

# **HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 136**

**bast**

# HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

von

Natalie Stranghöner  
Christoph Lorenz  
Vanessa Raake

Universität Duisburg-Essen  
Institut für Metall- und Leichtbau

Edeltraud Straube †  
Marcel Knauff

Universität Duisburg-Essen  
Institut für Straßenbau und Verkehrswesen

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 136

**bast**



Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.473/2009/CRB:**  
Effizienzsteigerung des Fahrbahnbelages auf Stahlbrücken und Schäden in Form von Rissen im Bereich von Anschlüssen am Deckblech (Kategorie-I-Schäden)

**Fachbetreuung:**  
Heinz Friedrich

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-313-8

Bergisch Gladbach, Mai 2017

## Kurzfassung – Abstract

### **HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

Durch die in den letzten Jahren enorm gestiegenen Verkehrsbelastungen und damit einhergehenden gestiegenen lokalen Beanspruchungen im Deckblech kommt es bei bestehenden Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten vermehrt zu Ermüdungsschäden im Bereich der geschweißten Anschlüsse der Längsrippen an das Deckblech (Kategorie-1-Schäden). Ziel des Forschungsprojekts war es zu untersuchen, ob sich durch eine erhöhte mittragende Wirkung des Fahrbahnbelags die lokalen Radlasten besser verteilen lassen und die Spannungen im Bereich der Anschlüsse Längsrippe-Deckblech somit reduziert werden können.

Zum Nachweis einer erhöhten mittragenden Wirkung wurden numerische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Untersucht wurden die folgenden Asphaltvarianten: Gussasphalt als Referenzsystem, sowie hohlraumreiche Asphaltgerüste mit nachträglicher Verfüllung (HANV, verfüllt mit Epoxidharz und mit Bioharz). Zusätzlich wurde untersucht, ob es möglich ist, auf den Einsatz der Pufferschicht zu verzichten, um damit die mittragende Wirkung des Fahrbahnbelags zusätzlich zu erhöhen.

Die experimentellen Untersuchungen umfassten sowohl statische als auch dynamische 5-Punkt-Biegeversuche, die bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurden. Die Prüfkörper bestanden aus einem Stahlblech mit Asphaltbelag und Pufferschicht nach ZTV-ING Teil 7, Abschnitt 4 und einer Abdichtung nach Bauart 1. Während der Versuchsdurchführung wurden die Verformungen an der Unterkante des Stahlblechs gemessen. Aus den aufgezeichneten Versuchsdaten wurden zunächst Kraft-Verformung-Kurven erstellt, aus denen anschließend Verformungsmoduln abgeleitet wurden, um die mittragende Wirkung der einzelnen Belagsvarianten zu bewerten.

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen ließen sich lediglich erste Tendenzen zur Erhöhung der mittragenden Wirkung ableiten. Der geringe Prüfumfang von zwei Prüfkörpern je Variante und die teilweise starken Streuungen in den Versuchsergebnissen ließen keine quantitative Bewertung der Ergebnisse zu.

Die numerischen Untersuchungen an einem 3D-Finite-Elemente-Modell ergaben, dass sich durch eine höhere Asphaltsteifigkeit die Spannungen im Deckblech um bis zu 40 % reduzieren lassen. Der Verzicht auf die Pufferschicht kann bei niedrigen Asphaltsteifigkeiten, so wie sie beim derzeit eingesetzten Gussasphalt vorliegen, ebenfalls eine Reduktion der Spannungen um ca. 25 % bewirken.

Für eine quantitative Bewertung der untersuchten Varianten sind Großbauteilversuche unverzichtbar. Hierdurch ließen sich herstellungsbedingte Streuungsfaktoren minimieren und die Auswirkungen der Verwendung von verfüllten Asphaltmaterialien am tatsächlichen Detail Längsrippe-Deckblech untersuchen.

### **Strengthening of steel bridge deck plates with category I damages using HANV**

Traffic loads on steel bridges have highly increased during the last decades. As a result of these higher loads, steel bridges show more and more fatigue damages in the welded connection between the steel deck plate and the longitudinal stiffeners (category I damages). The aim of this research project was to investigate whether it is possible to reduce the local stresses by the use of a modified asphalt surfacing with a higher stiffness which should lead to a more favorable stress distribution even at high temperatures.

In the frame of the research project experimental and numerical investigations were performed. The following asphalt surfacings were investigated: mastic asphalt which is used by default, hollow spaced asphalt which were filled afterwards (HANV, filled with epoxy-resin and filled with bio-resin). Additionally, it was investigated whether it is possible to use asphalt surfacings without a buffer layer.

The test setup of the experimental investigations was built up by material tests of the different asphalt materials and static and dynamic small scale component tests (5-point-bending-tests). The test specimens consisted of a steel plate with asphalt surfacing and buffer layer according to ZTV-ING Part 7, Section 4 and a sealing layer according to Construction Type 1. During the tests the

displacements at the bottom of the steel plates were measured. With the help of load-displacement curves, moduli of deformation were determined to assess the effectiveness of the modified asphalt surfacings.

Based on the results of the experimental investigations a quantitative evaluation of the effectiveness was not possible because the number of single tests at each variant was too small and the scatter of the test results too high. The tendency was observed that the modified asphalt surfacings could show a higher effectiveness.

The evaluation of the numerical investigations using a 3D-finite element-model led to the conclusion that local stresses in the deck plate can be reduced by approximately 40% by increasing the asphalt's stiffness. A renouncement of the buffer layer can lead to a stress reduction of approximately 25% in case of low asphalt stiffness. The influence of the buffer layer on the local stresses decreases with increasing asphalt stiffness.

In order to quantify the test results of the different asphalt surfacings it is necessary to perform large scale component tests. Hereby, manufacturing reasons for scattered test results could be minimized and the effect of using different asphalt materials on the stresses in the connection between steel deck plate and longitudinal stiffeners could be proved at real detail.

## Summary

### Strengthening of steel bridge deck plates with category I damages using HANV

#### 1 Introduction

Traffic loads on steel bridges have highly increased during the last decades. As a result of these higher loads, steel bridges show more and more fatigue damages in the welded connection between the steel deck plate and the longitudinal stiffeners (category I damages). The aim of this research project was to investigate whether it is possible to reduce the local stresses by the use of a modified asphalt surfacing with a higher stiffness which should lead to a more favorable stress distribution even at high temperatures.

#### 2 Basic Procedure

In the frame of the presented research project three different kinds of asphalt surfacings were investigated: hollow spaced asphalt filled with epoxy-resin, hollow spaced asphalt filled with bio-resin (both are called HANV) and mastic asphalt used by default. Additionally, it was investigated whether it is possible to use asphalt surfacings without a buffer layer. The test setup was built up by material tests of the different asphalt materials and static and dynamic small scale component tests (5-point-bending-tests). For the evaluation of the test results extensive numerical parametric studies

were conducted to determine the influence of the asphalt's Young's modulus and the shear stiffness of the buffer layer on the stresses in the connection between steel deck plate and longitudinal stiffeners.

#### 3 Results

First, indirect tension tests were performed to determine the Young's modulus of the different asphalt surfacings, see figure 2. The Young's modulus was determined at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Additionally Young's modulus was calculated at  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , see table 1. On the one hand these Young's moduli should show that the resin-filled asphalts show a higher stiffness compared to the mastic asphalt and on the other hand they should be the initial parameters for the numerical calculations. During the performance and the evaluation of the tests it could be observed that indirect tension tests are not

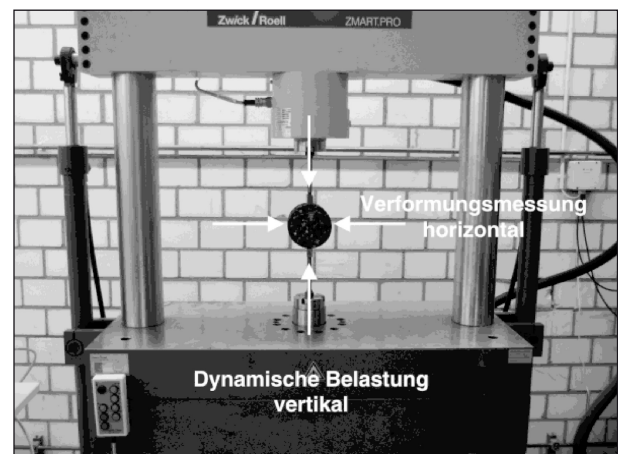


Fig. 2: Test setup – indirect tension tests

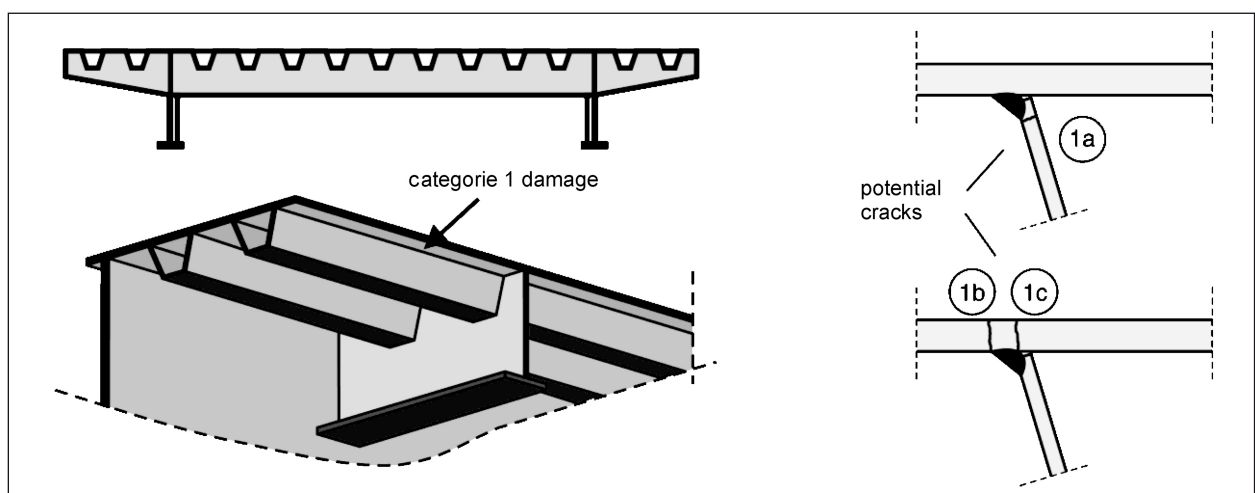


Fig. 1: Category damages

| Temperature \ Frequency | Experimentally determined Young's moduli |        |        |       | Calculated Young's moduli |        |       |       |
|-------------------------|--|--------|--------|-------|---------------------------|--------|-------|-------|
|                         | -10 °C                                   | 0 °C   | 10 °C  | 20 °C | -20 °C                    | 15 °C  | 35 °C | 50 °C |
| 10 Hz                   | 24.906                                   | 20.693 | 12.346 | 8.217 | 28.393                    | 10.027 | 2.519 | 386   |
| 1 Hz                    | 20.662                                   | 15.343 | 7.787  | 4.691 | 26.490                    | 6.264  | 967   | 390   |
| 0,1 Hz                  | 16.197                                   | 10.902 | 4.930  | 2.104 | 23.675                    | 3.463  | 8,06  | 799   |

Tab. 1: Experimentally determined and additionally calculated Young's moduli [N/mm<sup>2</sup>]

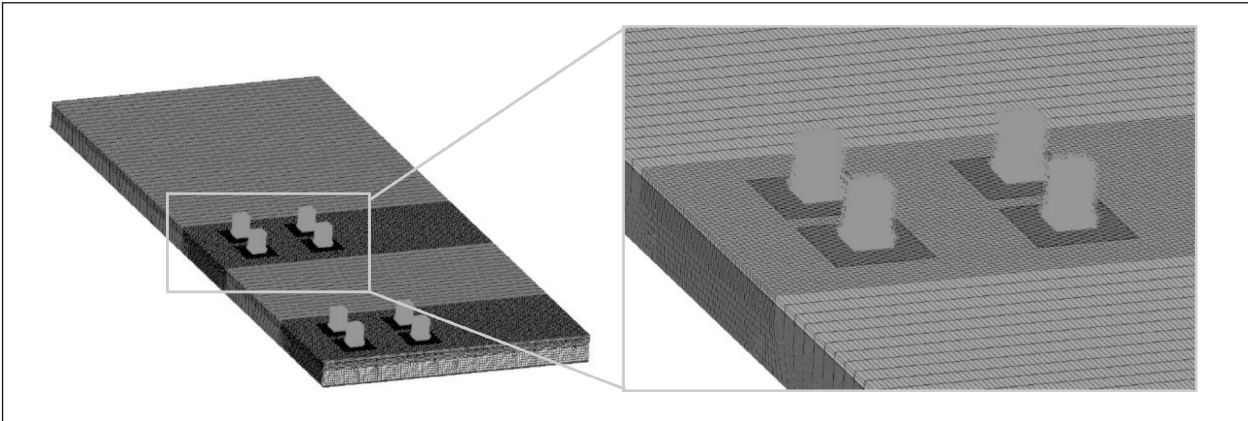


Fig. 3: Mesh and loading of the 3D-finite-element-model

suitable to determine Young's moduli for hollow spaced filled asphalt. Because of this, useful values of Young's modulus could only be determined for mastic asphalt. These values were used as reference values for the numerical parametric studies.

For the identification of the basic influence of different thicknesses and Young's modulus values of the asphalt layer on the stresses in the steel deck plate, calculations using the linear elastic multi-course theory were performed. As it was expected, it is possible to decrease the stresses in the steel deck plate by increasing the thickness of the asphalt layer or the asphalt layer's stiffness. A quantitative assessment could not be made due to the fact that it is not possible to simulate the complex structural behaviour of an orthotropic steel deck plate by using the linear elastic multi-course theory.

For this reason, further numerical calculations were performed using a 3D-finite-element-model. This model was built up from the cross-section of the orthotropic steel deck plate of "Rheinbrücke Duisburg-Neuenkamp". It was loaded by fatigue load model number 3 according to EN 1991-2, see figure 3.

The buffer layer was considered by adding an additional layer between steel deck plate and asphalt surfacing. In a first step, the most

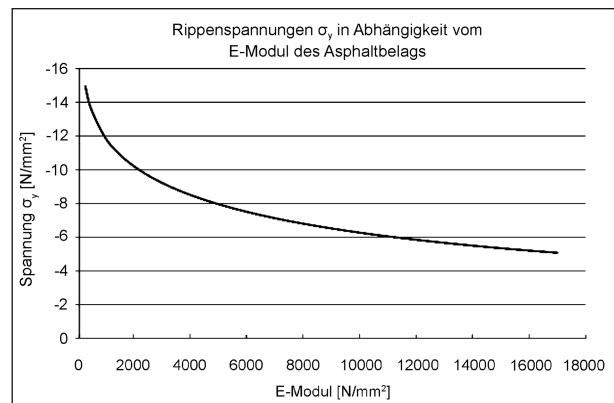


Fig. 4: Influence of Young's modulus on stresses in the steel deck plate

unfavourable load position was determined. Afterwards numerical parametric studies were performed to assess the influences of the stiffness of the asphalt surfacing and the shear stiffness of the buffer layer on the stresses in the connection between steel deck plate and longitudinal stiffeners. With increasing stiffness of the asphalt surfacing the stresses could be reduced by approximately 40%. The influence of the Young's modulus on the stresses depends on the stiffness of the asphalt surfacing. For small Young's modulus values a big influence on the stresses could be shown. The more the Young's modulus increases the less is the influence on the stresses, see figure 4. Compared to the calculated Young's modulus it could be



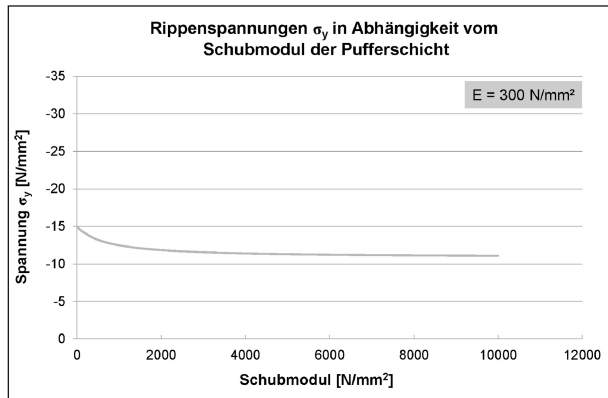


Fig. 5: Influence of shear stiffness of the buffer layer on stresses in the steel deck plate ( $E = 300 \text{ N/mm}^2$ )

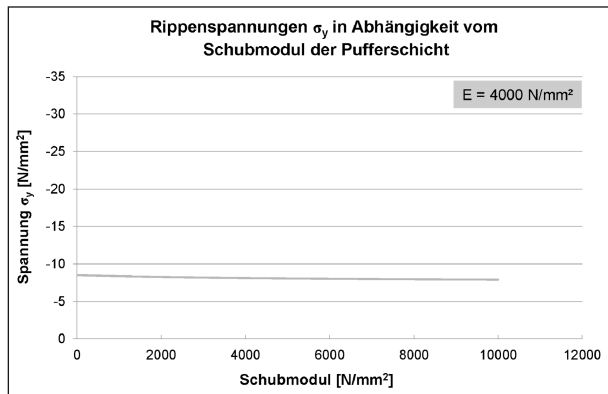


Fig. 6: Influence of shear stiffness of the buffer layer on stresses in the steel deck plate ( $E = 4.000 \text{ N/mm}^2$ )

shown that the stresses can be reduced significantly by increasing the stiffness of the asphalt surfacing which is used by default. In addition to the Young's modulus the influence of the shear stiffness of the buffer layer was investigated. The aim was to figure out whether it is possible to reduce the stresses in the connection between steel deck plate and longitudinal stiffeners by renouncing the buffer layer.

The parametric study showed that it is possible to reduce the stresses in the steel deck plate by approximately 25% for low Young's modulus values as they are present at high temperatures. The influence of the shear stiffness of the buffer layer on the stresses in the steel deck plate depends on the stiffness of the asphalt surfacing. If the Young's modulus of the asphalt surfacing shows low values there is a high influence of the shear stiffness of the buffer layer on the stresses in the steel deck plate. For higher Young's modulus values, the influence decreases.

In addition to the extensive numerical parametric studies, static and dynamic small scale component

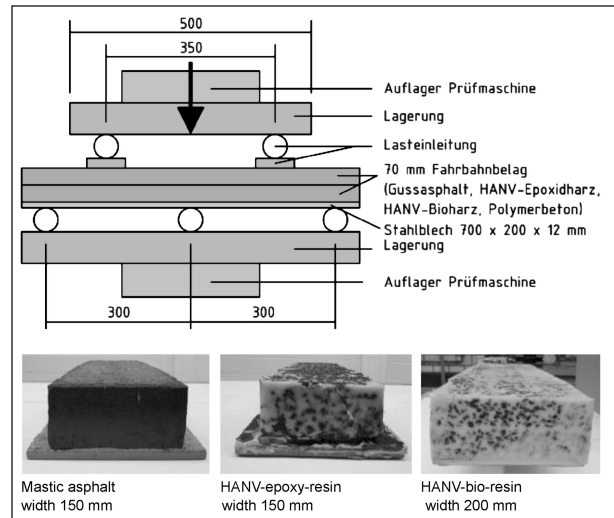


Fig. 7: Test setup and specimens – small scale component tests



Fig. 8: Test setup – small scale component test

tests in terms of five-point-bending tests were performed. A survey of the test setup is given in figure 7 and 8. The following different specimen types were investigated:

- (1) Steel deck plate without surfacing (reference),
- (2) Steel deck plate + bonding layer + buffer layer + mastic asphalt,
- (3) Steel deck plate + bonding layer + mastic asphalt (without buffer layer),
- (4) Steel deck plate + bonding layer + buffer layer + HANV (epoxy-resin),
- (5) Steel deck plate + bonding layer + HANV (epoxy-resin, without buffer layer) and
- (6) Steel deck plate + bonding layer + HANV (bio-resin, without buffer layer).

