
Untersuchungen zum Einbau des Fahrbahnbelags auf Stahl- und Verbundbrücken

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Untersuchungen zum Einbau des Fahrbahnbelags auf Stahl- und Ver- bundbrücken

von

Richard Brand, Markus Feldmann, Achim Geßler, Damian Händeler, Ciara Kenny,
Anna-Lea Krumpfen, Cornelius Schröder, Christian Schulze
Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, Lehrstuhl und Institut für Stahlbau,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 15.0655

Untersuchungen zum Einbau des Fahrbahnbelags auf Stahl- und Verbundbrücken

Fachbetreuung:
Iris Hindersmann

Referat:
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-b-15.0655>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht.
Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an verlag@bast.de zur Verfügung ge-
stellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte
nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechani-
sche Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwe-
sen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Kurzfassung

Untersuchungen zum Einbau des Fahrbahnbelags auf Stahl- und Verbundbrücken

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts ist ein Ansatz entwickelt und validiert worden, um die Beanspruchungen aus dem Einbau des Heißasphalts auf Stahlbrücken zu bestimmen. Für diese Untersuchungen wurden für zwei repräsentative Stahlbrückenbauwerke (Hochmoselbrücke mit Hohlkastenquerschnitt und Mühlenfließbrücke mit offenem Querschnitt auf zwei Hauptträgern) detaillierte FEM-Auschnittmodelle in ANSYS erstellt. Diese Modelle erlauben eine thermisch transiente Simulation des Heißasphalteinbaus zur Erfassung der Temperaturentwicklungen in dem Stahlbrückenquerschnitt. Der Vergleich mit beim Heißasphalteinbau aufgenommenen Messdaten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

In den Simulationen wurden eine Vielzahl von Parametern untersucht, die vom Herstellungsprozess und von meteorologisch klimatischen Randbedingungen abhängig sind, wobei die Grundfunktionalität der Beläge (wie Einbaubarkeit, Standfestigkeit, Griffigkeit, Dauerhaftigkeit) bei den betrachteten Grenzwerten der untersuchten Parameter gewährleistet bleibt:

- Anzahl Einbaubahnen (1, 2, 4)
- Einbautemperatur Asphaltmischgut (180°C bis 230°C)
- Ausgangstemperatur konstant über QS (5°C bis 30°C)
- Ausgangstemperatur gradierend über QS (0°C/ 5°C bis 25°C/ 50°C)
- Strahlung Asphalt (Emissionsverhältnis $\epsilon = 0$ bis 0,93)
- Einbaugeschwindigkeit (0,5 bis 2,5 m/min)
- Schichtdicke Schutzschicht (2,5 bis 5,0 cm)
- Schichtdicke Deckschicht (3,5 bis 4,5 cm)
- Bauart (1 oder 2) und Dicke Dichtungssystem (1,0 bis 2,5 mm; oder 5,0 bis 12,5 mm)
- Deckblechdicke (10 bis 14 mm)

Von den herstellprozessabhängigen Parametern sind in Bezug auf die Temperaturentwicklung die deutlichsten Effekte durch Variation der Einbautemperatur, der Schutzschichtdicke und der Auswahl und Dicke des Dichtungssystems zu verzeichnen. Dagegen sind die Effekte der Parameter Einbaugeschwindigkeit und Deckschichtdicke geringer.

Bei den meteorologisch klimatischen Randbedingungen hat die Höhe der Ausgangstemperatur einen hohen Einfluss auf die Maximaltemperatur in den Stahlbauteilen nach dem Asphalteinbau. Konstant über den Querschnitt veränderte Ausgangstemperaturen führen zu über den gesamten Querschnitt nahezu konstanten Temperaturänderungen. Dagegen ist der Einfluss von ausgänglichen Temperaturgradienten über den Querschnitt (z.B. Tagesgangkurven/ Sonneneinstrahlung) am Deckblech am größten.

Basierend auf den ermittelten Temperaturfeldern sind die transienten Spannungsentwicklungen am Brückenquerschnitt und in der orthotropen Fahrbahnplatte zu ermitteln.

Dabei sind neben den lokalen Spannungen infolge der örtlichen Temperaturbeanspruchungen auch die Spannungen aus globalen Einflüssen des gesamten Brückenbauwerks zu berücksichtigen.

Bei den zu untersuchenden großen Stahlbrücken sind aufgrund limitierender CPU keine befriedigenden Ergebnisse mit einem FEM-Einzelmodell möglich. Daher wurde ein FEM-Ausschnittmodell für die lokalen Effekte mit einem in MATLAB geschriebenen Lamellen-Modell kombiniert, welches die weiteren Effekte erfasst. Das Lamellenmodell berücksichtigt Kopplungen unter Einhaltung des Gleichgewichts sowie der Effekte aus Schubverzerrung. Die am lokalen FEM-Modell ermittelten thermisch transienten Temperaturfelder werden als Eingangsdatensätze verwendet. Die berechneten Spannungen stimmen sehr gut mit einem kurzen FEM-Beispielmodell sowie mit vorliegenden Messdaten an der Mühlenfließbrücke überein.

