Bereich der Fahrbahn in der unmittelbaren Nähe der Radlast berücksichtigt werden muss. Dieser Ansatz verbessert die Effizienz der numerischen Berechnungen erheblich.

Die entwickelte dynamische ALE-Formulierung ermöglicht effiziente, parallele numerische Berechnungen zur Ermittlung der transienten Reaktion von mehrschichtigen inelastischen Fahrbahnstrukturen. Sie kann die Auswirkungen von Beschleunigung, Verzögerung und Änderungen der Amplitude der Radlasten erfassen. Die numerische Darstellung der Bewegung der Radlast in Kurvenfahrten wird ebenfalls erheblich vereinfacht. Diese Aspekte werden in dieser Dissertation gründlich untersucht. Anhand umfangreiche numerische Beispiele werden durchgeführt und diskutiert, um die Leistungsfähigkeit der dynamischen ALE-Formulierung aufzuzeigen.