The static tests were performed to prove an improved static behaviour of the filled asphalt materials compared to mastic asphalt. For this

reason, static tests were performed at room temperature and +50 °C. The dynamic test should prove the durability of the investigated asphalt surfacings. Especially at low temperatures the asphalt layer on steel bridges shows the tendency to crack. There-fore, dynamic tests were performed at room temperature and at -5 °C. All specimens were tested with and without a buffer layer, except the bio-resin filled ones. During the tests the displacements at the bottom of the steel plates were measured. With the help of load – displacement curves, moduli of deformation were determined to assess the effectiveness of the modified asphalt surfacings. Due to the fact that the bio-resin filled specimens were manufactured in other dimension compared to all other specimens, see figure 7, the test results are not comparable to any other results.

In principal it has to be clarified that for each type of asphalt layer only two tests were performed. Sometimes the scatter between two specimens of one type of asphalt layer was as high as the difference of the mean values between different types of asphalt layers. The main reason for this scatter is the manufacturing procedure of the test specimens. The HANV-specimens did not have a flat surface, so there was not always a planar load application. Furthermore, the steel plates showed different initial deformations. It was not possible to derivate an explicit arithmetical compensation for these imperfections. Due to this fact, all of the presented results can just show tendencies.

The static five-point-bending tests reveal that standard HANV asphalt layers show a better statical performance compared to mastic asphalt. Nearly the same improvement of performance can be achieved by leaving out the buffer layer. In overall consideration type (5) HANV epoxy-

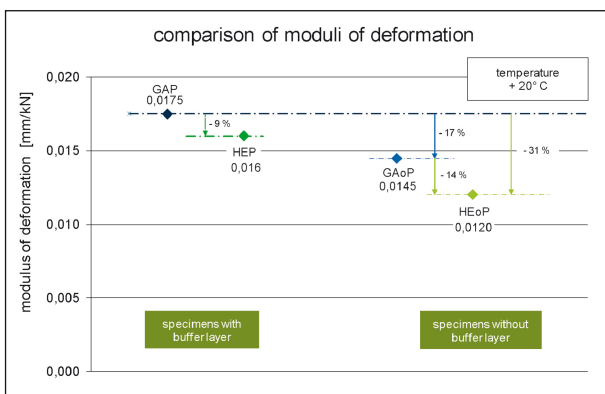


Fig. 9: Results of static tests at 20 °C

resin without buffer layer showed the best performance.

The static test at +50 °C showed nearly the same moduli of deformation for all different variants. This was caused by the fact, that the maximum load of the test at +50 °C was decreased to 15 kN. It could be figured out that a load level of 15 kN is not sufficient to equalize imperfections of the test specimens. Because of this, the test results at +50 °C are mainly influenced by the imperfections of the test specimens instead of the specimens' stiffness. Therefore, an assessment of the test results at +50 °C is not possible.

First tendencies of a better statical performance of HANV layers compared to mastic asphalt at static tests could be observed. Subsequently, dynamic tests were performed to prove the durability of the different asphalt surfacings. The specimens were loaded by a loading collective according to TP-BEL-ST 1992. Figure 10 shows the static system and the maximum load which has to be applied to obtain a displacement of 0.95 mm. Starting from the maximum load level all other necessary loads were calculated.

Due to the fact, that the Young's moduli from asphalt materials are highly dependent on temperature and load frequency the measured displacement during the tests, see figure 11, were of particular interest because the load frequency of 2 Hz complies with a more realistic load frequency. Additionally, it was investigated whether the

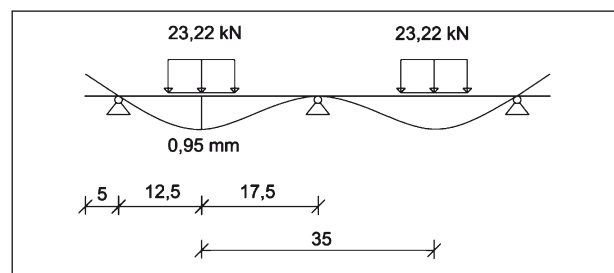


Fig. 10: Static System – Calculation of maximum load level using deflexion

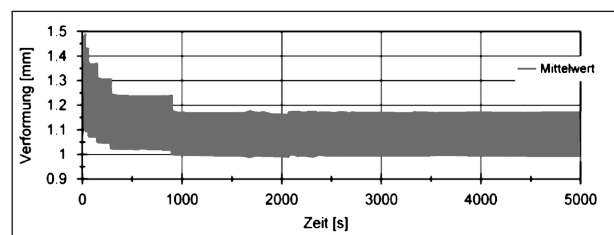


Fig. 11: Displacement – time course of on load collective for the dynamic tests

specimens were able to pass 1 million load cycles without showing recognisable damages.

The reference specimens which consisted of mastic asphalt failed after a few 10.000 load cycles in the area of load application so that tests were stopped after 50.000 to 100.000 load cycles. All other specimens were able to pass 1 million load cycles without recognisable damages, see figure 12. The moduli of deformation, which were determined between 40.000 and 50.000 load cycles showed the lowest values for the specimens which consisted of mastic asphalt without buffer layer. Nevertheless, HANV seems to have a higher Young's modulus due to the fact that HANV specimens passed 1 million load cycles without failure.

Referring to the durability, the dynamic tests at -5 °C were of particular interest. All specimens

could pass 1 million load cycles without recognisable failure. Therefore, the moduli of deformation were determined between 990.000 and 1.000.000 load cycles. In this range of load cycles the variant mastic asphalt without buffer layer showed the lowest values for the moduli of deformation or the highest stiffness, respectively. An overview about all test results of the dynamic test is given in figure 13.

For the dynamic tests it has to be said as well as for the static tests that only two specimens of each variant was tested and the results within one variant showed a great scatter. Therefore, the results just show tendencies and are not valid for an assessment of the different variants.

The tendency, that the use of a modified asphalt surface can lead to a higher effectiveness of the

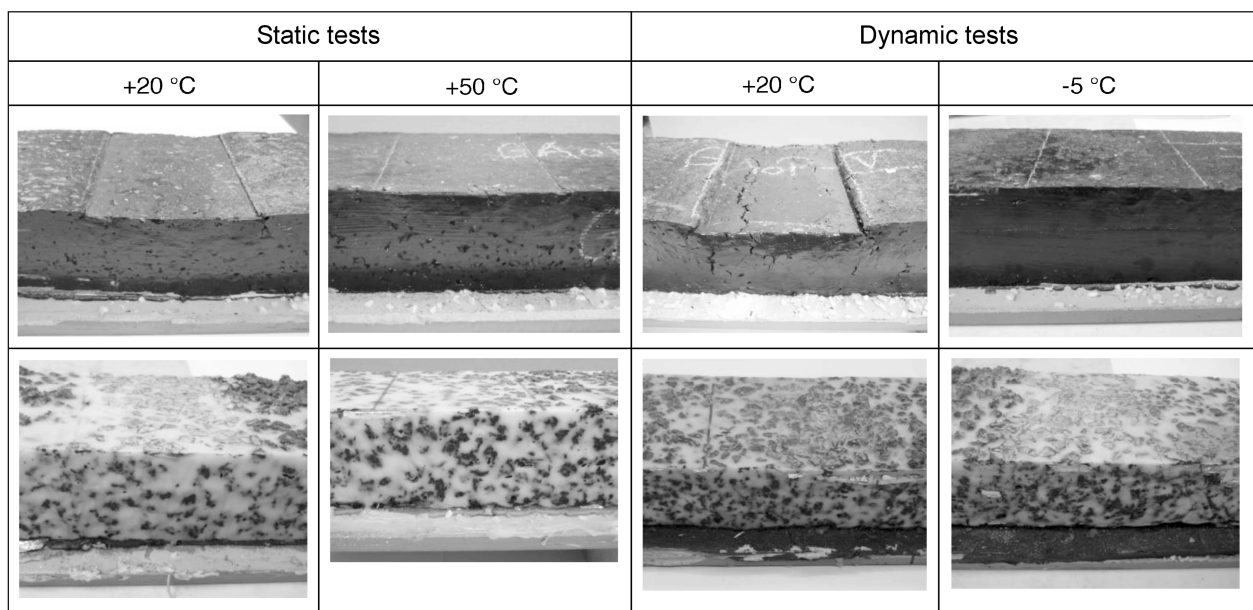


Fig. 12: Damage of asphalt surface caused by different loading types and temperatures at mastic asphalt – (top) and HANV-epoxy-resin specimens (bottom)

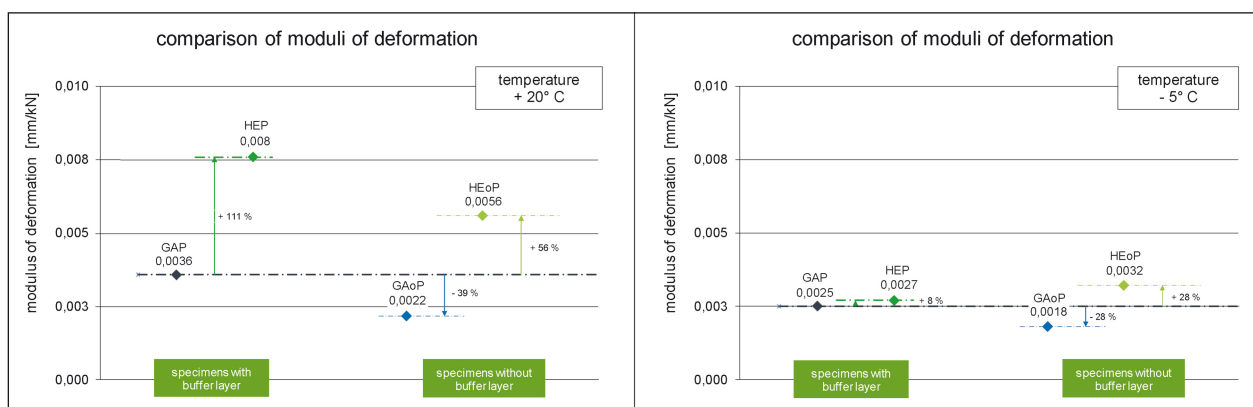


Fig. 13: Mean values of moduli of deformation – left room temperature +20 °C – right low temperature -5 °C



asphalt surface and therefore to a stress reduction in the welded connection between steel deck plate and longitudinal stiffeners can clearly be seen. This is also valid for a renouncement of the buffer layer.

The durability could be proofed for all variants at -5 °C. The HANV surfacings did not even show damage after 1 million load cycles at +20 °C while the mastic asphalt specimens failed.

#### **4 Conclusions**

In the frame of the presented numerical and experimental investigations the capability of using a modified asphalt to reduce stresses in the welded connection between steel deck plate and longitudinal stiffeners in orthotropic steel decks could be shown in principal. A final assessment of the different variants could not be made due to the small number of specimens and the scatter of the test results.

In order to quantify the test results of the different asphalt surfacings it is necessary to perform large scale component tests. Hereby, manufacturing reasons for scattered test results could be minimized and the effect of using different asphalt materials on the stresses in the connection between steel deck plate and longitudinal stiffeners could be proved at real details.

## Inhalt

|   |    |  |    |
|---|----|--|----|
| <b>Vorwort</b> .....  | 13 | 3.3.2 Prüfkörperherstellung/<br>-vorbereitung .....  | 29 |
| <b>1 Einleitung</b> .....   | 13 | 3.3.3 Versuchsdurchführung –<br>Abkühlversuch .....  | 29 |
| 1.1 Allgemeines .....   | 13 | 3.3.4 Versuchsdurchführung –<br>Einaxialer Zugversuch .....  | 30 |
| 1.2 Aufgabenstellung und Ziel<br>des Forschungsvorhabens .....                  | 14 | 3.3.5 Versuchsergebnisse .....   | 30 |
| <b>2 Stand der Technik</b> .....  | 14 | <b>4 Numerische Untersuchungen</b> .....   | 30 |
| 2.1 Mögliche Verstärkungsmaß-<br>nahmen .....                                   | 14 | 4.1 Allgemeines .....  | 30 |
| 2.2 Sandwich-Platten-System (SPS) ....  | 15 | 4.2 Referenzsystem .....   | 31 |
| 2.3 Hochfester Beton mit Stahlfasern ....                                       | 16 | 4.2.1 Geometrische Abmessungen .....   | 31 |
| 2.4 Aufkleben von Stahlblechen .....  | 17 | 4.2.2 3D-Finite-Elemente-Modell .....  | 32 |
| 2.5 Hohlraumreiches Asphaltgerüst mit<br>nachträglicher Verfüllung (HANV) ....  | 17 | 4.2.3 Vernetzung des 3D-Finite-<br>Elemente-Modells .....  | 33 |
| 2.6 Epoxy-Asphalt .....   | 19 | 4.3 Numerischer Nachweis der mit-<br>tragenden Wirkung des Asphalts .....  | 34 |
| 2.7 Betonfertigteile aus UHPC .....   | 19 | 4.3.1 Einfluss des E-Moduls des Asphalt-<br>fahrbahnbelags auf die Spannungen<br>im Anschluss Längsrippen-<br>Deckblech .....                        | 36 |
| <b>3 Charakterisierung der Material-<br/>eigenschaften</b> .....                | 21 | 4.3.2 Bewertung der mittragenden<br>Wirkung des Asphaltfahrbahn-<br>belags .....   | 40 |
| 3.1 Allgemeines .....   | 21 | 4.3.3 Numerische Untersuchungen zum<br>Einfluss der Schubsteifigkeit der<br>Pufferschicht auf die Spannungen<br>an der Unterkante des Deckblechs ... | 40 |
| 3.2 Spaltzug-Schwellversuche .....  | 21 | <b>5 Experimenteller Nachweis der<br/>mittragenden Wirkung</b> .....   | 43 |
| 3.2.1 Allgemeines .....   | 21 | 5.1 Allgemeines .....  | 43 |
| 3.2.2 Versuchsprogramm .....  | 22 | 5.2 Versuchsaufbau .....   | 44 |
| 3.2.3 Herstellung der Prüfkörper .....  | 22 | 5.3 Prüfkörper .....   | 44 |
| 3.2.4 Versuchsaufbau .....  | 23 | 5.4 Statische Bauteilversuche .....  | 45 |
| 3.2.5 Versuchsdurchführung .....  | 23 | 5.4.1 Allgemeines .....  | 45 |
| 3.2.6 Versuchsauswertung .....  | 23 | 5.4.2 Versuchsdurchführung .....   | 46 |
| 3.2.7 Vorversuche .....   | 24 | 5.4.3 Ergebnisse der statischen Versuche<br>bei 20 °C .....  | 47 |
| 3.2.8 Spaltzug-Schwellversuche an unter-<br>schiedlichen Asphaltvarianten ..... | 25 | 5.4.4 Ergebnisse der statischen Versuche<br>bei 50 °C .....  | 51 |
| 3.2.9 Bestimmung der E-Modul-Temperatur-<br>funktion des Gussasphaltes .....    | 26 |  |    |
| 3.2.10 Zusätzliche Spaltzug-Schwell-<br>versuche .....                          | 27 |  |    |
| 3.3 Ermittlung des Tieftemperatur-<br>verhaltens .....                          | 29 |  |    |
| 3.3.1 Allgemeines .....   | 29 |  |    |

|                          |  |           |          |  |           |
|--------------------------|--|-----------|----------|--|-----------|
| 5.4.5                    | Bewertung der Versuchsergebnisse der statischen Bauteilversuche . . . . .  | 53        | B.7      | Einfluss der Schichtdicke der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen . . . . . | 78        |
| 5.5                      | Dynamische Bauteilversuche . . . . .   | 54        | B.8      | Einfluss des E-Moduls der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen . . . . .       | 79        |
| 5.5.1                    | Allgemeines . . . . .  | 54        | B.9      | Einfluss der Schichtdicke der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen . . . . .   | 79        |
| 5.5.2                    | Versuchsdurchführung . . . . .   | 54        | <b>C</b> | <b>Ergebnisse der Bauteilversuche HANV-Bioharz . . . . .</b>                                   | <b>80</b> |
| 5.5.3                    | Ergebnisse der dynamischen Versuche bei 20 °C. . . . .   | 56        | C.1      | Allgemeines . . . . .  | 80        |
| 5.5.4                    | Ergebnisse der statischen Versuche bei 5 °C. . . . .   | 58        | C.2      | Ergebnisse der statischen Bauteilversuche . . . . .  | 80        |
| 5.5.5                    | Bewertung der Versuchsergebnisse der dynamischen Bauteilversuche . . . . .   | 61        | C.3      | Ergebnisse der dynamischen Bauteilversuche . . . . .   | 81        |
| 5.6                      | Probleme/Empfehlungen . . . . .  | 62        | C.4      | Verformungsmodule . . . . .  | 81        |
| 5.7                      | Gesamtbewertung der mittragenden Wirkung . . . . .   | 63        |          |  |           |
| <b>6</b>                 | <b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>  | <b>65</b> |          |  |           |
| <b>7</b>                 | <b>Literatur . . . . .</b>   | <b>67</b> |          |  |           |
| <b>Anlagen . . . . .</b> |  | <b>71</b> |          |  |           |
| <b>A</b>                 | <b>Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche . . . . .</b>   | <b>71</b> |          |  |           |
| <b>B</b>                 | <b>Beanspruchungsberechnung nach der Mehrschichtentheorie . . . . .</b>  | <b>74</b> |          |  |           |
| B.1                      | Allgemeines . . . . .  | 74        |          |  |           |
| B.2                      | Bestimmung eines äquivalenten E-Moduls zur Abbildung der Brückendetails im Rahmen der Mehrschichtenrechnungen anhand von 3D-Finite-Elemente-Berechnungen . . . . . | 75        |          |  |           |
| B.3                      | Anwendbarkeit des Mehrschichtensystems . . . . .   | 76        |          |  |           |
| B.4                      | Einfluss des E-Moduls der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen . . . . .  | 77        |          |  |           |
| B.5                      | Einfluss der Dicke der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen . . . . .   | 77        |          |  |           |
| B.6                      | Einfluss des E-Moduls der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen . . . . .   | 78        |          |  |           |

## Vorwort

Das vorliegende Forschungsprojekt wurde ursprünglich von dem Institut für Metall- und Leichtbau unter der Leitung von Frau Professor Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner und dem Institut für Straßenbau und Verkehrswesen unter der Leitung von Frau Professor Dr.-Ing. Edeltraud Straube, beide Universität Duisburg-Essen, durchgeführt. Nach dem Tod von Frau Professor Straube im Oktober 2013 wurde das Forschungsvorhaben vom Institut für Metall- und Leichtbau alleine mit Unterstützung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zu Ende geführt.