Für die wesentlichen Parameter der vorangegangenen thermischen Simulationen wurden Berechnungen mit dem Lamellenmodell durchgeführt und die maßgebenden Längsspannungen am Querschnitt, sowie die Verformungen am Anfangs- und Endauflager bestimmt.

Bei Variation der Einbautemperatur des Gussasphaltemischguts wird ein direkter, linearer Zusammenhang festgestellt. Eine Reduktion der Asphaltierbreite führt zu einer Zunahme der Druckspannungen in der Fahrbahnplatte, jedoch gleichzeitig zu einer Reduktion der Zugspannungen am Kragarm. Dagegen werden die höchsten Endlagerverschiebungen durch Erhöhung der Einbaugeschwindigkeit verursacht.

Bei den Untersuchungen der meteorologisch klimatischen Randbedingungen wird gezeigt, dass die Druckspannungen bei höheren Ausgangstemperaturen geringer sind. In dem Falle, dass der Brückenquerschnitt vor dem Asphaltieren nur am Deckblech eine höhere Temperatur aufweist, erzeugt die Temperaturbeanspruchung aus dem Heißasphalt vergleichsweise geringere Zugspannungen. An den Brückenendlagern addieren sich die Längsverformungen aus Heißasphalteinbau und hoher Umgebungstemperatur auf.

Mit der entwickelten kombinierten Methode können die o.g. Effekte erstmals – exemplarisch an der ausgewählten Mühlenfließbrücke – in Abhängigkeit von den verschiedenen untersuchten Parametervariationen quantifiziert werden.

Derzeit werden bei dem entwickelten Lamellenmodell die Verschiebungen in Lamellenebene und die Verdrehung senkrecht zur Lamellenebene berücksichtigt. Es besteht die Möglichkeit, das vorhandene Lamellenmodell für zusätzliche Freiheitsgrade weiterzuentwickeln.

Weiter steht die Übertragung der Methode zur Untersuchung des Heißasphalteinbaus auf andere Brückenbauwerke noch aus, dazu zählen neben Stahlbrücken anderer Bauart auch Verbundbrücken.

Abstract

Investigations regarding hot asphaltting on bridge decks of steel and composite bridges

The scope of this research project has been to develop an approach to determine the impact of hot asphaltting onto steel bridge structures and to validate it with measurement data. For two representative steel bridges, the “Hochmoselbrücke” with a box section and the “Mühlenfließbrücke” with an open cross section, detailed FEM-models have been created in ANSYS. These models allow a thermal transient simulation of the hot asphaltting, so that the temperature development within the structure of the orthotropic deck can be determined. A very good agreement is achieved with in-field measurement data.

An extensive parametric study to investigate both process dependent as well as meteorological climate dependent boundary conditions has been carried out, of course maintaining basic functions of the asphalt layer (i.e. processability, stability, grip, durability). The following parameters are investigated:

- Number of paving tracks (1, 2, 4)
- Asphalt laying temperature (180°C to 230°C)
- Initial temperature, const. over CS (5°C to 30°C)
- Initial temperature, gradient over CS (0°C/ 5°C to 25°C/ 50°C)
- Radiation Asphalt (emission ratio $\epsilon = 0$ to 0.93)
- Laying speed (0.5 to 2.5m/min)
- Protective layer thickness (2.5 to 5.0cm)
- Top layer thickness (3.5 to 4.5cm)
- Type of construction (1 or 2) and waterproofing system thickness (1.0 to 2.5mm; or 5.0 to 12.5mm)
- Deck plate thickness (10 to 14mm)

Looking at those process dependent parameters the most significant effects onto the temperature fields are from a variation of the initial asphalt laying temperature, the protective layer thickness and the choice of the type of construction with the waterproofing system thickness. The effects from a variation of the laying speed and of the top layer thickness are less significant.

With regard to meteorological boundary conditions the initial temperature of the structure has a direct impact on the maximum temperatures within the steel structural elements. While a constant variation of the initial temperature as well as a change of radiation emission leads to a constant temperature change over the whole cross section, the gradient variation of the initial temperature (as from direct solar irradiation or diurnal variation) has more impact on the temperatures only of the deck plate.

Based on the temperature fields derived from the thermal transient simulations the transient stresses over the section of the orthotropic plate are to be determined. Those

stresses are locally induced by the temperature field, but are also coming from the global structural behaviour effected by the global temperature development.

