

Zustandsprognose von Eisenbahnbrücken mit Verfahren des maschinellen Lernens

Condition prediction of railway bridges using machine learning
methods

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

Dissertation

von
Hubert Edward Naraniecki, M.Sc.
geboren am 24. Dezember 1994 in Hannover

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml
Universität der Bundeswehr München
Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann-Diederich
Technische Universität Darmstadt

Tag der Einreichung: 30.05.2024

Tag der Verteidigung: 27.09.2024

Zusammenfassung

Die Bedeutung von Brücken für Mobilität und Warentransport, das hohe Bauwerkalter und die gestiegenen Verkehrseinwirkungen bewirken, dass der Bauwerkserhalt zunehmend an Gewicht gewinnt. Sowohl für Eisenbahn- als auch für Straßenbrücken wird national eine reaktive Instandhaltungsstrategie angewendet, wodurch erst nach Schadenseintritt Instandhaltungsmaßnahmen geplant werden können. Die angewendete Instandhaltungsstrategie führt unter anderem zu nicht planbaren und langwierigen Verfügbarkeitseinschränkungen der Bauwerke. Um den beschriebenen Problemen zu begegnen, braucht es einen Wandel der derzeitigen Instandhaltungsstrategie. Die prädiktive Instandhaltungsstrategie verfolgt das Ziel, Zustandsänderungen mithilfe von Zustandsprognosemodellen vorherzusagen und somit frühzeitig Probleme zu identifizieren und zu lösen. Unter anderem können Zustandsprognosemodelle auf Infrastrukturdaten basieren, welche in Brücken-Management-Systemen der Infrastrukturbetreiber gespeichert sind.

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit beschäftigt sich mit Zustandsprognosemodellen für Eisenbahnbrücken in Deutschland und deren möglicher Anwendung in einem Instandhaltungsmanagement. Mit der Kombination unterschiedlicher Arten von Infrastrukturdaten aus dem Brücken-Management-System der DB Netz AG wurde eine Datengrundlage für die Erstellung von Zustandsprognosemodellen geschaffen. Als wesentliche, bisher noch nicht verwendete Eingangsmerkmale wurden Schäden integriert und untersucht, ob diese die Leistung von Prognosemodellen verbessern können. Entscheidungsbäume als erklärbares maschinelles Lernverfahren sowie Multi-Layer Perceptrons als sogenannte Black-Box Modelle wurden für das Training von Zustandsprognosemodellen verwendet. Für die Hauptbauarten (Stahlbeton, Spannbeton, Stahl, Walzträger in Beton und Gewölbe) von Eisenbahnbrücken wurden für die Bauwerksteile Überbauten, Widerlager und Pfeiler jeweils Modelle zur Zustandsprognose erstellt. Durch das Einbeziehen von Schäden als Merkmale konnten ähnlich gute Prognoseleistungen mit beiden maschinellen Lernverfahren erzielt werden. Weiterhin konnte anhand der wichtigsten Merkmale der Modelle gezeigt werden, dass Schäden einen erheblichen Einfluss auf die Zustandsprognose besitzen. Mit den ähnlichen Prognoseleistungen zwischen Entscheidungsbäumen und Multi-Layer Perceptrons wurde ersichtlich, dass mit Schäden als Merkmale auch simple erklärbare Lernverfahren für die Zustandsprognose auf Grundlage von Infrastrukturdaten eingesetzt werden können. Die trainierten Modelle wurden bezüglich ihrer praktischen Anwendbarkeit bewertet. Für Brücken aus Spannbeton und Stahl sowie für Walzträger in Beton Brücken konnten ausgeglichene Modelle trainiert werden, welche eine gute Vorhersage aller Zustände ermöglichen und einen geringen kritischen Fehlklassifikationsanteil besitzen.

Zum Ende der Arbeit wurden die Anwendung der Zustandsprognosemodelle sowie die damit einhergehenden Grenzen aufgezeigt. Die auf Schäden basierten Zustandsprognosemodelle sind von den in Inspektionen aufgenommenen Schäden und der Entwicklung der Schadensausprägungen abhängig. Für einen Vergleich der prognostizierten Zustände wurden bauartenbezogene Alterungskurven aus Inspektionsdaten mit einem Erfassungszeitraum von ungefähr 21 Jahren abgeleitet. Die aus den Zustandsprognosemodellen abgeleiteten Alterungskurven liefern einen prädiktiven Ansatz für das Instandhaltungsmanagement und damit eine mögliche Grundlage für den Wandel der Instandhaltungsstrategie.

Schlagwörter:

Eisenbahnbrücken; Zustandsprognose; Entscheidungsbäume; Neuronale Netze; Instandhaltungsmanagement; Brückeninstandhaltung

Abstract

The importance of bridges for mobility and transport of goods, the advanced age of structures, and the increased traffic volume mean that bridge maintenance is becoming increasingly important. A reactive maintenance strategy is used nationally for railway and road bridges, meaning maintenance measures can only be planned after damages have already occurred. The used maintenance strategy leads, among other things, to unpredictable and lengthy restrictions on the availability of the bridges. In order to counter the problems described, the current maintenance strategy needs to be changed. The predictive maintenance strategy pursues the goal of predicting changes in bridge conditions with the help of bridge condition prediction models and thus reacting to problems early. Bridge condition prediction models can be based on infrastructure data stored in the bridge management systems of infrastructure operators.

This thesis deals with prediction models for the condition of railway bridges in Germany and their possible application in a maintenance management system. By combining different types of infrastructure data from the bridge management system of the DB Netz AG, a data basis for the creation of prediction models was created. Damages were integrated as an essential, previously unused input feature and analyzed to determine whether they could improve the performance of prediction models. Decision trees as an explainable machine learning method and multi-layer perceptrons as black-box models were used to train prediction models. For railway bridges main construction types (reinforced concrete, prestressed concrete, steel, rolled girders in concrete and arch bridges), models for bridge condition prediction were created for the superstructures, abutments, and pillars. Similarly, both machine learning methods achieved good prediction performance by including damages as features. Furthermore, the most important features of the models were used to show that damages have a considerable influence on the bridge condition prediction. The similar prediction performance between decision trees and multi-layer perceptrons showed that with damages as features, simple explainable learning methods can also be used for condition prediction based on infrastructure data. The trained models were evaluated in terms of their practical applicability. Balanced models were trained for bridges made of prestressed concrete and steel and for bridges with rolled girders in concrete, which enable a good prediction of all bridge conditions and have a low critical misclassification rate.

At the end of the thesis, the application of the prediction models and the associated limitations were demonstrated. The prediction models depend on the damages recorded in inspections and the development of the damage severity. For a comparison of the predicted bridge conditions, aging curves based on the type of construction were derived from inspection data with a recording period of approximately 21 years. The aging curves derived from the prediction models provide a predictive approach for maintenance management and, thus, a possible basis for changing the maintenance strategy.

Keywords:

railway bridges; condition prediction; decision trees; neuronal networks; maintenance management; bridge maintenance