Die Kapitel 1 bis 3.2 sowie Anhang B des vorliegenden Abschlussberichts wurden gemeinsam von den Instituten für Metall- und Leichtbau und Straßenbau und Verkehrswesen verfasst. Alle übrigen Kapitel wurden ausschließlich vom Institut für Metall- und Leichtbau verfasst.

## 1 Einleitung

### 1.1 Allgemeines

Durch die in den letzten Jahren enorm gestiegenen Verkehrsbelastungen und damit einhergehenden gestiegenen lokalen Beanspruchungen im Deckblech kommt es bei bestehenden Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten vermehrt zu Ermüdungsschäden im Bereich der geschweißten Anschlüsse der Längsrippen an das Deckblech (Kategorie-1-Schäden). Prognosen zur zukünftigen Verkehrsbelastung gehen von einem weiteren Zuwachs des Schwerverkehrs von 85 % aus [NAU 2008]. Darüber hinaus stellt der mögliche Wechsel von der Zwillingsbereifung hin zu Super-Single-Reifen mit einer erhöhten lokalen Beanspruchung des Deckblechs ein großes Problem für den Stahlbrückenbestand dar. Da die Bauwerke i. d. R. für diese Beanspruchungen nicht ausgelegt sind, kommt der nachhaltigen Zukunftsicherung des Bestandes damit eine besondere Bedeutung zu. Methoden zur nachhaltigen Verstärkung müssen entwickelt werden, um die Nutzungsdauer der bestehenden Stahlbrücken relevant zu verlängern.

Die Instandsetzung/Ertüchtigung von Kategorie-1-Schäden bei orthotropen Fahrbahnplatten von Stahlbrücken im Bestand beinhaltet im Wesentlichen zwei Aspekte:

1. Instandsetzung der gerissenen Anschlussnähte zwischen Längssteife und Deckblech als Reparaturmaßnahme und anschließende
2. Verstärkung der orthotropen Fahrbahnplatte bzw. des Verbundsystems Deckblech-Fahrbahnbelag zur Spannungsbegrenzung und Verringerung der Durchbiegung als Ursachenbekämpfung.

Als bauweisenunabhängige Schäden treten Risse in den Schweißnähten zwischen den Längssteifen und dem Deckblech unabhängig vom Typ der verwendeten Längsrippe konzentriert im Bereich der Rollspuren des Schwerlastverkehrs auf. Die schweißtechnische Instandsetzung der gerissenen Schweißnähte der Kategorie-1-Schäden ist nicht Thema des vorliegenden Forschungsprojekts. Hierzu existieren umfangreiche Untersuchungen und u. a. das DVS-Merkblatt 1709 Instandsetzung und Verstärkung orthotroper Fahrbahnplatten [DVS 1709].

## 1.2 Aufgabenstellung und Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojekts war die Entwicklung von Lösungen zur Erhöhung der Steifigkeit des Verbundsystems Deckblech-Fahrbahnbelag von orthotropen Fahrbahnplatten zur Reduzierung der Durchbiegungen und Spannungen. Dieses Ziel sollte durch Untersuchungen modifizierter Fahrbahnbeläge mit erhöhter mittragender Wirkung erzielt werden, aufbauend auf den Erfahrungen, die bisher mit hohlraumreichen Asphaltgerüsten mit nachträglicher Verfüllung (HANV) erzielt wurden. Dazu wurde die mittragende Wirkung eines mit Epoxidharz und alternativ Bioharz verfüllten Asphaltträgergerüsts ermittelt. Im Rahmen des Forschungsprojekts sollte auch untersucht werden, ob bei der Verwendung modifizierter Fahrbahnbeläge bzw. weiterentwickelter Gussasphaltbeläge auf den Einsatz einer Pufferschicht verzichtet werden kann.

Neben der Verringerung der Spannungen im Deckblech müssen auch die Anforderungen an herkömmliche Beläge wie Dichtheit, Ebenheit, Griffigkeit und Dauerhaftigkeit beachtet werden.

Die Entwicklung eines wirksamen Konzepts beinhaltet neben der Betrachtung der technischen Aspekte der Steifigkeitserhöhung und damit Spannungsminimierung im Deckblech auch die Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit unter Baustellenbedingungen sowie die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Lösungen.

Für eine Bewertung unterschiedlicher (modifizierter) Belagsvarianten sollten zunächst die Materialeigen-

schaften der Grundmaterialien in Form von Spaltzug-Schwellversuchen und Abkühlversuchen bestimmt werden. Mit den so gewonnenen Materialparametern sollten umfangreiche numerische Parameterstudien durchgeführt werden. Die numerischen Untersuchungen sollten mit entsprechenden Versuchsdaten validiert werden. Hierfür wurden sowohl statische als auch dynamische 5-Punkt-Biegeversuche bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen der 5-Punkt-Biegeversuche und der numerischen Berechnungen sollte eine erste Bewertung der modifizierten Belagsvarianten vorgenommen werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Mögliche Verstärkungsmaßnahmen

Als bislang am meisten erfolgversprechende Verstärkungsmaßnahmen von orthotropen Fahrbahnplatten von Straßenbrücken haben sich herausgestellt:

- Sandwich-Platten-System (SPS), siehe Bild 2,
- hochfester, bewehrter Stahlfaserbeton, siehe Bild 3,
- Aufkleben von Stahlblechen, siehe Bild 4,
- hohlraumreiches Asphaltgerüst mit nachträglicher Verfüllung (HANV), siehe Bild 5,
- Epoxy-Asphalt und
- Betonfertigteile aus ultrahochfestem Beton (UHPC).

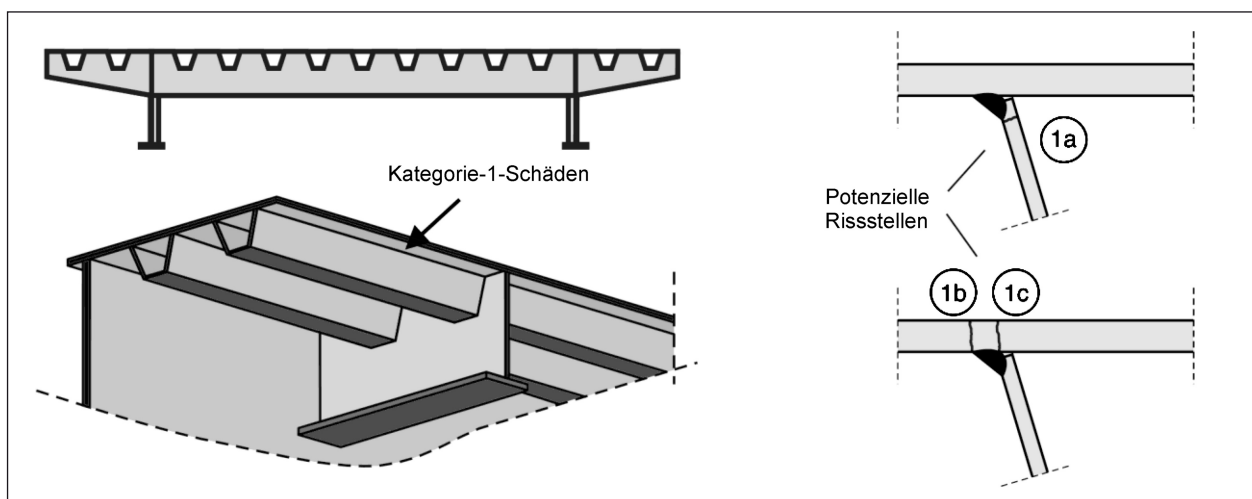
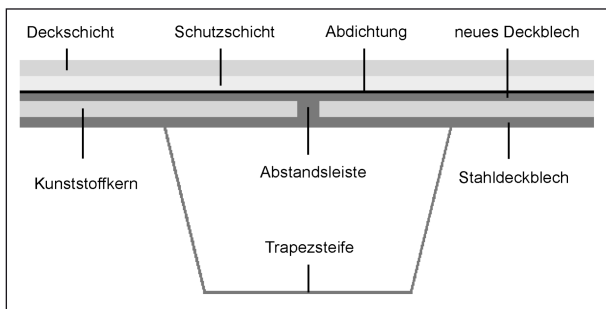
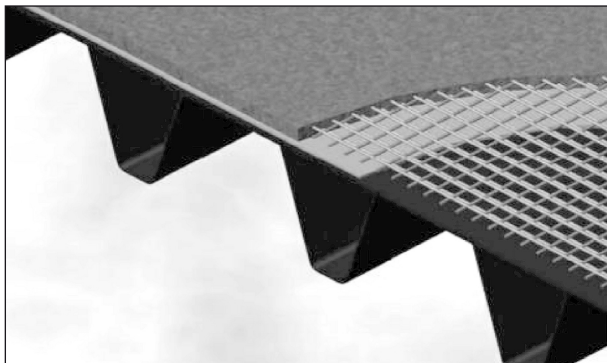


Bild 1: Kategorie-1-Schäden

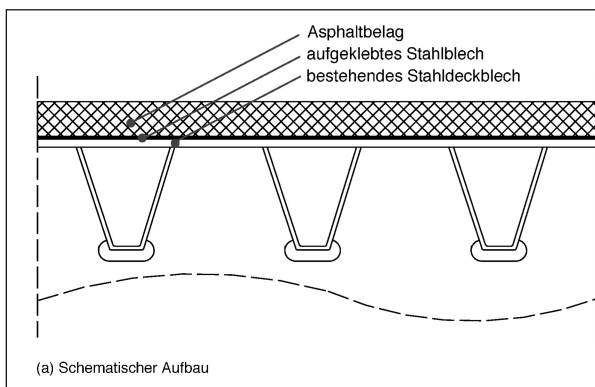




**Bild 2:** Aufbau des SPS-Systems



**Bild 3:** Hochfester, bewehrter Stahlfaserbeton [FRI 2010]



**Bild 4:** Aufkleben von Stahlblechen [FRI 2005b]



**Bild 5:** Verfüllung eines hohlräumreichen Asphaltgerüsts mit Epoxidharz im Labor [SED 2010]

Diese Verstärkungsmaßnahmen werden in den folgenden Kapiteln kurz vorgestellt. Eine ausführliche Beschreibung und Gegenüberstellung ist in [SED 2010] dargestellt.

## 2.2 Sandwich-Platten-System (SPS)

Das Sandwich-Platten-System (SPS) besteht aus zwei Stahlblechen, welche durch einen Polyurethan-Elastomer-Kern kraftschlüssig miteinander verbunden werden. Die Herstellung des SPS erfolgt in zwei Schritten: Zunächst werden die Oberbleche mit Abstandshaltern und Randleisten auf das Deckblech montiert, sodass ein luftdichter Hohlraum entsteht. Anschließend wird das Polyurethan in den Hohlraum injiziert, wodurch nach dem Erhärten eine zug- und schubfeste Verbundkonstruktion entsteht.

Ursprünglich wurde das SPS für den Schiffbau entwickelt, wo es der Verstärkung von Fahrbahnkonstruktionen wie beispielsweise bei Lkw-Decks von Fährschiffen diente. Wegen des Erfolgs im

Schiffbau wurde die SPS-Technik bis hin zum Einsatz bei einem Pilotprojekt, der Schönwasserparkbrücke auf der BAB A 57 bei Krefeld, auch als Verstärkungsmaßnahme für orthotrope Fahrbahnplatten auf Stahlbrücken weiterentwickelt. Umfangreiche Beschreibungen des Projekts sowie der durchgeführten Untersuchungen bis hin zum Einbau beim Pilotprojekt sind u. a. in [HAM 2007; MIN 2007; KEN 2007; MAT 2007; FRI 2007; FAR 2006; SED 2010] enthalten. Nachfolgend werden nur die wichtigsten Ergebnisse des Projekts dargestellt.

Mithilfe der SPS-Technik lässt sich eine deutliche lokale Spannungsreduktion im Deckblech von bis zu 50 % erzielen [SED 2010]. Daraus resultiert auch eine erhebliche Reduzierung der Spannungsschwingbreiten, wodurch die Wirksamkeit des SPS als Verstärkungsmaßnahme von orthotropen Fahrbahnplatten eindeutig nachgewiesen ist. Mittlerweile ist die SPS-Maßnahme seit 10 Jahren auf der Schönwasserparkbrücke im Einsatz und weist keine erkennbaren Beschädigungen auf. Daher kann das SPS-System derzeit auch als dauerhaft eingestuft werden. Die Praxistauglichkeit wurde im Rahmen der Untersuchungen zu dem Pilotprojekt ebenfalls nachgewiesen. Durch die Wahl eines „Standardasphaltbelags“ von mindestens 8 cm Dicke ist eine Belagserneuerung mit den üblichen Verfahren möglich. Untersuchungen an Fahrbahnelementen der D-Brücke sowie das Pilotprojekt der Schönwasserparkbrücke belegen die Beständigkeit des SPS gegen Heißasphalteinbau.

Bei der Durchführung des Pilotprojekts zeigten sich jedoch auch deutliche Nachteile des SPS. Der Einbau des SPS ist witterungsabhängig und feuchteempfindlich, sodass eine Einhausung der Arbeitsstelle zwingend erforderlich wird. Durch den erhöhten Fahrbahnaufbau werden ergänzende bauliche Maßnahmen an den Fahrbahnübergängen sowie an den Schrammborden notwendig. Dadurch wird das SPS zu einer sehr kostenintensiven Verstärkungsmaßnahme. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass durch das SPS je nach Dicke des oberen Bleches ein Zusatzgewicht von etwa 100 kg/m<sup>2</sup> auf die bestehende Brücke aufgebracht wird.

Aufbauend auf den am Pilotprojekt gewonnenen Erfahrungen wurde die SPS-Technologie stetig weiterentwickelt. Umfangreiche numerische und experimentelle Untersuchungen, insbesondere in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit des SPS-Systems, wurden in [TEI 2012] durchgeführt. Auch in der Praxisanwendung wurde die SPS-Technologie

weiter optimiert, wobei sich hierbei nicht nur auf die Verstärkung bestehender Brückenbauwerke, sondern auch auf eine SPS-Anwendung in neuen Brückenbauwerken konzentriert wurde, siehe auch [FEL 2010].

Als Verstärkungsmaßnahme für bestehende Brückenbauwerke kam das SPS-System noch drei weitere Male zur Anwendung. Bei der Sanierung zweier Brückenbauwerke in Kanada wurde die bestehende Betonfahrbahnplatte durch ein SPS-System ersetzt. In ähnlicher Weise wurde auch die Hängebrücke über die Saar bei Mettlach instandgesetzt. Dabei wurde der SPS-Überbau aus einzelnen Paneelen hergestellt, die komplett in der Werkstatt vorgefertigt wurden und dann auf der Baustelle nur noch zusammengefügt werden mussten. Die gesamte Montagezeit konnte hierbei im Vergleich zu klassischen Bauweisen um die Hälfte reduziert werden, siehe auch [STI 2013].

### 2.3 Hochfester Beton mit Stahlfasern

Der Einsatz von hochfestem Beton mit Stahlfasern wurde in den Niederlanden bis hin zur Praxisreife entwickelt, siehe u. a. [DEJ 2007; DEN 2006; LEE 2005; LEE 2007; LEE 2008; SED 2010]. Hierbei wird der herkömmliche Asphaltbelag durch einen stahlfaserverstärkten, bewehrten Hochleistungsbeton ersetzt, der in Ortbetonbauweise hergestellt wird. Um die Wirksamkeit dieser Methode zu gewährleisten, ist ein ausreichender Verbund zwischen Deckblech und Betonbelag sicherzustellen. Ein zweikomponentiges Epoxidharz mit eingestreutem Bauxit-Korn hat sich als beste Methode erwiesen, um eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Deckblech und Belag herzustellen. Anfängliche Probleme bezüglich der Gradienten des Stahldeckblechs sowie der Ebenheit der Fahrbahn konnten im Rahmen von Weiterentwicklungen weitestgehend gelöst werden. Um Hohlräume zu vermeiden, wurden die Bewehrungsführung sowie die Lage und die Durchmesser der Bewehrung optimiert. Eine ausreichende und gleichmäßige Griffigkeit des Fahrbahnbelags wurde dadurch geschaffen, dass die Betonoberfläche aufgeraut und anschließend ein Dünnbelag aufgebracht wurde. Die Verwendung von Betonfertigern sorgt für eine ebenere Fahrbahn gegenüber dem Beton-einbau mittels Abzugsbohle.

Die Reduzierung der Spannungen und Dehnungen im Deckblech durch die Verwendung des hoch-

festen Betons mit Stahlfaserverstärkung konnte sowohl im Labor als auch bei den durchgeführten Pilotprojekten eindeutig nachgewiesen werden. Allerdings birgt auch diese Verstärkungsmaßnahme einige Probleme. Der Einbau des hochfesten Betons erfordert eine sehr hohe Ausführungsqualität. Wie beim SPS muss auch für eine Verstärkung mit hochfestem Beton der gesamte Arbeitsbereich eingehaust werden. Das Aufbringen des zusätzlichen Dünnbelags geht mit einer geringfügigen Erhöhung des Gesamtgewichts einher und kann die Kosten dieser Verstärkungsmaßnahme um das doppelte steigern [SED 2010]. Inwieweit der aufgebrauchte Dünnbelag dauerhaft ist bzw. in welchen Intervallen dieser erneuert werden muss, was mit zusätzlichen Kosten einhergeht, ist noch zu untersuchen.

Als Pilotprojekt in Deutschland wurde stahlfaserverstärkter, ultrahochfester Beton im Rahmen von Verstärkungsmaßnahmen einer Bahnquerung der Landesstraße L 1239 in Beimerstetten eingesetzt. Die aus diesem Pilotprojekt gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage dafür dienen, dieses Verfahren auch bei der Verstärkung der Rheinbrücke Maxau der BAB A 10 bei Karlsruhe einzusetzen.

## 2.4 Aufkleben von Stahlblechen

Vielversprechend ist auch die Methode des Aufklebens von Stahlblechen im Fliesenlegerverfahren zur Erhöhung der Steifigkeit des Deckblechs. Bei dieser Methode wird mittels 2-Komponenten-Epoxidharz-Klebstoff auf das bereits vorhandene Deckblech ein weiteres Stahlblech aufgeklebt. In von der BASt durchgeführten Forschungsarbeiten, siehe [PET 2004], konnte numerisch nachgewiesen werden, dass eine Erhöhung der Deckblechdicke erwartungsgemäß auch eine Reduzierung der Spannungen an der Unterkante des Deckblechs zur Folge hat. Bei Untersuchungen zur Optimierung der Klebetechnologie, siehe [FRI 2005b], konnten geeignete Klebstoffe und Verfahren zum Einbringen des Klebstoffes entwickelt werden, sodass die Wirksamkeit dieser Methode in statischen Versuchen nachgewiesen werden konnte. Zur Bewertung dieser Methode hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchbarkeit laufen derzeit Dauerschwell-Biegeversuche.