Since the ANSYS models cannot handle such transient static mechanic analysis for large bridges due to CPU-time, a new calculation approach has been developed, which is based on a combined stress analysis using an additional lamella model for the global analysis, written in MATLAB. The lamella model is being coupled under equilibrium conditions and consider shear strain effects. The thermal transient fields determined with the local FEM-model are to be taken as input data.

The calculated stresses using that combined stress analysis has been compared with full FEM analysis on a short bridge example and with in-field measurement data of the long "Mühlenfließbrücke" and match very well.

For selected parameters from the above list additional calculations have been carried out with the combined stress analysis using the lamella model to determine the longitudinal stresses over the cross section as well as the deformations of the bridge at the abutments.

The variation of the asphalt laying temperature shows a direct linear correlation. A reduction of the paving track width leads to an increase of compression stresses in the deck plate, but at the same time to a significant reduction of tension stresses at the sidelong lever arms. On the other hand, the most significant increase of displacement at the end abutment has been calculated for a maximum laying speed.

Investigating the meteorological boundary conditions shows that the compression stresses are less when the initial temperature of the bridge structure is higher. For the case, that the deck plate of the bridge structure has already a higher temperature than the rest of the cross section below, the temperature induced tension stresses from asphaltting are relatively lower. With regard to the abutment displacements any deformation from the hot asphaltting adds onto other deformations from other temperature increases (e.g. in summer).

Using the new calculation method of the combined analysis with the lamella model allows for a first time to quantify the described effects depending on the different investigated parameter variations, here exemplarily carried out for the selected "Mühlenfließbrücke".

At this time, the lamella model considers only displacements within the lamella plane and rotations perpendicular to the lamella plane. A development to include further degrees of freedom is possible.

Also, a transfer of this method towards investigating the impact of hot asphaltting for other bridge structures, not only other steel bridges but also including composite bridges remains open.

Kurzbericht

Untersuchungen zum Einbau des Fahrbahnbelags auf Stahl- und Verbundbrücken

Einleitung

Der Einbau des Asphalt-Brückenbelags und die damit auf die Tragkonstruktion einwirkenden Temperaturzwängungen werden bei der Bemessung von Brückenbauwerken nicht berücksichtigt. Im Rahmen der Bauwerksprüfung von Stahlbrücken werden jedoch nach einem Belagsaustausch oft eine erhöhte Anzahl an Schweißnahttrissen festgestellt. Im aktuellen Entwurf der Neufassung prEN 1991-1-5: 2023 werden inzwischen zumindest allgemeine Grundsätze bzgl. der Berücksichtigung des Einbaus von Heißasphalt auf Brückenüberbauten beschrieben.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts ist daher ein Ansatz entwickelt und validiert worden, um die Beanspruchungen aus dem Einbau des Heißasphalts auf die Konstruktion auch von Stahlbrücken mit großer Länge zu bestimmen. Durch den Einbauprozess mit einem Asphaltfertiger entwickeln sich zeitlich transiente Temperaturfelder in den Längs- und Quertragstrukturen der Brücke, welche zu temperaturinduzierten mechanischen Spannungen wie auch zu Bauwerksverformungen und Beanspruchungen an den Auflagern führen.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen der Temperaturentwicklungen wurden zwei repräsentative Stahlbrückenbauwerke, zum einen die Hochmoselbrücke mit Hohlkastenquerschnitt und zum anderen die Mühlenfließbrücke mit einem offenen Querschnitt auf zwei Hauptträgern, ausgewählt. Für beide Brücken lagen umfangreiche orts- und zeitabhängige Messdaten zur Erfassung der Temperatur- und Spannungseffekte infolge des Einbaus der Asphaltschicht aus vorangegangenen Forschungsprojekten vor.

FE-Modellierung für die Temperaturentwicklungen

Von beiden Brückenbauwerken werden zunächst detaillierte FEM-Ausschnittmodelle in der Software-Umgebung ANSYS erstellt. Diese Modelle erlauben eine thermisch transiente Simulation des Heißasphalteinbaus. Damit lassen sich am Modell die Temperaturentwicklungen in den verschiedenen Bereichen des Stahlbrückenquerschnitts, insbesondere der orthotropen Fahrbahnplatte, d.h. Deckblech, Längsrippen, Querträger (hier auch an den Durchstoßpunkten), erfassen, die sich bei dem Heißasphalteinbau ergeben.

Der Vergleich mit den über einen ausreichend langen Zeitraum beim Heißasphalteinbau aufgenommenen Messdaten erlaubt eine Kalibration der Simulationsmodelle an beiden Brückenbauwerken. Im Zuge der Kalibration wird eine sehr gute Übereinstimmung erreicht, da der genaue Querschnittsaufbau einbezüglich der Geometrie und der relevanten physikalischen Eigenschaften in der thermischen Analyse der Simulation berücksichtigt werden können.

Somit konnten in den anschließenden Simulationen eine Vielzahl von Parametern, die von dem Herstellungsprozess und von meteorologisch klimatischen Randbedingungen abhängig sind, untersucht werden.

Für diese Parameter sind zuvor die Untersuchungsbereiche in Form von Minimal- und Maximalwerten abgeschätzt worden, die als Beanspruchung bei den FEM-Berechnungen in Frage kommen. Diese Untersuchungsbereiche basieren auf einer Literaturstudie und Marktanalyse zur Bewertung der praxisrelevanten Fertigerkonzepte beim Einbau des Heißasphalts. Somit wird sichergestellt, dass die Grundfunktionalität der Beläge (wie z.B. Einbaubarkeit, Standfestigkeit, Oberflächenstruktur / Griffigkeit, Dauerhaftigkeit) bei den betrachteten Grenzwerten der untersuchten Parameter gewährleistet bleibt.

In der Tabelle werden diese Parameter mit den jeweiligen Untersuchungsbereichen der thermischen Simulationen zusammengestellt.

Tabelle 1: Parametervariation der thermischen Simulationen an den ausgewählten Stahlbrücken

| Parameter | Variation | | | | | | | |
|--|-----------|-----|--------|------|----------|--------|-------|-----|
| Anzahl Einbaubahnen (Gesamteinbaubreite: 2 Fahrstreifen + Standstreifen) | 1 | | 2 | | | 4 | | |
| Einbautemperatur Asphaltmischgut | 180 °C | | 200 °C | | | 230 °C | | |
| Ausgangstemperatur konstant über QS | 5 °C | | 10 °C | | 17 °C | | 25 °C | |
| Temperatur Deckblech | 5 °C | | 10 °C | | 17 °C | | 30 °C | |
| Temperatur sonstige Stahlbauteile | 5 °C | | 10 °C | | 17 °C | | 25 °C | |
| Ausgangstemperatur gradierend über QS | 5 °C | | 15 °C | | 17 °C | | 25 °C | |
| Temperatur Deckblech | 0 °C | | 5 °C | | 10 °C | | 17 °C | |
| Temperatur sonstige Stahlbauteile | 0 °C | | 5 °C | | 10 °C | | 25 °C | |
| Strahlung Asphalt Emissionsverhältnis ϵ | 0,00 | | 0,50 | | | 0,93 | | |
| Einbaugeschwindigkeit [m/min] | 0,5 | | 1,0 | | 1,5 | | 2,5 | |
| Schichtdicke Schutzschicht [cm] | 2,5 | | 3,0 | | 3,5 | | 5,0 | |
| Schichtdicke Deckschicht [cm] | 3,5 | | 4,0 | | | 4,5 | | |
| Bauart und Dicke Dichtungssystem [mm] | Bauart 2 | | | | Bauart 1 | | | |
| | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| Deckblechdicke [mm] | 10 | | 12 | | | 14 | | |

Kombinierte Spannungsermittlung mit FEM und Lamellen-Modell

Basierend auf den aus der thermisch transienten Simulation ermittelten Temperaturfeldern waren die transienten Spannungsentwicklungen am Brückenquerschnitt und in

der orthotropen Fahrbahnplatte zu ermitteln. Dabei sind neben den lokalen Spannungen infolge der örtlichen Temperaturbeanspruchungen auch die Spannungen aus der globalen Temperaturbeanspruchung und dem globalen Tragverhalten des gesamten Brückenbauwerks zu berücksichtigen. Für das ausgewählte Brückenbauwerk der Mühlenfließbrücke lagen hierzu Messdaten während des Heißasphalteinbaus vor. Die Simulationsaufgabe musste folgende Bedingungen erfüllen:

1. Abbildung des gesamten Brückenbauwerks, um die globalen Auswirkungen zu erfassen.
2. Ausreichende Netzauflösung zur Erfassung der lokalen Spannungsauswirkungen.

Es stellte sich heraus, dass bei den zu untersuchenden großen Stahlbrücken auch bei den heutigen, an Universitäten zur Verfügung stehenden Computerleistungen, eine hinreichende Erfüllung beider Bedingungen, auch unter Anpassung der jeweils erforderlichen Netzdichte, nicht mit einem FEM-Einzelmodell möglich ist. Deswegen wurde auf die Möglichkeit der Modellreduktion in Form der Kombination eines FEM-Modells für die lokalen Effekte in einem Ausschnittbereich mit einem die weiteren Effekte erfassenden Lamellen-Modell zurückgegriffen.