Da das Aufkleben von Stahlblechen noch nicht bis zur Praxisreife entwickelt ist, lässt sich hier noch

keine Aussage über die Praxistauglichkeit treffen. Der Klebevorgang ist in jedem Fall witterungsabhängig, sodass davon auszugehen ist, dass auch bei dieser Verstärkungsmaßnahme eine Einhausung der Baustelle notwendig wird. Gegenüber den oben beschriebenen Verstärkungsmaßnahmen bietet das Aufkleben von Stahlblechen den Vorteil, dass der geringe Dickenverlust von nur ca. 8 mm im Belagsaufbau ausgeglichen werden kann.

In Bezug auf die Praxistauglichkeit der Verstärkungsmaßnahme Aufkleben von Stahlblechen besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Speziell beim Aufkleben von Stahlblechen im Fliesenlegerverfahren gilt es zu berücksichtigen, inwieweit sich ein möglicher Versatz der Stahlbleche untereinander negativ auf die Nutzungsdauer des Fahrbahnbelages auswirkt.

Weiterführende Untersuchungen zum prinzipiellen statischen und dynamischen Tragverhalten von aufgeklebten Stahlblechen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Klebverfahren und Blechdicken wurden zwischenzeitlich auch von [TEI 2012] durchgeführt.

## 2.5 Hohlraumreiches Asphaltgerüst mit nachträglicher Verfüllung (HANV)

Die oben beschriebenen Verstärkungsmaßnahmen haben Nachteile, die nachfolgend nochmals zusammengefasst werden. Bei der SPS-Technik wird der Aufbau des Fahrbahnbelags erhöht und somit die Gradienten verändert. Alle oben genannten Verstärkungsmaßnahmen gehen mit einer Erhöhung des Gesamtgewichts der Brücke einher. Zusätzlich sind diese Verstärkungsmaßnahmen mit hohen Kosten verbunden. Aus diesem Grund liegt es nahe, den Belagsaufbau so zu verändern, dass dieser selbst zu einer Reduzierung der Spannungen im Deckblech führt.

Die Erhöhung der Belagssteifigkeit durch Aufbringen eines hohlraumreichen Asphalttraggerüsts mit nachträglicher Verfüllung (HANV) stellt eine vielversprechende Maßnahme dar, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts untersucht wurde.

HANV wurde ursprünglich u. a. als Sonderbelag für Bushaltestellen auf Massivbrücken eingesetzt, da



er gegenüber einem konventionellen Asphalt eine deutlich höhere Standfestigkeit aufweist. Der Aufbau der o. g. Befestigung bestand aus einer konventionellen Abdichtung und einer Schutz- und Deckschicht aus hohlraumreichem Asphalt, dessen Hohlräume mit einem Reaktionsharz verfüllt wurden, siehe [DUD 2003].

HANV besteht aus einem hohlraumreichen Asphaltträgergestüt mit einem Hohlraumgehalt von 17-25 Vol. %, welches nachträglich verfüllt wird. Die Mindestschichtdicke liegt in Abhängigkeit des Größtkorns zwischen 1,5 cm und 3 cm. Der Einbau des Asphaltträgergestütes erfolgt mit einem herkömmlichen Straßenfertiger. Zum Verfüllen kommen bisher zwei unterschiedliche Harze zum Einsatz: flexibilisiertes Epoxidharz und Bioharz. Das Verfüllen mit den o. g. Harzen kann direkt hinter dem Straßenfertiger (heißes Asphaltträgergestüt) erfolgen. Das Asphaltgerüst wird lediglich mit einer Walze geglättet, da abgesehen von dem Glätten kein Verdichten erforderlich ist. Das flexibilisierte Epoxidharz bzw. Bioharz wird anschließend mit Gummischiebern auf der Oberfläche verteilt und danach scharf abgezogen, wodurch es in das Porengerüst eindringt und dieses verfüllt.

Der Einsatz des HANV als Dichtungs- und Schutzschicht für Fahrbahnbeläge auf Betonbrücken, in Tunneln und Trogbauwerken wurde bereits in [DUD 2003] untersucht. Dabei wurden verschiedene Verfüllmaterialien (Epoxidharz nach TL-BEL-EP, Feinstzement Injektionssuspension in Anlehnung an die ZTV Riss, flexibilisiertes Epoxidharz, modifiziertes Bitumen, Straßenbaubitumen 50/70) zur Verfüllung des hohlraumreichen Asphaltträgergestütes eingesetzt. Die Verfüllung mit einem flexibilisierten Epoxidharz erwies sich als geeignetste Lösung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems“ [SED 2010] wurde überprüft, ob HANV auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten in der Schutzschicht eingesetzt werden kann. Die Untersuchungen zeigten, dass HANV Vorteile gegenüber dem Referenzsystem (Gussasphalt) aufweist. Eine Bewertung der Effizienzsteigerung konnte nicht erfolgen, da die Versuchsergebnisse keine eindeutige Bewertung zuließen. Aufbauend auf den Erfahrungen, die in dem o. g. Forschungsprojekt bereits mit Versuchen an HANV gesammelt wurden, sollte im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts der

Versuchsaufbau und -ablauf weiter optimiert werden, sodass eine eindeutige Bewertung vorgenommen werden kann.

HANV ist gegenüber Verformungen relativ unempfindlich. Durch die Verwendung geeigneter flexibilisierter Epoxidharze kann die aufnehmbare Bruchlast und die entsprechende Bruchdehnung weiter optimiert werden. Der Einsatz von HANV ist als Dichtungs-, Schutz- und Deckschicht möglich. Auf die bei der Bauart 1 nach ZTV-ING Teil 7, Abschnitt 4 [ZTV 2010] in der Dichtungsschicht erforderliche Pufferschicht kann gegebenenfalls verzichtet werden. Hierzu sind zuvor weitere Untersuchungen bezüglich des Schichtenverbundes, der Wasserdichtigkeit und der Verschieblichkeit zwischen den Schichten durchzuführen [SED 2010].

HANV wurde bisher auf Betonbrücken u. a. in Berlin, Brandenburg und Düsseldorf als kombinierte Dichtungs- und Schutzschicht eingebaut. Bisher liegen keine Erfahrungen beim Einsatz von HANV als Dichtungs-, Schutz- oder Deckschicht auf Stahlbrücken vor.

Wie bereits erwähnt, kann HANV mit flexibilisiertem Epoxidharz oder mit Bioharz verfüllt werden. Beide Varianten werden im Folgenden beschrieben.

### **Flexibilisiertes Epoxidharz**

Epoxidharze sind 2-Komponentensysteme, bestehend aus Grundharzen und Härtern. Sie gehören zur Stoffgruppe der Reaktionsharze. Die Prüfung der Reaktionsharze ist nach DIN 16945 „Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen; Prüfverfahren“ [DIN 16945] geregelt. Die Zugabe des Härters löst eine Polymerisation der Grundharze aus. Es entsteht ein duroplastischer Kunststoff von hoher Festigkeit und chemischer Beständigkeit. Die Verarbeitungszeit von Reaktionsharzen hängt von der Verarbeitungstemperatur, der Zusammensetzung des Harzes und dem Verarbeitungsverfahren ab. Sie liegt zwischen einigen Minuten bis zu mehreren Tagen.

### **Bioharz**

Bioharze können aus Raps, Zucker, Rizinus, Caprolactone etc. hergestellt werden. Bioharze sind im Vergleich zu flexibilisierten Epoxidharzen nicht gesundheitsgefährdend.

## 2.6 Epoxy-Asphalt

Eine weitere Möglichkeit, die mittragende Wirkung des Fahrbahnbelags auf Stahlbrücken zu erhöhen, könnte neben dem Einsatz von HANV evtl. auch in der Verwendung von Epoxy-Asphalt bestehen. Epoxy-Asphalt besteht aus Epoxydharzen, welche als Bindemittelzusatz bzw. einer teilweisen Substitution der gesamten Bitumenmenge im Asphaltmischgut dienen. In den USA und in China wurde Epoxy-Asphalt vereinzelt bereits als Fahrbahnbelag auf Stahlbrücken eingesetzt.

Epoxy-Asphalt wurde bei der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Rahmen einer Dissertation, „Entwicklung von langlebigen Decksichten aus Asphalt unter Verwendung von Epoxydharz“ [LUD 2009], untersucht. Gegenstand dieser Untersuchungen war die Fragestellung, ob ein solcher Epoxy-Asphalt einen Beitrag zur Entwicklung einer hochstandfesten und langlebigen Asphaltdeckschicht leisten kann. Es wurde nachgewiesen, dass Epoxy-Asphalt eine höhere Verformungsbeständigkeit, ein höheres Haftverhalten und einen höheren Ermüdungswiderstand gegenüber einem Splittmastixasphalt (Referenzasphalt) aufweisen kann. Der Widerstand gegen dauerhafte Belastungen bei tiefen Temperaturen entspricht dem des Referenzasphalts. Zusätzlich wurde die Microrauheit mit dem SRT-Pendel an Prüfkörpern überprüft. Der Epoxy-Asphalt weist eine etwas geringere Microrauheit im Vergleich zum Referenzasphalt auf, d. h. dass auf Epoxy-Asphaltdeckschichten eine ausreichende Griffigkeit nachträglich hergestellt werden muss.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass die Verarbeitung des Epoxy-Asphalts stark gesundheitsgefährdend und aus diesem Grund nur mit entsprechenden Schutzmaßnahmen und unter erheblich erschwerten Bedingungen möglich ist. Aus diesem Grund wird der Einsatz des Epoxy-Asphalts auf nationaler Ebene nicht gefördert und im Rahmen des Forschungsprojekts nicht weiter behandelt.

## 2.7 Betonfertigteile aus UHPC

Die Wirksamkeit von UHPC (Ultra High Performance Concrete) als Ortbetonverstärkungsmaßnahme für orthotrope Fahrbahnplatten wurde bereits bei Pilotprojekten in den Niederlanden nachgewiesen, siehe Kapitel 2.3. Als eines der größten Probleme beim Einsatz von UHPC hat sich die Verarbeitbarkeit des UHPC vor Ort herausgestellt.

Am Lehrstuhl für Stahlbau der TU Dortmund wurden erste Untersuchungen zum Einsatz von UHPC-Betonfertigteileplatten als Verstärkungsmaßnahme durchgeführt [UNG 2010].

Durch die Verwendung von Fertigteileplatten aus UHPC wird die Problematik der Vorortverarbeitung umgangen. Bei der Herstellung der Fertigteileplatten im Werk lässt sich eine optimale Qualität erzielen. Die Fertigteileplatten werden nach der Herstellung im Werk auf die Baustelle geliefert und dort auf das vorhandene Stahldeckblech geklebt. In erster Linie dient die Fertigteileplatte der Gewährleistung einer ausreichenden Lastverteilung, insbesondere in den Sommermonaten. Damit sich die Dicke des Fahrbahnaufbaus infolge der Verstärkungsmaßnahme nicht erhöht, wird die Fertigteileplatte so dünn wie möglich ausgeführt, ca. 30 mm, sodass auf ihr als befahrbare Deckschicht eine normale Gussasphaltschicht aufgebracht werden kann. Eine direkte Befahrbarkeit der UHPC-Fertigteileplatte ist damit explizit nicht vorgesehen.

Im Rahmen des von der TU-Dortmund durchgeführten Projekts wurde das Tragverhalten von orthotropen Platten, die mit Betonfertigteilen verstärkt wurden, anhand von Biegeprüfungen untersucht. Hierfür wurden Teile einer orthotropen Platte, bestehend aus Deckblech, Trapezhohlsteifen und Querträgern, gefertigt. Das Deckblech hatte Abmessungen von 2.500 mm x 1.250 mm x 12 mm. Abstand und Breite der Trapezhohlsteifen betragen jeweils 300 mm. Die Querträger wiesen eine Höhe von 850 mm auf, siehe Bild 6. Folgende Varianten des Systemaufbaus wurden untersucht:

- reine Stahlplatte als Referenzsystem,
- UHPC-Platte  $h_c = 30$  mm, lose aufgelegt,



Bild 6: Versuchsaufbau – Fertigteile aus UHPC [UNG 2010]

- UHPC-Platte  $h_c = 30$  mm, verklebt,
- UHPC-Platte  $h_c = 60$  mm, lose aufgelegt,
- UHPC-Platte  $h_c = 60$  mm, verklebt und
- Asphaltdeckschicht,  $h = 75$  mm.

Die Versuche an den reinen Stahlplatten dienten dazu, Referenzwerte für die übrigen Versuche zu erhalten. Die Versuche mit lose aufgelegter Betonplatte sollten den Verlust der Verbundwirkung simulieren. Die Versuche mit der Asphaltdeckschicht dienten dem Vergleich und der Bewertung Verstärkungsmaßnahme durch Betonfertigteile aus UHPC. Die Abmessungen von Betonplatte und Asphaltdeckschicht betragen 2.000 mm x 980 mm.

Die Stahlkonstruktion wurde aus einem Baustahl S235 hergestellt. Die genaue Zusammensetzung des UHPC ist nicht bekannt. Eine rein qualitative Bewertung des Systems kann dennoch vorgenommen werden. Zur Herstellung der Prüfkörper mit aufgeklebten UHPC-Fertigteilen wurde zunächst die Stahloberfläche mit Stahlkies G25/G40 abgestrahlt, um die notwendige Rauigkeit der Oberfläche von 80  $\mu$ m herzustellen. Im nächsten Schritt wurde die Stahloberfläche mit Sika-COR-Zink-R grundiert. Als Klebstoff wurde Sikadur 30 DUE-normal eingesetzt. Dieser Klebstoff ist ein lösemittelfreier, thixotroper 2-Komponenten-Epoxidharzmörtel, der beispielsweise auch bei der Verklebung von CFK-Lamellen zum Einsatz kommt. Die Klebschichtdicke wurde auf 3 mm festgelegt, welche mit einem 6 mm Zahnpachtel hergestellt wurde. Abschließend wurden die Betonfertigteile auf die Klebschicht aufgelegt und mit dem Stahlblech verklebt.

Die Prüfkörper wurden über ein Stahlblech mit den Abmessungen 400 mm x 400 mm x 40 mm mit untergelegter Holzplatte mit einer Einzellast von 120 kN gemäß DIN EN 1991-2 [DIN 1991] belastet. Insgesamt wurden die Prüfkörper an 15 verschiedenen Positionen in Längs- und Querrichtung belastet. Die infolge der Belastung entstehenden Verformungen wurden mittels Wegaufnehmern und Dehnungsmessstreifen (DMS), die ebenfalls in Längs- und Querrichtung an signifikanten Punkten angebracht wurden, gemessen.

Aufgrund der geringen Abmessungen der orthotropen Fahrbahnplatte (2.500 mm x 1.250 mm) hat sich das System der Prüfkörper als äußerst steif erwiesen, weshalb die gemessenen Verformungen teilweise im Bereich der Messtoleranzen lagen. Dennoch sind erste Tendenzen zu erkennen. Die

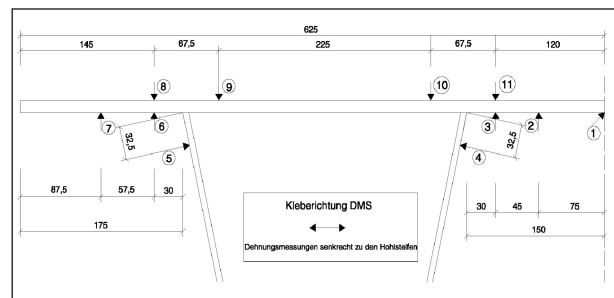


Bild 7: Lage der DMS [UNG 2010]

Versuchsergebnisse zeigen eine deutliche Reduzierung der lokalen Spannungsspitzen infolge der Lastenleitung. Durch einen Vergleich der vertikalen Verformungen unter den Rippen wurde die prozentuale Querverteilung der Lasten bestimmt. Durch das Aufkleben der UHPC-Platten konnte eine erhebliche Steigerung der Querverteilung erzielt werden. Mithilfe der entlang der Längsrippen angebrachten DMS, siehe Bild 7, wurden aus den gemessenen Verformungen ermüdungsrelevante Spannungsschwingbreiten berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine 30 mm dicke Betonplatte aus UHPC eine Reduzierung der Spannungsschwingbreite um 50,7 % gegenüber dem reinen Stahlblech bewirkt. Eine 60 mm dicke Betonplatte bewirkt eine Reduzierung der Spannungsschwingbreite um 63,8 %. Daraus resultiert eine deutliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Aufkleben von Betonfertigteilen aus UHPC eine erfolgversprechende Verstärkungsmaßnahme sein kann. Da es sich bei den hier vorgestellten Ergebnissen um erste Versuche handelt, lässt sich diese Verstärkungsmaßnahme derzeit nicht abschließend bewerten. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, sind weitergehende Untersuchungen notwendig. Da die oben vorgestellten Untersuchungen an einem sehr kleinen und somit steifen System erfolgten, wären Untersuchungen an größeren Prüfkörpern erstrebenswert. Durch Untersuchungen an einer weniger steifen orthotropen Platte ließen sich größere und damit praxisnahe Verformungen erzielen, anhand derer sich eindeutige Aussagen über das Aufkleben von Betonfertigteilen aus UHPC treffen lassen. Zusätzlich sind weitere Untersuchungen bezüglich der Zusammensetzung des UHPC und des verwendeten Klebstoffs erforderlich.

Lieferten die Versuche an größeren Prüfkörpern ähnliche oder bessere Ergebnisse, wäre anschließend die Dauerhaftigkeit dieser Verstärkungsmaßnahme

zu untersuchen. In diesem Zusammenhang bleibt auch die Frage zu klären, inwieweit Unebenheiten des Deckblechs

- (a) vorhanden sind und
- (b) über die Klebschicht zwischen Deckblech und UHPC-Fertigteilplatte ausgeglichen werden können.

Die Verstärkung von orthotropen Fahrbahnplatten durch Fertigteile aus UHPC kann eine geeignete Verstärkungsmaßnahme sein. Erste Untersuchungen zeigen deutlich ein großes Potenzial dieser Maßnahme auf.

## 3 Charakterisierung der Materialeigenschaften

### 3.1 Allgemeines

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts erfolgte der Nachweis der mittragenden Wirkung sowohl numerisch als auch experimentell für die nachfolgenden Belagsvarianten:

- (a) Referenzsystem Gussasphalt mit Pufferschicht nach ZTV-ING Teil 7, Abschnitt 4 und einer Abdichtung nach Bauart 1,
- (b) Referenzsystem Gussasphalt ohne Pufferschicht nach ZTV-ING Teil 7, Abschnitt 4 und einer Abdichtung nach Bauart 1,
- (c) HANV mit Epoxidharz-Verfüllung mit Pufferschicht,
- (d) HANV mit Epoxidharz-Verfüllung ohne Pufferschicht und
- (e) HANV mit Bioharz-Verfüllung ohne Pufferschicht.