Hierzu werden für das Gesamtbauwerk der Mühlenfließbrücke Lamellen-Modelle jeweils für die Fahrbahnkonstruktion und die beiden anschließenden Hauptträger getrennt erstellt. Das Lamellenmodell mit seinen Matrizen für Steifigkeit, Beanspruchungen und Randbedingungen wird mit der handelsüblichen Software MATLAB aufgebaut. Bei der Kopplung der Einzellamellenmodelle werden Gleichgewichtsbedingungen sowie auch besondere Effekte aus dem Schubverzerrungsverhalten beachtet. Die am lokalen FEM-Modell ermittelten thermisch transienten Temperaturfelder können als Eingangsdatensätze verwendet werden.

Die mit diesem Lamellen-Modell berechneten Spannungen an der Fahrbahnplatte und am Hauptträger werden zunächst für ein 2-Feld-Träger-Brückenmodell mit den jeweils gegebenen Querschnitten mit den an einem detaillierten FEM-Modell berechneten Spannungen verglichen. Die Spannungen stimmen dabei sehr gut überein. Zudem werden die für die Mühlenfließbrücke anhand des Lamellen-Modells berechneten Spannungen an der Fahrbahnplatte und am Hauptträger mit den vorliegenden Messdaten validiert. Dabei wird das Bauwerk über die Gesamtlänge berücksichtigt.

Eine Überlagerung der Spannungsanteile aus dem globalen Lamellen-Modell mit den Spannungen aus dem lokalen FEM-Modell ermöglicht sodann die Berechnung der Spannungen an den Hot-Spots der orthotropen Fahrbahnplatte.

Für die wesentlichen Parameter der vorangegangenen thermischen Simulationen (vgl. Tabelle) werden Berechnungen mit dem Lamellenmodell durchgeführt und die maßgebenden Längsspannungen am Querschnitt, sowie die Verformungen am Anfangs- und Endauflager der Mühlenfließbrücke bestimmt:

- Einbaubreite bzw. Anzahl Einbaubahnen
- Einbauprozess
 - o Einbautemperatur Asphaltmischgut
 - o Einbaugeschwindigkeit
- Meteorologisch klimatische Randbedingungen

- Ausgangstemperatur konstant über den QS
- Ausgangstemperatur gradierend über den QS

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen am lokalen FEM-Modell bestätigen die Ergebnisse aus früheren Untersuchungen und Messkampagnen. Darüber hinaus konnten aber auch durch die zielgerichtete Variation der Parameter die Einflüsse der jeweiligen Parameter besser geklärt und das Wissen erweitert werden.

Von den herstellprozessabhängigen Parametern sind die deutlichsten Effekte durch Variation der Einbautemperatur, der Schichtdicke der Schutzschicht und der Auswahl und Dicke des Dichtungssystem zu verzeichnen. Dagegen sind die Effekte der Parameter Einbaugeschwindigkeit und der Schichtdicke der Deckschicht eher geringer.

Bei den meteorologisch klimatischen Randbedingungen hat die Höhe der Ausgangstemperatur einen hohen Einfluss auf die Maximaltemperatur in den Stahlbauteilen nach dem Asphalteinbau. Konstant über den Querschnitt veränderte Ausgangstemperaturen führen ebenso wie der zusätzliche Einfluss einer möglichen Änderung der Emissionsstrahlung des Heißasphalts zu Temperaturänderungen, die nahezu konstant über den gesamten Querschnitt auftreten. Dagegen ist der Einfluss von ausganglichen Temperaturgradienten über den Querschnitt, die etwa durch Tagesgangkurven oder Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden, am Deckblech am höchsten. Er nimmt über den Querschnitt mit zunehmendem Abstand zum Deckblech ab.

Es wird zudem gezeigt, dass durch eine entsprechende Auswahl bzw. Kombination der Parameter ein erhebliches Potential besteht, die am Brückenquerschnitt auftretenden Temperaturen infolge des Heißasphalteinbaus zu beeinflussen. Hierzu wird durch eine Worst-Case- und eine Best-Case-Betrachtung, jeweils für unterschiedliche Deckblechdicken der mögliche Temperaturbereich in den Stahlbauteilen beim Heißasphalteinbau abgeschätzt: Am Deckblech sind demzufolge bei entsprechender Parameterwahl Maximaltemperaturen zwischen 79 °C bis 129 °C bei einer Deckblechdicke von $t=10$ mm realistisch (bzw. zwischen 75 °C und 123 °C bei einer Deckblechdicke von $t=12$ mm und zwischen 70 °C bis 118 °C bei einer Deckblechdicke von $t=14$ mm).

Bei der Bewertung der einzelnen Ergebnisse der mit der kombinierten Methode ermittelten maßgebenden Längsspannungen am Querschnitt sowie der Verformungen am Anfangs- und Endauflager muss darauf hingewiesen werden, dass die mechanischen Größen maßgeblich vom jeweiligen statischen System des Brückenbauwerks und der Geometrie des Brückenquerschnitts abhängig sind. Bei dem hier untersuchten Bauwerk der Mühlenfließbrücke wird zudem der Asphalteinbau nur im Bereich der Fahrbahnplatte zwischen den beiden Hauptträgern des offenen Brückenquerschnitts untersucht.

Gleichwohl kann am ausgewählten Brückenmodell gezeigt werden, dass durch eine entsprechende Auswahl und Kombination der untersuchten Parameter ein erhebliches Potential besteht, sowohl die am Brückenquerschnitt auftretenden Spannungen als auch die Verformungen des Bauwerks infolge des Heißasphalteinbaus zu beeinflussen, d.h. auch günstig zu beeinflussen.

Bei allen drei untersuchten herstellprozessabhängigen Parametern (Variation der Einbautemperatur, der Einbaugeschwindigkeit und der Einbaubreite) können deutliche Effekte festgestellt werden. Erwartungsgemäß kann bei der Variation der Einbautemperatur des Gussasphaltmischguts ein direkter, linearer Zusammenhang festgestellt werden. Bei Variation der Einbaugeschwindigkeit und der Einbaubreite des Asphaltstreifens treten am globalen Modell, anders als bei den Parameterstudien der thermischen Simulationen am lokalen FEM-Modell, deutliche Änderungen der ermittelten Spannungen und der ermittelten Bauwerksverformungen auf. So führt eine Reduktion der Asphaltierbreite zu einer Zunahme der Druckspannungen in der Fahrbahnplatte, jedoch gleichzeitig zu der vergleichsweise ausgeprägtesten Reduktion der Zugspannungen am Kragarm. Umgekehrt wird die größte Zunahme der Endlagerverschiebungen durch Erhöhung der Einbaugeschwindigkeit (auf 2,5 m/min) verursacht.

Bei der Untersuchung der meteorologisch klimatischen Randbedingungen kann gezeigt werden, dass die Druckspannungen im Brückenquerschnitt bei höheren Ausgangstemperaturen geringer sind. In dem Falle, dass der Brückenquerschnitt bereits vor dem Asphaltieren am Deckblech (etwa in Folge Sonneneinstrahlung) eine höhere Temperatur aufweist als in der Konstruktion unterhalb des Deckblechs (Ausgangstemperatur gradierend), erzeugt die Temperaturbeanspruchung aus dem Heißasphalt vergleichsweise geringere Zugspannungen, etwa im Kragarm.

Im Hinblick auf die Lagerbewegungen an den Brückenendlagern ist zu beachten, dass sich die Längsverformungen aus Heißasphalteinbau und hoher Umgebungstemperaturen aufaddieren.

Die Untersuchungen bestätigen somit die aus der Praxis geschilderten Erfahrungen der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in Folge des Heißasphalteinbaus (z.B. auftretende Spannungsrisse und Lagerschäden, insbesondere auch solche Auswirkungen, die sich in Entfernung von den Einwirkungen befinden, jedoch bislang nicht richtig zahlenmäßig abgeschätzt werden konnten). Mit der entwickelten kombinierten Methode können die o.g. Effekte erstmals – exemplarisch an dem ausgewählten Brückenbauwerk der Mühlenfließbrücke – in Abhängigkeit von den verschiedenen untersuchten Parametervariationen quantifiziert werden.

Derzeit werden bei dem entwickelten Lamellenmodell die Verschiebungen in Lamellenebene und die Verdrehung senkrecht zur Lamellenebene berücksichtigt. Damit ist beispielsweise eine Auswertung der Verschiebungen in Querrichtung derzeit noch nicht möglich. Um diese Effekte zukünftig ebenfalls untersuchen zu können, besteht die Möglichkeit, das vorhandene Lamellenmodell weiterzuentwickeln, indem die zugehörigen erforderlichen Freiheitsgrade hinzugefügt werden.

Weiter steht die Übertragung der Methode zur Untersuchung des Heißasphalteinbaus auf andere Brückenbauwerke noch aus, dazu zählen neben Stahlbrücken anderer Bauart auch Verbundbrücken.

Summary report

Investigations regarding hot asphaltting on bridge decks of steel and composite bridges

Introduction

Installation of the asphalt pavement and associated stress and temperature impacts onto the structure are not being considered so far during the structural design of bridges, although in particular for steel orthotropic decks an increase of weld cracks has been observed during the bridge inspections following such renewal of the asphalt. At least some general reference is being introduced now into the recent proposal of prEN 1991-1-5: 2023 to consider hot asphaltting.