Der Nachweis der mittragenden Wirkung gliederte sich in mehrere Arbeitsschritte. Zunächst wurden Spaltzug-Schwellversuche durchgeführt, um die E-Moduln der unterschiedlichen Fahrbahnbelagsvarianten zu bestimmen. Die E-Moduln dienen als Eingangsgrößen für Berechnungen nach der Mehrschichtentheorie. Mit der Mehrschichtentheorie lassen sich Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen an unterschiedlichen Positionen auf dem Fahrbahnbelag und innerhalb des Fahrbahnbelags für unterschiedliche Fahrbahnbelagsvarianten berechnen. Somit lässt sich durch die Berechnung

nach der Mehrschichtentheorie der Aufbau des Fahrbahnbelags optimieren. Zusätzlich sollten die ermittelten Materialkennwerten als Eingangsgrößen für die Finite-Elemente-Berechnungen dienen. Die Ergebnisse der Materialuntersuchungen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

## 3.2 Spaltzug-Schwellversuche

### 3.2.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der E-Moduln der unterschiedlichen Asphalte wurden Spaltzug-Schwellversuche gemäß [AL 2009] durchgeführt. Beim Spaltzug-Schwellversuch wird ein zylindrischer Prüfkörper, siehe Bild 9, parallel zu seiner Achse linienförmig über die Mantelfläche mit einem Druckimpuls beaufschlagt. Dabei wird die seitliche Verformung gemessen, siehe Bild 8. Aus der aufgebracht Last und der aufgezeichneten Verformung lässt sich anschließend der E-Moduln in Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastungsfrequenz ermitteln. Die Spaltzug-Schwellversuche wurden an der am Institut für Metall- und Leichtbau vorhandenen servohydraulischen 100 kN-Hydropuls-Prüfmaschine der Firma Schenck/Zwick/Roell, siehe Bild 8, durchgeführt.

Da derzeit keine Erfahrungen mit der Durchführung von Spaltzug-Schwellversuchen an Gussasphalten vorliegen, wurden die Spaltzug-Schwellversuche zunächst an einem konventionellen Splittmastixasphalt durchgeführt. Hierzu gibt es ausreichende Erfahrungen hinsichtlich der Versuchsdurchführung und der Bewertung der Versuchsergebnisse, sodass die Prüfmaschine und der Versuchsaufbau kalibriert werden konnten. Nach dieser Kalibrierung wurden die Spaltzug-Schwellversuche an einem

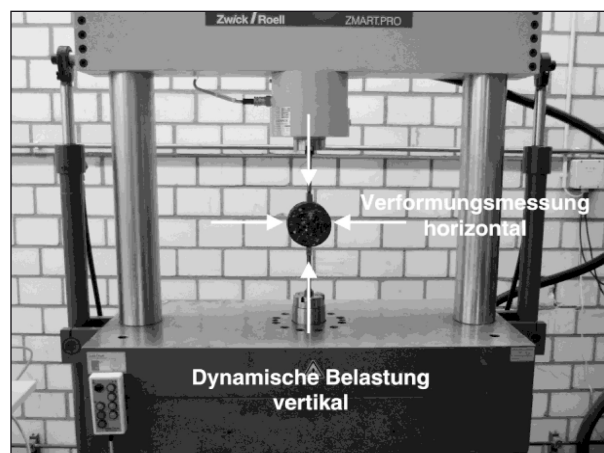


Bild 8: Versuchsaufbau Spaltzug-Schwellversuche





**Bild 9:** Prüfkörper für Spaltzug-Schwellversuche

herkömmlichen Gussasphalt, wie er derzeit standardmäßig auf Stahlbrücken eingesetzt wird, durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Spaltzug-Schwellversuche dienen als Referenz zur Bewertung der Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche mit HANV-Varianten.

### 3.2.2 Versuchsprogramm

In Tabelle 1 ist das Versuchsprogramm dargestellt. Die Anzahl der erforderlichen Prüfkörper setzte sich

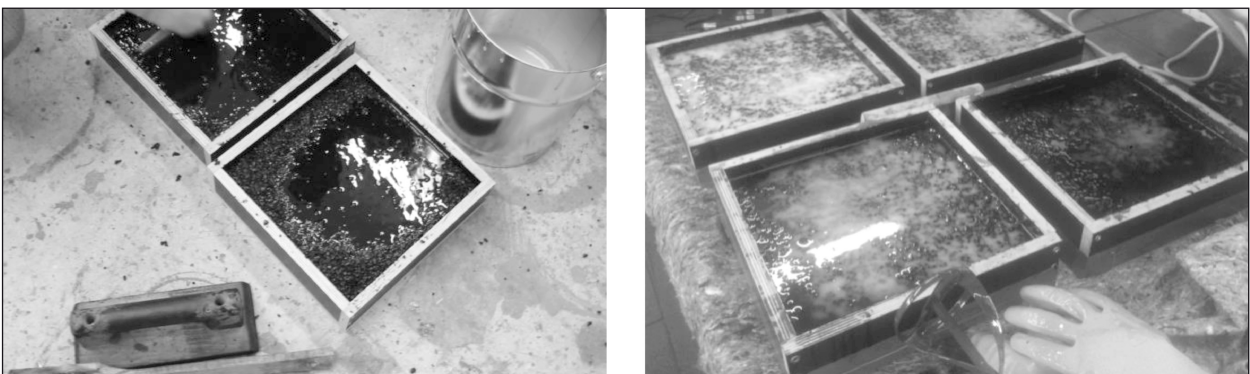
wie folgt zusammen: Die Versuche am Splittmastixasphalt wurden für zwei Temperaturen durchgeführt. Für jede Temperatur sind zwei Frequenzen mit jeweils drei Prüfkörpern zu prüfen, wobei die unterschiedlichen Frequenzen im Multistageversuch zu prüfen sind. Dies bedeutet, dass die Belastung mit unterschiedlichen Frequenzen direkt hintereinander an demselben Prüfkörper aufgebracht wird. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche betrug demnach: 2 Temperaturen x 3 Prüfkörper = 6 Versuche. Gemäß [AL 2009] ist zusätzlich für jede Kombination aus Frequenz und Temperatur ein Vorversuch zur Bestimmung der Oberlasten durchzuführen. Somit ergaben sich für den Splittmastixasphalt zusätzlich 2 Temperaturen x 2 Frequenzen = 4 Vorversuche. Für die Versuche am Gussasphalt und an den beiden HANV-Varianten resultierten somit für fünf bzw. vier Temperaturen jeweils 30 bzw. 24 Versuche.

### 3.2.3 Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden von zwei verschiedenen Prüflaboratorien (Straßenbauunternehmen) hergestellt, siehe Bild 10. Die mit Epoxidharz verfüllten HANV-Prüfkörper, siehe Bild 11, wurden vom Straßenbauunternehmen A hergestellt. Die Walz-

|                                       | 1                                       | 2                                  | 3                      | 4                   |
|---------------------------------------|---|------------------------------------|------------------------|---------------------|
| <b>Asphalt</b>                        | <b>Walzasphalt (SMA 11 S/N)</b>         | <b>Gussasphalt (MA 11 S/N)</b>     | <b>HANV-Epoxidharz</b> | <b>HANV-Bioharz</b> |
| Temperaturen                          | -10 °C, 20 °C                           | -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C (40 °C) |                        |                     |
| Frequenzen                            | 10 Hz, 0,1 Hz                           | 10 Hz, 1 Hz, 0,1 Hz                |                        |                     |
| Anzahl Versuche                       | 10                                      | 30                                 | 30                     | 24                  |
| Anzahl Prüfkörper (inkl. Vorversuche) | 6 (+4)                                  | 15 (+15)                           | 15 (+15)               | 12 (+12)            |
| Prüfkörperabmessungen                 | Höhe: 40 ± 2 mm Durchmesser: 100 ± 3 mm |                                    |                        |                     |

**Tab. 1:** Übersicht Versuchsprogramm – Spaltzug-Schwellversuche



**Bild 10:** Herstellung der HANV-Prüfkörper

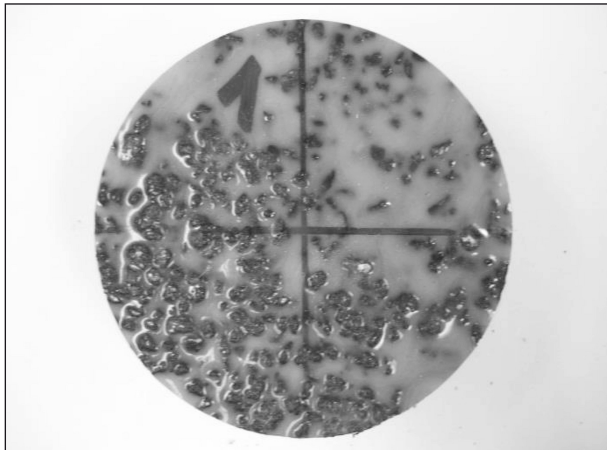


Bild 11: Epoxidharz verfüllter HANV-Prüfkörper



Bild 13: Temperiervorrichtung

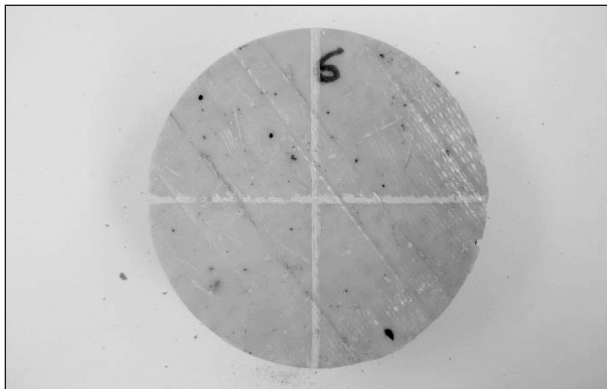


Bild 12: Bioharz verfüllter HANV-Prüfkörper

asphalt-, Gussasphalt- und die mit Bioharz verfüllten HANV-Prüfkörper, siehe Bild 12, wurden vom Straßenbauunternehmen B hergestellt.

### 3.2.4 Versuchsaufbau

Für die Versuchsdurchführung wurden Lasteinleitungsschienen gemäß [AL 2009] gefertigt sowie eine Zentrivorrichtung entworfen und gebaut. Um die Versuche bei verschiedenen definierten Temperaturen durchführen zu können, wurde zusätzlich eine Temperiervorrichtung entworfen, siehe Bild 13.

### 3.2.5 Versuchsdurchführung

Vor Beginn der eigentlichen Spaltzug-Schwellversuche wurde je Temperatur und Frequenz ein Vorversuch zur Bestimmung der erforderlichen Belastung während des Spaltzug-Schwellversuchs gemäß [AL 2009] durchgeführt. Bei diesem Vorversuch wird der Prüfkörper dynamisch mit einer konstanten Unterspannung von  $0,035 \text{ N/mm}^2$  beansprucht, während die Oberspannung schrittweise gesteigert wird. Für jede Laststufe werden

| Belastungs-<br>frequenz<br>[Hz] | Anzahl durch-<br>zuführender<br>Lastwechsel | Auswertung<br>der LW |
|---------------------------------|---|----------------------|
| 10                              | 110   | 98-102               |
| 5                               | 100   | 93-97                |
| 1                               | 20  | 13-17                |
| 0,1                             | 10  | 3-7                  |

Tab. 2: Lastwechselzahlen im Multistageversuch nach [AL 2009]

100 Lastwechsel aufgebracht, wobei nur die Lastwechsel 93 bis 97 ausgewertet werden. Ziel ist es, eine Oberspannung zu erhalten, bei der die horizontale elastische Anfangsdehnung des Prüfkörpers, siehe Gleichung (8), im Bereich zwischen  $0,05 \text{ ‰}$  und  $0,10 \text{ ‰}$  liegt.

Mit den im Vorversuch ermittelten Lasten werden anschließend die Spaltzug-Schwellversuche als Multistageversuch durchgeführt. Das heißt, dass für jede Temperatur der Prüfkörper mit verschiedenen Frequenzen und aus dem Vorversuch zu den Frequenzen gehörenden Oberlasten beansprucht wird. In Abhängigkeit von der Belastungsfrequenz sind unterschiedlich viele Lastwechsel durchzuführen und die Versuche an unterschiedlichen Stellen auszuwerten. Die erforderlichen Lastwechselzahlen sowie die auszuwertenden Zyklen sind in Tabelle 2 angegeben.

### 3.2.6 Versuchsauswertung

Während der Multistageversuche werden die Kraft und die seitliche Verformung des Prüfkörpers aufgezeichnet und an den in Tabelle 2 angegebenen Stellen ausgewertet. Zunächst werden an den maßgebenden Stellen der Kraft-Zeitverlauf sowie

der Verformungs-Zeitverlauf über die in Gleichungen (1) und (2) angegebenen Sinusfunktionen approximiert. Gleichung (1) gibt die Funktionsvorschrift zur Approximation des Kraft-Zeitverlaufs an und Gleichung (2) die Funktionsvorschrift zur Approximation des Verformungs-Zeitverlaufs:

$$F(t) = A + B \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + C) \quad (1)$$

$$u(t) = a + b \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + c) \quad (2)$$

In den beiden Funktionen stellen die Parameter  $a$ ,  $A$ ,  $b$ ,  $B$  und  $c$ ,  $C$  die Regressionsparameter dar, wobei  $a$  und  $A$  jeweils die Verschiebung in Bezug auf die  $x$ -Achse beschreiben,  $b$  und  $B$  die Amplitude der Schwingung und  $c$  und  $C$  die Phasenverschiebung. Der Parameter  $f$  gibt die geprüfte Frequenz an und  $t$  die Prüfdauer. Gemäß [AL 2009] werden die maximalen Kraft- und Verformungsdifferenzen aus den Regressionsparametern  $B$  und  $b$  in der Form

$$\Delta F = 2 \cdot B \quad (3)$$

und

$$\Delta u = 2 \cdot b \quad (4)$$

bestimmt. Mithilfe der maximalen Kraft- und Verformungsdifferenzen lässt sich der E-Modul nach Gleichung (5) berechnen.

$$|E| = \frac{\Delta F \cdot (0,274 + \mu)}{h + \Delta u} \quad (5)$$

Hierbei ist  $h$  die Höhe des Prüfkörpers und  $m$  die Querdehnzahl, die sich in Abhängigkeit der Prüftemperatur  $T$  nach Gleichung (6) berechnen lässt.

$$\mu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{\left[3,1849 - 0,04233 \cdot \left(\frac{9}{5} \cdot T + 32\right)\right]}} \quad (6)$$

Mit dem nach Gleichung (5) ermittelten E-Modul lassen sich die maximale Zugspannung im Prüfkörpermittelpunkt sowie die elastische horizontale Anfangsdehnung berechnen. Die maximale Zugspannung  $\sigma$  beträgt:

$$\sigma = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (7)$$

Hierbei ist  $F$  die Kraft, und  $d$  und  $h$  der Prüfkörperdurchmesser bzw. die Prüfkörperhöhe. Die elastische horizontale Anfangsdehnung lässt sich anschließend nach Gleichung (8) in Abhängigkeit von E-Modul, Zugspannung und Querdehnzahl berechnen:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma \cdot (1 + 3\mu)}{|E|} \quad (8)$$

### 3.2.7 Vorversuche

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurden zunächst vergleichende Vorversuche an Splittmastixasphalt sowohl an der Universität Duisburg-Essen als auch bei der BAST durchgeführt. Hierzu wurden zunächst Spaltzug-Schwellversuche an der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Im Anschluss wurden sowohl die zu prüfenden Asphaltprüfkörper als auch die an der Universität Duisburg-Essen ermittelten Beanspruchungsniveaus der Bundesanstalt für Straßenwesen übergeben. Im Asphaltlabor der BAST wurden demgemäß vergleichende Spaltzug-Schwellversuche durchgeführt sodass die von der Universität Duisburg-Essen konzipierte und erstellte Versuchsvorrichtung überprüft werden konnte.

Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen an der Universität Duisburg-Essen und der BAST sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Bei 20 °C zeigen die ermittelten E-Moduln bei 1,0 Hz und 0,1 Hz eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der BAST und der Universität Duisburg-Essen. Bei der Prüffrequenz 10 Hz sind größere Abweichungen zu verzeichnen. Deutliche Abweichungen in allen Frequenzbereichen sind bei der Prüftemperatur von -10 °C zu erkennen.

Die Abweichungen lassen sich durch die Unterschiede in der elastischen Anfangsdehnung erklären. Gemäß [AL 2009] muss die elastische Anfangsdehnung zwischen 0,05 ‰ und 0,10 ‰ liegen. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche, welche von der BAST ermittelt wurden, ist zu erkennen, dass der zulässige Bereich der elastischen Anfangsdehnung aufgrund der großen Oberspannung, welche von der Universität Duisburg-Essen bestimmt wurde, überschritten wurde. Da unterschiedliche Anfangsdehnungen auch unterschiedliche Lastniveaus zur Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche implizieren, resultieren aus den Spaltzug-Schwellversuchen zwangsläufig unterschiedliche E-Moduln. Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung und die möglichen Ursachen für die vorhandenen Abweichungen wurden konstruktiv diskutiert und es wurde der Universität Duisburg-Essen empfohlen, die genutzte Prüfvorrichtung zu modifizieren.

| Temperatur<br>[°C] | Frequenz<br>[Hz] | el. Anfangsdehnung |       | E-Modul              |        |                   | Mittelwerte E-Modul  |        |                   |
|--------------------|------------------|--------------------|-------|----------------------|--------|-------------------|----------------------|--------|-------------------|
|                    |                  | [%]                |       | [N/mm <sup>2</sup> ] |        | Abweichung<br>[%] | [N/mm <sup>2</sup> ] |        | Abweichung<br>[%] |
|                    |                  | BASt               | Essen | BASt                 | Essen  |                   | BASt                 | Essen  |                   |
| 20                 | 10               | 0,050              | 0,061 | 6.934                | 5.752  | 17,0 %            | 7.273                | 5.876  | 19,2 %            |
|                    |                  | 0,050              | 0,058 | 7.612                | 5.999  | 21,2 %            |                      |        |                   |
|                    | 1,0              | 0,100              | 0,073 | 3.346                | 3.416  | 2,1 %             | 3.545                | 3.339  | 5,8 %             |
|                    |                  | 0,090              | 0,077 | 3.744                | 3.262  | 12,9 %            |                      |        |                   |
|                    | 0,1              | 0,140              | 0,099 | 1.628                | 1.591  | 2,3 %             | 1.748                | 1.655  | 5,3 %             |
|                    |                  | 0,120              | 0,091 | 1.867                | 1.719  | 7,9 %             |                      |        |                   |
| -10                | 10               | 0,110              | 0,128 | 18.627               | 20.496 | 10,0 %            | 17.982               | 20.737 | 15,3 %            |
|                    |                  | 0,120              | 0,096 | 17.336               | 20.978 | 21,0 %            |                      |        |                   |
|                    | 1,0              | 0,130              | 0,107 | 14.672               | 17.424 | 18,8 %            | 14.145               | 17.034 | 20,4 %            |
|                    |                  | 0,140              | 0,112 | 13.617               | 16.643 | 22,2 %            |                      |        |                   |
|                    | 0,1              | 0,170              | 0,121 | 11.261               | 14.249 | 26,5 %            | 10.599               | 14.383 | 35,7 %            |
|                    |                  | 0,200              | 0,119 | 9.936                | 14.517 | 46,1 %            |                      |        |                   |

Tab. 3: Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen zwischen BASt und Universität Duisburg-Essen

### 3.2.8 Spaltzug-Schwellversuche an unterschiedlichen Asphaltvarianten

Im Anschluss an die Vergleichsuntersuchungen wurden die Spaltzug-Schwellversuche am Gussasphalt und an den beiden HANV-Varianten durchgeführt. Die ermittelten E-Moduln des Gussasphalts (Referenzasphalt), des HANV-Epoxidhar-

zes und des HANV-Bioharzes sind in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und -frequenz in Tabelle 4 zusammengestellt. Zusätzlich zu den experimentell ermittelten E-Moduln sind auch die prozentualen Abweichungen zwischen den E-Moduln der HANV-Varianten und denen des Gussasphaltes dargestellt. Die vollständigen Versuchsergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche sind in A enthalten.

| Temperatur<br>[°C] | Frequenz<br>[Hz] | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]     |                    |                               | Abweichung zum Gussasphalt |                 |
|--------------------|------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------|
|                    |                  | Gussasphalt<br>(Referenzasphalt) | HANV<br>Epoxidharz | HANV<br>Bioharz <sup>1)</sup> | HANV<br>Epoxidharz         | HANV<br>Bioharz |
| -10                | 10               | 24.906                           | 9.693              | 12.506                        | -61 %                      | -50 %           |
|                    | 1                | 20.662                           | 8.220              | 12.368                        | -60 %                      | -40 %           |
|                    | 0,1              | 16.197                           | 6.314              | 9.482                         | -61 %                      | -41 %           |
| 0                  | 10               | 20.693                           | 7.220              | 13.106                        | -65 %                      | -37 %           |
|                    | 1                | 15.343                           | 5.298              | 8.938                         | -65 %                      | -42 %           |
|                    | 0,1              | 10.902                           | 3.905              | 3.716                         | -64 %                      | -66 %           |
| 10                 | 10               | 12.346                           | 6.336              | 3.654                         | -49 %                      | -70 %           |
|                    | 1                | 7.787                            | 4.273              | 1.889                         | -45 %                      | -76 %           |
|                    | 0,1              | 4.930                            | 3.185              | 1.098                         | -35 %                      | -78 %           |
| 20                 | 10               | 8.217                            | 2.851              | 1.793                         | -65 %                      | -78 %           |
|                    | 1                | 4.691                            | 1.757              | 824                           | -63 %                      | -82 %           |
|                    | 0,1              | 2.104                            | 1.230              | 500                           | -42 %                      | -76 %           |

<sup>1)</sup> Die laut Norm geforderte elastische Anfangsdehnung konnte nicht eingehalten werden. Die Ergebnisse sind daher nicht aussagekräftig und können nur eine grobe Richtung aufzeigen.