Therefore, the scope of this research project has been to develop an approach to determine the impact of hot asphaltting onto the bridge structure of long steel bridges and to validate it with measurement data. During the process of hot asphaltting transient temperature fields progress longitudinal and across the bridge deck, causing temperature induced mechanical stresses as well as bridge deformations that lead to loads in particular at the abutments.

For two representative steel bridges, the “Hochmoselbrücke” with a box section and the “Mühlenfließbrücke” with an open cross section, the transient temperature fields have been investigated within this project. At both bridges, in the past, the process of laying mastic asphalt of the protective layer has been monitored over time at selected points of the cross section and that data has been available.

FE-modelling for simulation of temperature fields

For both bridges detailed FEM section-models have been created using the software tool ANSYS. These models allow a thermal transient simulation of the hot asphaltting, so that the temperature development within the structure of the orthotropic deck, i.e. deck plate, longitudinal stiffeners, cross girder (and in particular also at the intersection of longitudinal stiffener and cross girder) can be determined.

With the in-field measurement data the models can be calibrated: A very good agreement has been achieved, since the model incorporates precise section geometries as well as physical characteristics with regard to temperature analysis, so that possible errors or ambiguities can be clarified.

This allows in a next step to carry out an extensive parametric study to investigate both process dependent as well as meteorological climate dependent boundary conditions.

The parametric range (min- and max-values) to be used as loading conditions for those FEM calculations has been quantified based on literature and market analysis of pavers for laying mastic asphalt. This ensures that the basic functions of the asphalt layer

are met (i.e. processability, stability, surface structure/ grip, durability) for all investigated parameters. In the following Table all investigated parameters are given with each range.

Table 1: Variation of parametric study on both selected steel bridges

| Parameter | Variation | | | | | | | |
|--|------------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|-----|
| Number of paving tracks (total width of asphalt: 2 driving lanes + emergency lane) | 1 | | 2 | | | 4 | | |
| Asphalt laying temperature | 180 °C | | 200 °C | | | 230 °C | | |
| Initial temperature, const. over CS temperature deck plate temperature other steel | 5 °C 5 °C | 10 °C 10 °C | 17 °C 17 °C | 25 °C 25 °C | 30 °C 30 °C | | | |
| Initial temperature, gradient over CS temperature deck plate temperature other steel | 5 °C 0 °C | 15 °C 5 °C | 17 °C 17 °C | 25 °C 10 °C | 35 °C 10 °C | 35 °C 17 °C | 50 °C 25 °C | |
| Radiation Asphalt emission ratio ϵ | 0.00 | | 0.50 | | | 0.93 | | |
| Laying speed [m/min] | 0.5 | | 1.0 | | 1.5 | | 2.5 | |
| Protective layer thickness [cm] | 2.5 | | 3.0 | | 3.5 | | 5.0 | |
| Top layer thickness [cm] | 3.5 | | 4.0 | | | 4.5 | | |
| Type of construction and waterproofing system thickness [mm] | Type of construction 2 | | | | Type of construction 1 | | | |
| | 5.0 | 7.5 | 10.0 | 12.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| Deck plate thickness [mm] | 10 | | 12 | | | 14 | | |

Combined stress analysis using FEM and a lamella model

Based on the temperature fields derived from the thermal transient simulations the transient stresses over the section of the orthotropic plate are to be determined. Those stresses are on the one hand those locally induced by the temperature field, but at the same time also from the global structural behaviour effected by the global temperature development. For one of the examined bridges, the “Mühlenfließbrücke”, also measurement data for these stresses during hot asphaltting has been on hand.

To simulate those stresses two requirements need to be met:

1. Modelling the whole bridge structure to derive global stresses over the bridge length.
2. Sufficient mesh resolution to derive the detailed local stresses.

It turned out to be impossible to achieve both criteria for those investigated large span steel bridges with one single FEM model, even with today's highly developed university IT-clusters and different approaches for adjusting the meshing. Therefore, the path for a model reduction was followed in terms of a new calculation approach with combining a local FEM section model with a separate lamella-model covering other global effects.

For this, two separate lamella models are set up for the investigated bridge "Mühlenfließbrücke", one for the bridge deck and one for the two main girders adjacent to the deck. The lamella models with matrices for stiffness, loading and boundary conditions are being written using the mathematical computer tool MATLAB. Both lamella models are being coupled under equilibrium conditions and considering shear strain effects. The thermal transient fields determined with the local FEM-model are to be taken as input data.

The calculated stresses using that combined stress analysis has been compared then with a full FEM analysis for a hypothetical two-span bridge model of the "Mühlenfließbrücke" and match very well. Furthermore the combined stress analysis could also be validated for the whole length "Mühlenfließbrücke" when evaluating the measurement data in comparison with the calculated stresses.

Also, by superposing the stresses from the global lamella model with those from the local FEM simulation, it is possible to determine the hot-spot stresses of the orthotropic bridge deck.