Tab. 4: Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche



Die E-Moduln wurden bei  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  jeweils für die Frequenzen 10 Hz, 1 Hz und 0,1 Hz ermittelt. Die E-Moduln der geprüften Gussasphalt-Prüfkörper (Referenzasphalt) liegen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz zwischen ca.  $2.000\text{ N/mm}^2$  und ca.  $25.000\text{ N/mm}^2$ . Die Ergebnisse der mit Epoxidharz verfüllten HANV-Prüfkörper liegen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz zwischen ca.  $1.000\text{ N/mm}^2$  und ca.  $10.000\text{ N/mm}^2$ . Die E-Moduln der mit Epoxidharz verfüllten HANV-Variante ist bei allen geprüften Temperaturen und Frequenzen kleiner als die E-Moduln des geprüften Gussasphaltes. Die Abweichungen zwischen den E-Moduln des Gussasphaltes und den E-Moduln des mit Epoxidharz verfüllten HANVs liegen zwischen 35 % und 65 %. Eine Abhängigkeit zwischen den Abweichungen der E-Moduln und der Frequenz konnte nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse der mit Bioharz verfüllten HANV-Prüfkörper können nur als Orientierung dienen, da die ermittelten elastischen Anfangsdehnungen bei fast allen Versuchen über  $0,10\text{ }^{\circ}\text{‰}$  liegen. Die mit Bioharz verfüllten HANV-Prüfkörper neigen zudem schon bei geringen Lasten zu Verformungen und Rissbildungen. Die ermittelten E-Moduln der mit Bioharz verfüllten Prüfkörper liegen in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz zwischen ca.  $500\text{ N/mm}^2$  und ca.  $12.500\text{ N/mm}^2$ . Der E-Moduln der mit Bioharz verfüllten HANV-Variante ist bei allen geprüften Temperaturen und Frequenzen kleiner als der E-Moduln des geprüften Gussasphaltes. Die Abweichungen zwischen den E-Moduln des Gussasphaltes und den E-Moduln der mit Bioharz verfüllten HANV-Variante liegen zwischen 37 % und 82 %. Eine Abhängigkeit der Abweichungen von den Prüftemperaturen oder Prüffrequenzen konnte nicht festgestellt werden.

### 3.2.9 Bestimmung der E-Modul-Temperaturfunktion des Gussasphaltes

Da sich der E-Modul von Gussasphalten bei hohen Temperaturen nicht mithilfe des Spaltzug-Schwellversuches ermitteln lässt, bietet die AL SP- Asphalt 09 [AL 2009] ein Verfahren zur Bestimmung einer E-Modul-Temperaturfunktion an. Die E-Modul-Temperaturfunktion lässt sich aus den Ergebnissen von durchgeführten Spaltzug-Schwellversuchen ableiten und ermöglicht es, der E-Modul für weitere, nicht geprüfte Frequenzen und Temperaturen näherungsweise zu berechnen. Zur Bestimmung

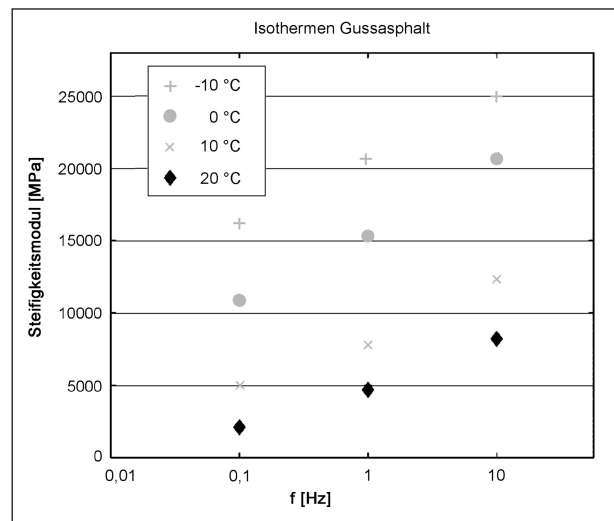


Bild 14: Isothermen des untersuchten Gussasphaltes

der E-Modul-Temperaturfunktion werden zunächst aus den vorhandenen Messwerten der Spaltzug-Schwellversuche die Isothermen gebildet. Hierfür werden die im Spaltzug-Schwellversuch ermittelten E-Moduln über die logarithmierten Frequenzen aufgetragen, siehe Bild 14. Aus den Isothermen wird anschließend die Hauptkurve für den untersuchten Asphalt ermittelt. Dies geschieht über eine Verschiebung der Isothermen über den Faktor  $\alpha_T$ , der nach dem Berechnungsansatz von Arrhenius wie folgt zu bestimmen ist:

$$\log \alpha_T = \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (9)$$

Hierbei ist  $\alpha_T$  der Verschiebungsfaktor,  $T$  die Temperatur für den gesuchten E-Modul und  $T_0$  die Referenztemperatur, die mit  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  angenommen werden darf. Im Regelfall darf der Faktor  $E_a/R$  mit  $25.000$  angesetzt werden. Zur Bestimmung der Verschiebungsfaktoren für die Hauptkurve wird für jede untersuchte Temperatur der Verschiebungsfaktor  $\alpha_T$  bestimmt, indem für die Temperatur  $T$  die Temperatur, bei der der E-Modul bestimmt wurde, eingesetzt wird. Nach der Bestimmung der Verschiebungsfaktoren lassen sich die bei unterschiedlichen Temperaturen und Frequenzen ermittelten E-Moduln in einem Diagramm zur Bestimmung der Hauptkurve auftragen, siehe Bild 15. Die in der Hauptkurve aufgetragenen Messwerte lassen sich durch die in Gleichung (10) dargestellte Funktion approximieren:

$$|E| = y_0 + \frac{W}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{z}\right)}} \quad (10)$$

Durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate werden die Parameter  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $w$  und  $z$  bestimmt, wobei  $x_0$  und  $y_0$  die Schnittpunkte der Kurve mit der x-Achse bzw. mit der y-Achse darstellen. Die Parameter  $w$  und  $z$  sind Materialparameter,  $E$  und  $x$  sind die Messwerte der verschobenen Isothermen, wobei gilt:

$$x = \log(\alpha_T \cdot f) \quad (11)$$

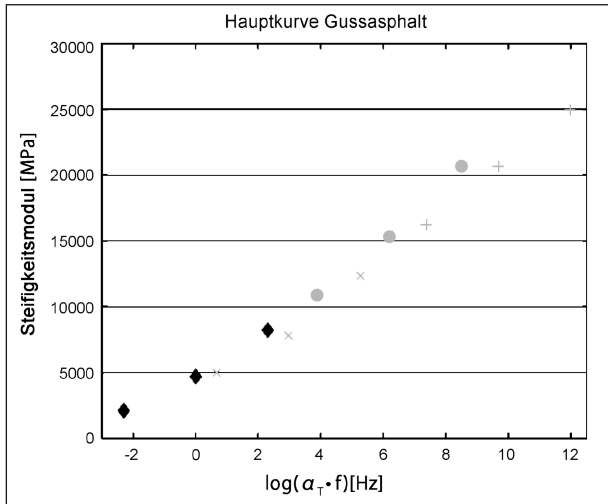


Bild 15: Verschobene Messwerte zur Bestimmung der Hauptkurve

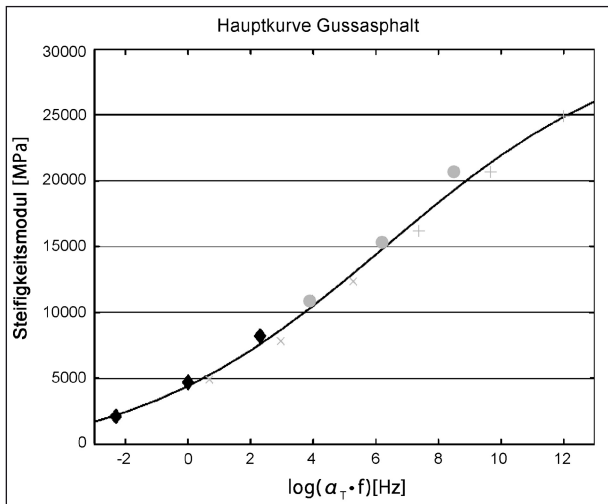


Bild 16: Hauptkurve des untersuchten Gussasphaltes

Für den Faktor  $f$  ist die jeweilige Frequenz einzusetzen, mit welcher der E-Modul ermittelt wurde. Mit der so ermittelten Hauptkurve lassen sich weitere E-Moduln für nicht untersuchte Temperaturen und Frequenzen bestimmen, indem zunächst in Abhängigkeit für die zu berechnende Temperatur ein Verschiebungsfaktor  $\alpha_T$  nach Gleichung (9) berechnet wird. Anschließend wird für die auszuwertende Frequenz mithilfe von Gleichung (10) der entsprechende E-Modul berechnet, indem  $x$  nach Gleichung (11) berechnet wird. Die aus den Messwerten der Spaltzug-Schwellversuche ermittelte Hauptkurve des untersuchten Gussasphalts ist in Bild 16 dargestellt.

Mithilfe der Hauptkurve wurden zusätzlich zu den bei  $-10\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ ,  $10\text{ °C}$  und  $20\text{ °C}$  im Spaltzug-Schwellversuch ermittelten E-Moduln, die E-Moduln bei  $-20\text{ °C}$ ,  $15\text{ °C}$ ,  $35\text{ °C}$  und  $50\text{ °C}$  berechnet, siehe Tabelle 5. Hierbei ist darauf zu achten, dass für den berechneten E-Moduln bei  $50\text{ °C}$  die in Gleichung (12) angegebene Mindeststeifigkeit einzuhalten ist.

$$|E_{T=50}| = 0,5 \frac{|E_{T=35}|}{|E_{T=20}|} \cdot |E_{T=35}| \quad [\text{MPa}] \quad (12)$$

Für den Fall, dass der nach Gleichung (10) berechnete E-Modul für  $50\text{ °C}$  kleiner ist als die Mindeststeifigkeit nach Gleichung (12), ist die Mindeststeifigkeit anzusetzen.

### 3.2.10 Zusätzliche Spaltzug-Schwellversuche

Zusätzlich zu dem geplanten Versuchsprogramm wurden Spaltzug-Schwellversuche bei  $40\text{ °C}$  durchgeführt, um das Verhalten bei höheren Temperaturen zu berücksichtigen. Die mit Bioharz verfüllten HANV-Prüfkörper wiesen bei  $40\text{ °C}$  so große Verformungen auf, dass eine Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche nicht möglich war. Die Gussasphalt- und HANV-Epoxydharz-Prüfkörper konnten nur eingeschränkt geprüft werden, da die elastischen Anfangsdehnungen nur verein-

| Temperatur \ Frequenz | Experimentell ermittelte E-Moduln |        |        |       | Extrapolierte E-Moduln |        |       |       |
|-----------------------|-----------------------------------|--------|--------|-------|------------------------|--------|-------|-------|
|                       | -10 °C                            | 0 °C   | 10 °C  | 20 °C | -20 °C                 | 15 °C  | 35 °C | 50 °C |
| 10 Hz                 | 24.906                            | 20.693 | 12.346 | 8.217 | 28.393                 | 10.027 | 2.519 | 386   |
| 1 Hz                  | 20.662                            | 15.343 | 7.787  | 4.691 | 26.490                 | 6.264  | 967   | 390   |
| 0,1 Hz                | 16.197                            | 10.902 | 4.930  | 2.104 | 23.675                 | 3.463  | 8,06  | 799   |

Tab. 5: Experimentell ermittelte und zusätzlich extrapolierte E-Moduln in  $[\text{N}/\text{mm}^2]$



**Bild 17:** Gerissener und verformter Prüfkörper

zelt im geforderten Bereich lagen. Zudem waren vereinzelt Eindrückungen der Lasteinleitungsschienen und Risse in den Prüfkörpern zu erkennen, siehe Bild 17. Eine weitere Verringerung der Oberspannung zum Erreichen der geforderten elastischen Anfangsdehnung war versuchs-technisch nicht möglich. Demzufolge konnten keine Steifigkeiten bei 40 °C für die verschiedenen Baustoffe versuchstechnisch ermittelt werden.

Der Gussasphalt zeigte während der Spaltzug-Schwellversuche bei 40 °C eine größere Verformungs- und Rissanfälligkeit als der mit Epoxidharz verfüllte HANV-Prüfkörper. Die Verformung und Rissbildung setzte beim Gussasphalt schon bei niedrigeren Lasten als beim Epoxidharz ein. Aus diesem Grund wird auf Stahlbrücken kein vollständiger Verbund zwischen Deckblech und Gussasphalt hergestellt. Ein vollständiger Verbund zwischen Deckblech und HANV-Epoxidharz kann aufgrund der geringeren Verformungs- und Rissanfälligkeit des HANV-Epoxidharz, möglicherweise auch ohne die Gefahr einer Rissbildung, hergestellt werden. Ein vollständiger Verbund zwischen Deckblech und HANV-Epoxidharz würde zu einer Steigerung der mittragenden Wirkung führen. Ob der Verbund zwischen Deckblech und HANV-Epoxidharz die Gefahr einer Rissbildung verringert bzw. die mittragende Wirkung gesteigert werden kann, wurde anhand der geplanten Bauteilversuche untersucht, siehe Kapitel 5.

Die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche zeigen, dass die geprüften HANV-Varianten bei allen geprüften Temperaturen und Frequenzen einen deutlich niedrigeren E-Modul als der Referenzasphalt (Gussasphalt) aufweisen. Da

| Temperatur [°C] | Bioharzsorte | Frequenz [Hz] | E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] | Abweichung zum Gussasphalt |
|-----------------|--------------|---------------|------------------------------|----------------------------|
| 20              | A            | 10            | 1.019                        | -88 %                      |
|                 |              | 1             | 689                          | -85 %                      |
|                 |              | 0,1           | 674                          | -68 %                      |
|                 | B            | 10            | 491                          | -94 %                      |
|                 |              | 1             | 400                          | -91 %                      |
|                 |              | 0,1           | 465                          | -78 %                      |
|                 | C            | 10            | 1.069                        | -87 %                      |
|                 |              | 1             | 651                          | -86 %                      |
|                 |              | 0,1           | 722                          | -66 %                      |
|                 | D            | 10            | 366                          | -96 %                      |
|                 |              | 1             | 301                          | -94 %                      |
|                 |              | 0,1           | 300                          | -86 %                      |

**Tab. 6:** Ermittelte E-Moduln für Polymerbeton

HANV-Varianten schon auf hochbelasteten Straßen eingesetzt werden und dort eine höhere Tragfähigkeit gegenüber herkömmlichem Gussasphalt aufweisen, scheint der Spaltzug-Schwellversuch nicht geeignet zu sein, um den E-Modul von verfüllten Asphalten zu bestimmen.

Da die Spaltzug-Schwellversuche zunächst keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferten, wurden zusätzlich zu den ursprünglich geplanten HANV-Varianten auch Polymerbetone mit dem Spaltzug-Schwellversuch geprüft. Die geprüften Polymerbetone bestehen aus einem Gemisch aus Gesteinskörnung und Bioharz. Gegenüber der untersuchten Bioharz-HANV-Variante ist im Polymerbeton kein Bitumen enthalten, weswegen erwartet wurde, dass Polymerbeton einen deutlich höheren E-Modul gegenüber den untersuchten HANV-Varianten und dem Referenzgussasphalt aufweist.

Insgesamt wurden vier unterschiedliche Polymerbetone mit unterschiedlichen Bioharzsorten (A-D) bei einer Temperatur von 20 °C mit drei Frequenzen geprüft. Die ermittelten E-Moduln der Polymerbetone sind in Abhängigkeit von der Frequenz in Tabelle 6 zusammengestellt. Zusätzlich zu den ermittelten E-Moduln sind auch die prozentualen Abweichungen zwischen den E-Moduln des Polymerbetons und denen des Gussasphaltes dargestellt. Die Ergebnisse der Polymerbeton-

Prüfkörper liegen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz zwischen  $300 \text{ N/mm}^2$  und  $1.100 \text{ N/mm}^2$ . Der E-Modul des Polymerbetons ist bei allen geprüften Bioharzsorten und Frequenzen kleiner als der E-Modul des geprüften Gussasphaltes. Die Abweichungen zwischen den E-Moduln des Gussasphaltes und denen des Polymerbetons liegen zwischen 66 % und 96 %. Eine Abhängigkeit der Abweichungen von den Prüffrequenzen kann nicht festgestellt werden. Da auch die Prüfkörper aus Polymerbeton, in denen kein weiches Bitumen mehr enthalten ist, deutlich niedrigere E-Moduln aufweisen als der Referenzgussasphalt, wird die Vermutung bestätigt, dass die Ursache hierfür im Spaltzug-Schwellversuch selbst und nicht in den untersuchten Varianten zu suchen ist.