For the most important parameters – with regard to expected effects on the global stresses – of the previous parametric study on the thermal simulations (cf. Table above) additional calculations have been carried out with the combined stress analysis using the lamella model to determine the decisive longitudinal stresses over the cross section as well as the deformations of the bridge at the first and end abutment:

- Width of asphalt pavement / number of paving tracks
- Asphalt laying process
 - o Asphalt laying temperature
 - o Laying speed
- Meteorological climate dependent boundary conditions
 - o Initial temperature, constant over CS
 - o Initial temperature, gradient over CS

Results

The results derived from the analysis with the local FEM model confirm findings from previous investigations with regard to the effect of different parameters. Beyond that, the precise selection of those investigated parameters and their boundaries lead to a far more specific and quantitative evaluation of the influences of those parameters.

Looking at those asphaltting process dependent parameters the most significant effects are a variation of the initial asphalt laying temperature, the thickness of the protective layer and the choice of the type of construction with the waterproofing system thickness. On the other hand the effects from a variation of the laying speed and of the top layer thickness are less significant.

With regard to meteorological climate dependent boundary conditions the initial temperature of the structure obviously has a direct impact on the maximum temperatures within the steel structural elements following the hot asphaltting. While a constant variation of the initial temperature as well as a change of radiation emission leads to a basically constant temperature change over the whole cross section, the gradient variation of the initial temperature (as being caused by direct solar irradiation or diurnal variation) has clearly more impact on the temperatures of the deck plate and decreasing impact with distance from the deck plate.

The parametric study on the local FEM model has also been used to demonstrate the potential to influence the temperatures within the steel structure following the laying of hot mastic asphalt by selecting and combining appropriate parameters. To this end a worst-case- and best-case-scenario examination has been carried out for different deck plate thicknesses: The potential temperature range at the deck plate varies between 79 °C to 129 °C (for a deck plate thickness of $t=10$ mm), between 75 °C to 123 °C (for a deck plate thickness of $t=12$ mm) and between 70 °C to 118 °C (for a deck plate thickness of $t=14$ mm).

When evaluating the results from the application of the combined analysis method using the lamella model to obtain longitudinal stresses over the cross section as well as longitudinal displacements at the start and end abutment, it needs to be pointed out, that any determination of static mechanic values is decisively influenced by the static system of the bridge and geometry of the specific structure. Also, for the "Mühlentleischbrücke" under consideration, only the asphaltting between the two main girders of the open bridge section is evaluated.

However, what can be seen clearly for the investigated bridge model is, that a specific variation and combination of parameters of the hot asphaltting has a significant potential to affect – potentially favourably – both the stresses over the bridge cross section as well as the deformations along the bridge following the laying of hot asphalt.

All three investigated asphaltting process dependent parameters (variation of asphalt laying temperature, laying speed and width of the paving track) show a significant influence. As could be expected, the variation of the asphalt laying temperature shows a direct linear correlation. Other than has been observed for the thermal parametric study on the local FEM model the variation of the laying speed as well as of the width of the paving track also cause significant changes of the calculated stresses and deformations: A reduction of the paving track width leads to an increase of compression stresses within the deck plate, but at the same time among all calculated variations to the most significant reduction of tension stresses at the sidelong lever arms. On the other hand, the most significant increase of displacements at the end abutment has been calculated for a variation of the maximum laying speed (2.5 m/min).

Investigating the meteorological climate dependent boundary conditions shows that the compression stresses are less when the initial temperature of the bridge structure is higher. For the case, that the deck plate of the bridge structure has already a higher temperature than the rest of the cross section below (i.e. from direct solar irradiation, causing a temperature gradient), the temperature induced tension stresses from asphaltting are relatively lower.

With regard to the abutment displacements it should be noted that any deformation from the hot asphaltting adds onto other deformations from other temperature increases (for example in the summer).

Thus, the investigations with the combined stress analysis also confirm cause-and-effect correlations being described from experiences subsequently following hot asphaltting (like increase of tension induced cracks and bearing displacement defects, in particular also possible with distance to the actual temperature input, which so far were not possible to be assessed precisely). Using the new calculation method of the combined analysis with the developed lamella model allows for a first time to quantify the described effects depending on the different investigated parameter variations, here exemplarily carried out for the selected bridge of the "Mühlenfließbrücke".

At this time, the newly developed lamella model considers only displacements within the lamella plane and rotations perpendicular to the lamella plane. This means that for example so far, an evaluation of displacements in the cross direction is not possible. To also investigate those displacements, there is the option to further develop the lamella model to include additional necessary degrees of freedom.

It should be noted that also a transfer of this method towards investigating the impact of hot asphaltting for other bridge structures, not only other steel bridges but also including composite bridges remains open.