### 3.3 Ermittlung des Tieftemperaturverhaltens

#### 3.3.1 Allgemeines

Das Tieftemperaturverhalten von Asphalten wird durch die Überlagerung der Ergebnisse aus Zugversuchen bei verschiedenen Versuchstemperaturen sowie aus Abkühlversuchen angesprochen. Hierzu werden die ermittelten Zugfestigkeiten der Zugversuche den aufgezeigten kryogenen Spannungen (thermisch induzierte Zugspannungen) des Abkühlversuchs gegenübergestellt und temperaturabhängige Zugfestigkeitsreserven ermittelt. Die Zugfestigkeitsreserve ist die Differenz zwischen der oberhalb der Bruchtemperatur ermittelten kryogenen Spannung und der Zugfestigkeit. Die Zugfestigkeitsreserve ist somit als die Spannungsreserve zu verstehen, die zusätzlich durch den Verkehr verursacht werden kann, ohne dass es zur Rissbildung kommt.

Die Abkühlversuche und einaxialen Zugversuche wurden an der Bundesanstalt für Straßenwesen gemäß dem technischen Regelwerk durchgeführt.

Mit dem Abkühlversuch wird die Beanspruchung von Asphalten bei witterungsbedingten negativen Temperaturänderungen simuliert. Dabei wird ein an Adapter geklebter, prismatischer Prüfkörper der Länge nach in die Prüfeinrichtung eingespannt und einer vorgegebenen Abkühlrate ausgesetzt.

Beim einaxialen Zugversuch wird ein Prüfkörper bei einer konstanten Temperatur mit konstanter Geschwindigkeit so lange auseinandergezogen, bis er reißt. Die Ergebnisse sind die Zugfestigkeit (maximale Spannung) und die korrespondierende Bruchdehnung bei der entsprechenden Prüftemperatur.

Die erhaltenen Ergebnisse werden bei der Wahl der Prüftemperatur der Bauteilversuche berücksichtigt.

#### 3.3.2 Prüfkörperherstellung/-vorbereitung

Die in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Prüfkörper wiesen Abmessungen von  $40 \times 40 \times 160$  [mm] auf. Sie wurden durch Sägen aus im Labor hergestellten Asphaltplatten herausgetrennt. Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen aufgestellt, wobei eine Versuchsreihe die Mittelwertfunktion aus drei Einzelversuchen kennzeichnet.

Nach einer gründlichen Reinigung der erhaltenen Prüfkörper vom Sägeschmutz wurden an allen Prüfkörpern die Raumdichte nach DIN EN 12697 Teil 6 [DIN 12697-6] bestimmt. Die Prüfkörper wurden bis zur Massekonstanz in einem abgedunkelten Raum getrocknet. Anschließend erfolgte die Bestimmung der genauen Prüfkörperabmessungen nach DIN EN 12697 Teil 29 [DIN 12697-29].

#### 3.3.3 Versuchsdurchführung – Abkühlversuch

Die Prüfkörper wurden im Asphaltlabor der Bundesanstalt für Straßenwesen mit einer Abkühlrate von  $10 \text{ K/h}$  geprüft. Während des Abkühlvorgangs wurde die Prüfkörperlänge konstant gehalten. Durch die Messung der Prüfkörperlänge über temperaturindifferente Messbasen kann die Temperaturdehnung des Prüfrahmens von einem Schrittmotor ausgeglichen werden. Durch den behindertenthermischen Schrumpf werden im Prüfkörper abkühlungsbedingte – sogenannte kryogene – Zugspannungen induziert. Erreichen die kryogenen Zugspannungen die Zugfestigkeit des Prüfkörpers, kommt es zum Bruch. Als Ergebnis des Versuches werden die kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur sowie die erreichte Bruchtemperatur und die Bruchspannung ausgegeben.

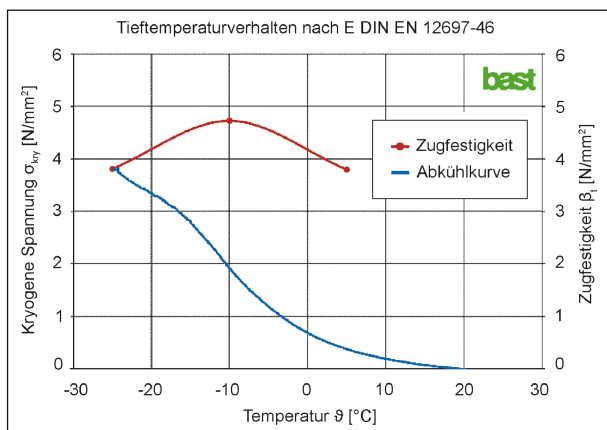


### 3.3.4 Versuchsdurchführung – Einaxialer Zugversuch

Nachdem der Prüfkörper die erforderliche Prüftemperatur erreicht hat, wird er mit einer konstanten Dehngeschwindigkeit auseinandergezogen. Diese Dehngeschwindigkeit entspricht bei Prüfkörpern mit einer Ausgangslänge von 160 mm einer Ziehgeschwindigkeit von 1 mm/min. Die einaxialen Zugversuche werden bei den Prüftemperaturen -25 °C, -10 °C und 5 °C durchgeführt. Während des einaxialen Zugversuchs werden die Prüfkörperlänge und die axiale Kraft gemessen. Der Versuch wird beendet, wenn der Prüfkörper in zwei Teile zerbricht oder die gemessene Kraft nach Durchlaufen eines Maximalwertes abnimmt.

### 3.3.5 Versuchsergebnisse

In Bild 18 sind die kryogenen Spannungen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt (Ergebnisse der Abkühlversuche siehe blaue Linie). Bei den Prüftemperaturen 5 °C, -10 °C und -25 °C wurden ebenfalls einaxiale Zugversuche durchgeführt und mithilfe einer Spline-Interpolation verbunden (siehe rote Linie). Der Bereich zwischen den beiden „Funktionsgraphen“ charakterisiert die Zugfestigkeitsreserve. Im Temperaturbereich von ca. 10 °C bis -5 °C können von der Asphaltvariante HANV-Epoxidharz noch große mechanische Beanspruchungen schadfrei aufgenommen werden. Anhand dieser Ergebnisse wurde für die Bauteilversuche die Prüftemperatur auf -5 °C festgelegt, um das „Systemverhalten“ bei tiefen Temperaturen zu untersuchen. Bei Temperaturen ab/über 15 °C können von Asphalten bedingt durch die viskoelastischen Materialeigenschaften des Bindemittel Bitumens nur sehr geringe Zugspannungen aufge-



**Bild 18:** Ergebnisse Tieftemperaturverhalten (HANV-Epoxidharz)

nommen werden. Demzufolge nehmen bei hohen Temperaturen die Zugfestigkeiten für Asphalte (gilt ebenso für die Variante HANV-Epoxidharz) ab und somit verringert sich auch die Zugfestigkeitsreserve. Daher sind auch, um die Verformungsbeständigkeit des „Systems“ zu überprüfen, die Bauteilversuche bei den Prüftemperaturen 20 °C und 50 °C durchgeführt worden.

## 4 Numerische Untersuchungen

### 4.1 Allgemeines

Der numerische Nachweis der mittragenden Wirkung des modifizierten Asphalts ist über die Spannungsreduzierung an der Unterkante des Deckblechs zu führen. Die Einflüsse unterschiedlicher Belagssteifigkeiten und Verbundeigenschaften zwischen Fahrbahnbelag und Deckblech auf die Spannungen an der Unterkante des Deckblechs wurden mithilfe von numerischen Finite-Elemente-Berechnungen untersucht. Hierzu wurden zwei 3D-Finite-Elemente-Modelle einer orthotropen Fahrbahnplatte in Anlehnung an den Querschnitt der Brücke Duisburg-Neuenkamp, siehe auch [PET 2004], mit dem Finite-Elemente-Programm Ansys [ANS 2010] erzeugt:

- (1) 3D-FE-Modell aus Schalenelementen,
- (2) 3D-FE-Modell aus Schalenelementen sowie Volumenelementen zur Abbildung des Deckblechs.

Modell (1) diente zur Kalibrierung eines Mehrschichtensystems, mit dessen Hilfe eine erste Beurteilung der mittragenden Wirkung der zu untersuchenden Varianten erfolgen sollte. Die Mehrschichtentheorie setzt voraus, dass alle Schichten einer Straßenbefestigung homogen, isotrop, linear-elastisch, masselos und seitlich unendlich ausgedehnt sind. Die unterste Schicht des Mehrschichtensystems ist zudem unendlich dick (Halbraum). Die mit der Mehrschichtentheorie berechneten Beanspruchungsgrößen sind mit denen in der Straßenbefestigung gemessenen Beanspruchungsgrößen ausreichend genau verifizierbar [STR 2009]. Mit der Mehrschichtentheorie ist die Berechnung der Beanspruchungsgrößen für jede beliebige Position (x-, y-, und z-Richtung) eines Mehrschichtensystems möglich. Für Mehrschichtenrechnungen werden die Eingabegrößen Anzahl der Schichten, E-Modul der Schicht, Querdehnzahl

der Schicht, Dicke der Schicht, Radius der Reifen-aufstandsfläche und der Reifenkontaktdruck benötigt. Die Berechnung der Beanspruchungsgrößen nach der Mehrschichtentheorie für die verschiedenen Konstruktionsaufbauten und den versuchs-technisch ermittelten Baustoffeigenschaften erfolgt mithilfe des Programms BISAR (Bitumen Structure Analysis in Roads) [BIS 1992].

Während der Bearbeitung des Forschungs- und Entwicklungsprojektes wurde, gestützt durch erste „Tastversuche“, erkannt, dass für einen EDV-gestützten Nachweis der mittragenden Wirkung von Belagsvarianten auf orthotropen Fahrbahnplatten die Verwendung der Mehrschichtentheorie und deren Ergebnisse nicht das geeignetste Verfahren ist. Daher sind die Ergebnisse der Berechnungen sowie weiterführende Informationen zur Mehrschichtentheorie im Anhang B in den Anlagen dargestellt.

Modell (2) diente als Grundlage zur Simulation von unterschiedlichen Belagsvarianten auf dem Stahl-deckblech.

## 4.2 Referenzsystem

### 4.2.1 Geometrische Abmessungen

Als Referenzsystem für alle numerischen Untersuchungen dient der Querschnitt der Brücke Duisburg-Neuenkamp, welcher bereits bei [PET 2004] verwendet wurde.

Bei der Rheinbrücke Duisburg-Neuenkamp handelt es sich um eine sechsstreifige Autobahnbrücke, bei der auf der einen Seite ein Gehweg und auf der anderen Seite ein Radweg angeordnet ist. Der Querschnitt der Brücke ist in Bild 19 dargestellt.

Die Brücke hat eine Stromöffnung von 350 m und wurde als Mittelträger-Schrägseilbrücke erbaut. Der Hauptträger ist ein zweizelliger Hohlkasten mit einer Breite von 12,0 m und einer Höhe von 3,70 m. Die orthotrope Platte besteht aus einem 12 mm dicken Deckblech und Sektkelchprofilen. In Querrichtung wird die orthotrope Platte mittels außen-liegender Schrägstreben unterstützt, siehe Bild 19.

Das Finite-Elemente-Modell besteht aus einem Ausschnitt der orthotropen Platte, siehe Bild 20. Das Modell hat folgende Abmessungen:

Querrichtung: In Querrichtung wird die orthotrope Platte zwischen zwei Längsträgern simuliert. Der Abstand beträgt  $l_y = 8,06$  m.

Längsrichtung: In Längsrichtung werden insgesamt neun Querträger mit einem Querträgerabstand von 2,5 m simuliert. Die Gesamtlänge beträgt  $l_x = 20$  m.

Mittlere Höhe: Die mittlere Höhe ergibt sich aus der Höhe der Querträger und beträgt  $h_z = 0,677$  m.

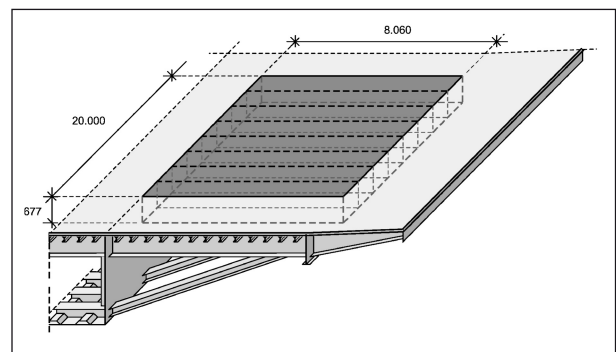


Bild 20: Abmessungen des FE-Modells [PET 2004]

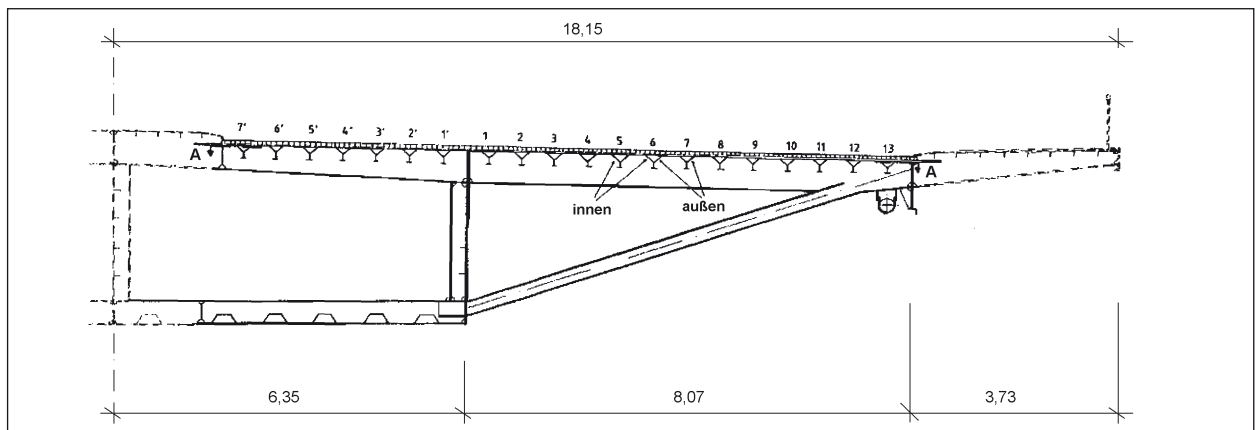


Bild 19: Querschnitt der Brücke Duisburg-Neuenkamp [PET 2004]

Als E-Modul für Stahl werden  $210.000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt, die Querkontraktionszahl wird mit  $\nu = 0,3$  berücksichtigt. Die Blechdicken wurden gemäß [PET 2004] wie folgt gewählt:

1. Deckblech: 12 mm,
2. Kelchbleche: 6 mm,
3. Steg unterhalb des Kelches: 7,5 mm,
4. Flansch unterhalb des Kelches: 9 mm,
5. Steg des Querträgers: 8 mm,
6. Flansch des Querträgers: 12 mm,
7. Steg des Hauptträgers: 10 mm.

#### 4.2.2 3D-Finite-Elemente-Modell

Die Finite-Elemente-Modelle (1) und (2) bestehen aus Schalenelementen, Typ „shell181“. Zur Abbildung des Deckblechs wurden im Modell (2) Volumenelemente, Typ „solsh190“, gewählt. Die im Programmpaket ANSYS enthaltenen Solsh-Elemente stellen eine Kombination aus Volumen- und Schalenelementen dar. Üblicherweise müssen Volumenkörper auch in Dickenrichtung mit mehreren Elementen vernetzt werden. Das ist vor allem dann problematisch, wenn Volumenkörper mit geringer Dicke berechnet werden sollen, da dadurch die Elementkantenlänge in Dickenrichtung sehr klein wird. Bei einer optimalen Vernetzung bilden die Finiten Elemente Würfel ab, das heißt, dass sie konstante Kantenlängen in alle Richtungen aufweisen. Für die Berechnung von dünnwandigen Volumen, wie beispielsweise das Stahldeckblech, sollte das Netz so fein gewählt werden, dass sich trotz der geringen Abmessung in Dickenrichtung Würfelemente ausbilden können. Dies hat allerdings zur Folge, dass Rechen- und Speicherkapazitäten unnötig beansprucht werden. Alternativ kann das Netz in der Ebene wie zuvor belassen werden und in Dickenrichtung eine andere Kantenlänge gewählt werden. Dies hat wiederum zur Folge, dass die Elemente bereits zu Beginn der Berechnung sehr verzerrt ausgebildet werden, was sich negativ auf die Rechengenauigkeit auswirkt. Um dieser Problematik entgegen zu wirken, wurden Solsh-Elemente entwickelt. Das verwendete Element „Solsh190“ ist geometrisch betrachtet ein 8-knotiges Volumenelement, siehe Bild 21, welches wie ein Schalenelement genutzt werden kann. Das heißt, dass sich das Element vor

allem für die Berechnung von dünnwandigen Volumen eignet, da es nicht erforderlich ist, mehrere Elemente in Dickenrichtung anzuordnen. Somit lassen sich das im Verhältnis zu den übrigen Abmessungen dünne Stahlblech sowie der Asphaltbelag mit Volumenelementen abbilden, ohne dass die Rechengenauigkeit beeinträchtigt oder unnötige Rechen- und Speicherkapazitäten benötigt werden.

Die Lagerungsbedingungen wurden analog zu [PET 2004] wie folgt angesetzt:

Die Querträger an der linken Seite sind alle mit dem Hauptträger verbunden, weshalb diese alle in z-Richtung gehalten werden. Die Lagerung der Querträger auf der rechten Seite ergibt sich aus der Anordnung der Schrägstreben. Hier wird jeder zweite Querträger gehalten. Das Durchlaufen des Deckblechs wird durch Einspannungen an den drei inneren Rändern berücksichtigt, siehe Bild 22.

Die Belastung des Finite-Elemente-Modells erfolgte durch das Ermüdungslastmodell 3 nach [DIN 1991]. Das Ermüdungslastmodell besteht aus vier Achsen mit jeweils zwei Rädern mit einer Radaufstandsfläche von  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ . Die Achslast beträgt für jede Achse  $120 \text{ kN}$ . Für Modell (1) wurde die lastverteilende Wirkung des Fahrbahnbelags und des Deckblechs gemäß [DIN 1991] berücksichtigt.

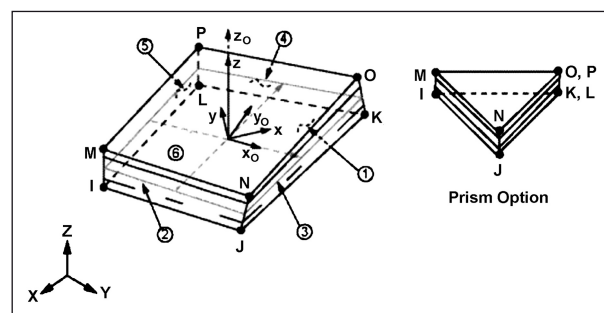


Bild 21: Element „Solsh190“

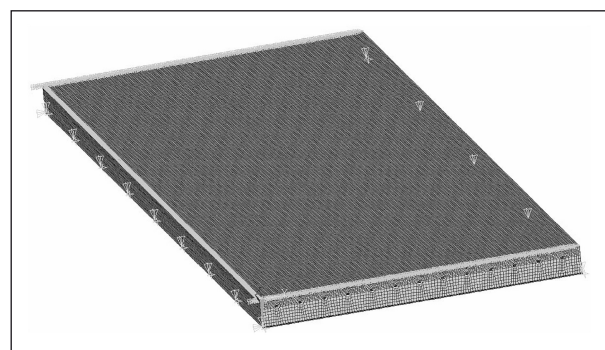


Bild 22: 3D-Finite-Elemente-Modell mit Lagerungsbedingungen

Die Belastungsfläche ergab sich demnach zu  $A = (400 + 2 \cdot 70 + 12)^2 = 552^2 \text{ mm}^2$  in der Mittelfläche des Deckblechs. Dies entspricht einer Flächenlast von  $p = 0,197 \text{ N/mm}^2$ . Da die Netzfeinheit keine Belastung auf ganze Millimeter zulässt, wird auf der sicheren Seite liegend eine Belastungsfläche von  $550 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$  angesetzt. Für Modell (2), bei dem der Fahrbahnbelag direkt mit modelliert wurde, wurde als Belastungsfläche die tatsächliche Radaufstandsfläche sowie die sich daraus ergebende Flächenlast verwendet.

In einem ersten Schritt konnten nun für verschiedene Laststellungen die maßgebenden Spannungen, Dehnungen und Verformungen berechnet werden. Diese Ergebnisse dienen als Referenzwerte für die Ergebnisse der Simulation der mittragenden Wirkung der unterschiedliche Belagsvarianten.

#### 4.2.3 Vernetzung des 3D-Finite-Elemente-Modells

Die maßgebenden Beanspruchungen für die Verbindung zwischen Deckblech und Längsrippen resultieren aus den lokalen Radlasten. Aus diesem Grund sind die Spannungen im Bereich der Lasteinleitung von besonderem Interesse. Zur Gewährleistung ausreichend genauer Ergebnisse bei gleichzeitig minimiertem Rechenaufwand wurde mit unterschiedlichen Vernetzungen des Deckblechs und der Längsrippen in Brückenlängsrichtung gearbeitet, siehe Bild 23. Zunächst wurde das gesamte Modell einheitlich grob vernetzt. Im nächsten Schritt wurde das Netz über die gesamte Breite der Fahrbahn im Bereich der Lasteinleitung verfeinert. Hierfür wurde das vorhandene Netz auf einer Länge von jeweils  $1.000 \text{ mm}$  vor und hinter jeder Achse durch ein feineres Netz ersetzt. Da die Achsen 1 und 2 sowie 3 und 4 untereinander jeweils einen

Abstand  $1,20 \text{ m}$  aufweisen, überschneidet sich die Verfeinerung an diesen Stellen, sodass sich eine einheitliche Netzverfeinerung auf einer Länge von insgesamt  $3,20 \text{ m}$  um die Achsen 1 und 2 bzw. 3 und 4 ergibt, siehe Bild 23. Anschließend wurde eine quadratische Fläche mit den Abmessungen  $1.000 \text{ mm} \times 1.000 \text{ mm}$  um jede einzelne Radlast herum weiter verfeinert. Vergleichsrechnungen ergaben, dass eine Kantenlänge von  $1.000 \text{ mm}$  ausreichend ist, da die maximalen lokalen Spannungen und Verformungen alle innerhalb dieses Bereiches auftraten.

Werden bei einer Berechnung verschiedene Elementtypen verwendet (Schalen- und Solidelemente), so ist zu beachten, dass Schalen- und Volumenelemente unterschiedliche Freiheitsgrade aufweisen. Während Schalenelemente sowohl Verschiebungs- als auch Verdrehungsfreiheitsgrade aufweisen, stehen bei Volumenelementen nur Verschiebungsfreiheitsgrade zur Verfügung, siehe Bild 24. Biegeverformungen werden nicht wie bei Schalenelementen durch Knotenverdrehungen, sondern durch unterschiedliche Verschiebungen der Knoten

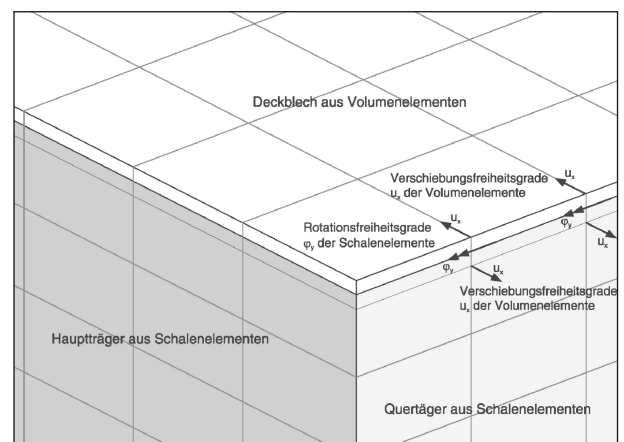


Bild 24: Kopplung der Freiheitsgrade

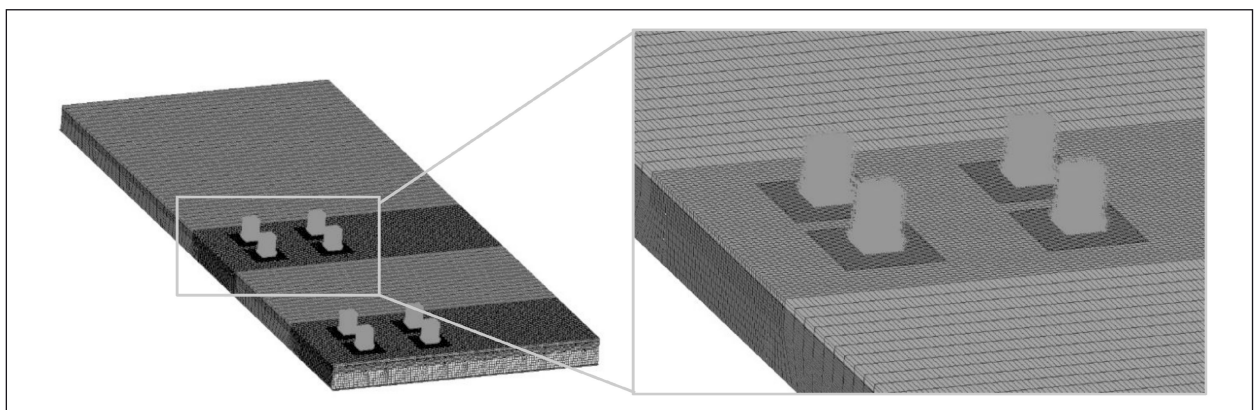


Bild 23: Vernetzung des 3D-Finite-Elemente-Modells



in Dickenrichtung abgebildet. Aus diesem Grund sind bei einer Kombination von Schalen- mit Volumenelementen die Rotationsfreiheitsgrade der Schalenelemente mit den Verschiebungsfreiheitsgraden der Volumenelemente zu koppeln, siehe Bild 24.

### 4.3 Numerischer Nachweis der mittragenden Wirkung des Asphalts

Zum numerischen Nachweis der mittragenden Wirkung des Asphalts wurden zunächst Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen an der Unterkante des Deckblechs des oben genannten Referenzsystems berechnet, indem nur die lastverteilende Wirkung des Asphalts angesetzt wird. Hierzu wird die Radlast auf eine Fläche aufgebracht, die sich aus der Radaufstandsfläche (40 cm x 40 cm) zusätzlich des Anteils, der sich aus der Lastverteilung unter einem Winkel von 45° über die Höhe des Asphalts und der halben Deckblechdicke ergibt. Der Nachweis der mittragenden Wirkung des Asphalts gliederte sich ursprünglich in die drei folgenden Schritte:

- (1) Zunächst sollten mithilfe der Spaltzug-Schwellversuchen ermittelten E-Moduln als Eingangsparameter für die Berechnung nach der Mehrschichtentheorie dienen, siehe Anhang B.
- (2) Die Berechnungen nach der Mehrschichtentheorie sollten Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen an der Unterkante des Asphalts liefern, die als Belastung auf das Deckblech des FE-Modells aufgebracht werden sollten.
- (3) Infolge dieser Belastung sollten am FE-Modell Spannungen und Dehnungen an der Unterkante des Deckblechs berechnet werden, worüber die mittragende Wirkung des Asphalts hätte bewertet werden können.

Da die durchgeführten Spaltzug-Schwellversuche allerdings keine verwertbaren E-Moduln für die HANV-Varianten geliefert haben und für diese Asphaltvarianten die Durchführung von Spaltzug-Schwellversuchen prinzipiell infrage zu stellen ist, konnten nur prinzipielle Berechnungen nach der Mehrschichtentheorie mit fiktiven E-Moduln durchgeführt werden.

Wie in Anhang B dargestellt, wurde das 3D-Finite-Elemente-Modell (1) zunächst genutzt, um einen

äquivalenten E-Modul für das Mehrschichtenmodell zu bestimmen.

Mithilfe des Finiten-Elemente-Modells (2) wurden umfangreiche Parameterstudie zum Einfluss des E-Moduls des Fahrbahnbelags auf die Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Längsrippen und Deckblech unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verbundeigenschaften zwischen Fahrbahnbelag und Stahldeckblech unter Verwendung des Finite-Elemente-Modells durchgeführt.

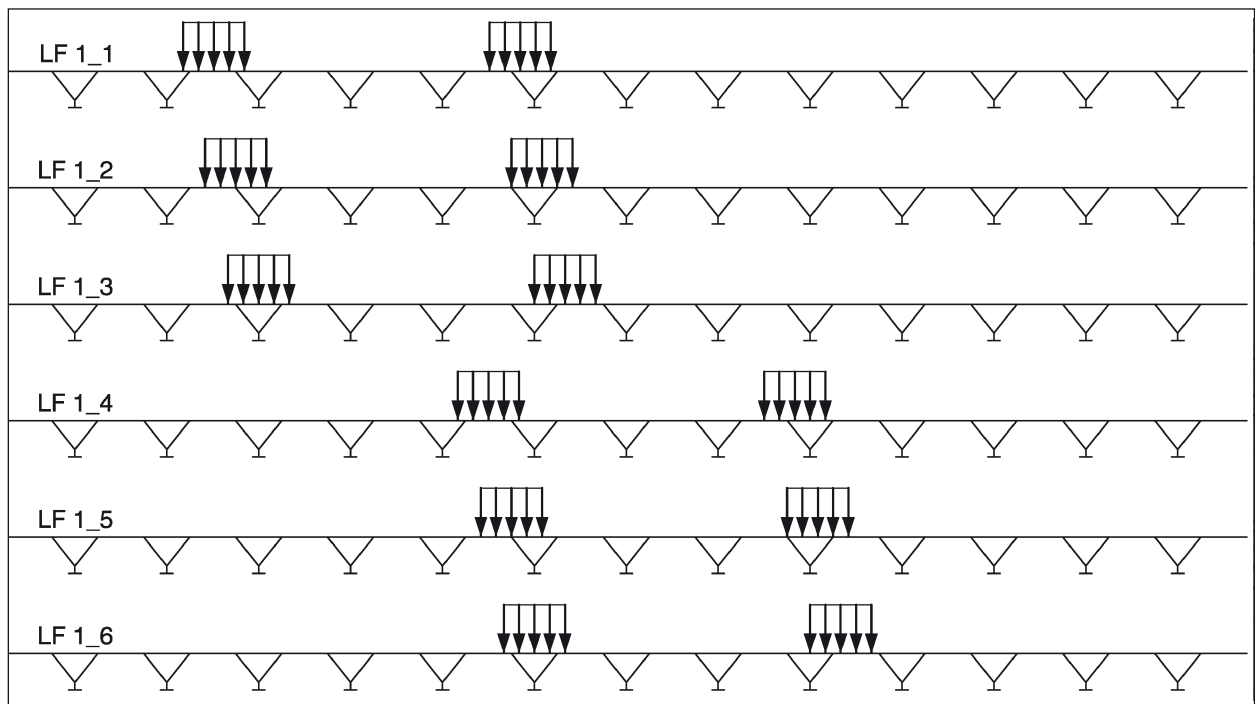
Ziel war die Ermittlung einer Mindeststeifigkeit des Asphaltfahrbahnbelags, sodass die Spannungen im Anschluss zwischen Deckblech und Längsrippen ausreichend reduziert werden. Zur Erfassung unterschiedlicher Verbindungen zwischen Stahldeckblech und Asphaltfahrbahnbelag wurde hierfür die Verbindung auf zwei verschiedene Weisen modelliert:

Modell 2.1: Eine Verbindung zwischen Stahldeckblech und Asphaltfahrbahnbelag mittels Kontaktelementen.

Modell 2.2: Berücksichtigung einer Pufferschicht durch ein zusätzliches Layer in den Volumenelementen.

In einem ersten Schritt wurden auf dem 8-feldrigen Gesamtsystem unterschiedliche Laststellungen in Längs- und Querrichtung untersucht, um so die ungünstigste Laststellung für die lokalen Beanspruchungen zu ermitteln. Hierbei wurden jeweils sechs Laststellungen in Querrichtung mit sechs Laststellungen in Längsrichtung kombiniert, sodass die Berechnungen in der Summe mit 36 verschiedenen Laststellungen durchgeführt wurden. Die Laststellungen wurden so gewählt, dass jeweils die linke Achse des Ermüdungslastmodells einmal genau in der Mitte zwischen den Stegen einer Längsrippe angeordnet wurde, einmal zentrisch über einem Rippensteg und einmal zentrisch zwischen zwei Längsrippen. Diese drei unterschiedlichen Laststellungen in Querrichtung wurden je einmal am seitlichen Rand und einmal in der Mitte des Brückenquerschnitts aufgebracht, sodass sich in der Summe sechs Laststellungen in Querrichtung ergaben (siehe Bild 25).

In Längsrichtung wurde die erste Laststellung so gewählt, dass der Schwerpunkt der vorderen beiden Achsen in Feldmitte des dritten Feldes liegt. Nach der Berechnung der sechs Laststellungen in Querrichtung wurde das Lastmodell um 1.000 mm in Längsrichtung verschoben.

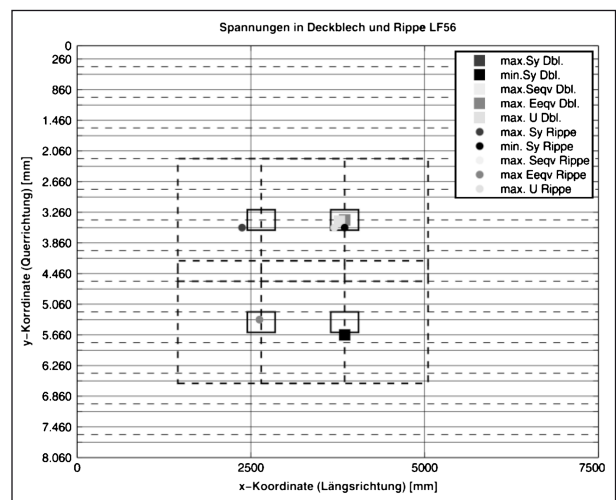


**Bild 25:** Laststellungen in Querrichtung

In einem zweiten Schritt wurden die Laststellungen an einem auf drei Felder reduzierten System untersucht, mit dessen Hilfe die infolge der notwendigen Freiheitsgradkopplung und der Verwendung von Kontaktelementen sehr groß werdende Rechen- und Speicherkapazität vermindert werden konnte. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Berechnungen am reduzierten System ausreichen, um die lokalen Spannungen infolge der örtlichen Lasteinleitung abzubilden.

Die Finite-Elemente-Berechnungen wurden mithilfe einer MATLAB-Routine ausgewertet. Aus den ANSYS-Berechnungen wurden für jeden Lastfall die maximalen Spannungen sowie die Knotenkoordinaten des jeweils maximal beanspruchten Knotens ausgelesen. Innerhalb der MATLAB-Routine wurden die Ergebnisse aus allen Lastfällen eingelesen, zur Kontrolle die jeweiligen maximalen Spannungen und die zugehörige Laststellung geplottet sowie die insgesamt maximalen Spannungen mit den zugehörigen Lastfällen ausgegeben.

Bild 26 zeigt einen exemplarischen MATLAB-Plot. Die horizontalen, durchgehenden Linien stellen die jeweiligen Längsrippenstege dar, die gestrichelten Linien den gemeinsam Steg des Sektkelchprofils. Die durchgehenden Rechtecke kennzeichnen die aktuelle Stellung des Lastmodells auf dem Brückenquerschnitt. Da die lokalen Spannungen infolge der Lasteinleitung von besonderem Interesse



**Bild 26:** Auswertung der Finite Elemente Berechnungen

sind, wurde der Auswertungsbereich, wie auch der Bereich der Feinvernetzung, begrenzt. Die Grenzen des Auswertungsbereiches sind durch die dickeren gestrichelten Linien gekennzeichnet. Der Plot stellt für jeden einzelnen Lastfall die Lage des Lastmodells sowie die Lage der maximalen Spannungen dar, wobei einmal allgemein die Spannungen an der Unterkante des Deckblechs und einmal die Spannungen in den Verbindungen zwischen Längsrippe und Deckblech ausgelesen wurden. Die Spannungen in den Verbindungen zwischen Deckblech und Längsrippen wurden durch die Auswertung der obersten Knoten in den Längsrippen

bestimmt. Eine Modellierung der Schweißnähte wurde nicht vorgenommen.

Anhand der Ergebnisse der Berechnungen an den beiden unterschiedlich großen Systemen konnte gezeigt werden, dass sich die lokalen Spannungen auch durch das reduzierte System abbilden lassen, sodass für die weiterführenden Berechnungen das dreifeldrige System verwendet wurde.

### 4.3.1 Einfluss des E-Moduls des Asphaltfahrbahnbelags auf die Spannungen im Anschluss Längsrippen-Deckblech

#### Allgemeines

Nachdem die ungünstigsten Laststellungen und damit die maßgebenden Spannungen bestimmt wurden, wurde eine Parameterstudie zum Einfluss des E-Moduls auf die Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Längsrippen und Deckblech durchgeführt, bei der der E-Modul des Asphaltfahrbahnbelags variiert wurde. Hierbei wurden insgesamt 35 Lastfälle untersucht, wobei der E-Modul schrittweise von 300 N/mm<sup>2</sup> auf 17.000 N/mm<sup>2</sup> erhöht wurde. Da die maximalen Spannungen primär aus der lokalen Lasteinleitung resultieren, wurde bei der Auswertung das Hauptaugenmerk auf die Querspannung  $\sigma_y$  sowie die Vergleichsspannung

$\sigma_{eqv}$  gelegt. Um die Auswirkung des steiferen Asphaltes auf die Spannungen im Anschluss zwischen Längsrippen und Deckblech zu bewerten, wurden zunächst die maximalen Spannungen für den E-Modul des Asphaltes von  $E = 300 \text{ N/mm}^2$  ausgelesen. Neben den Spannungen wurden auch die Knotennummern sowie die Koordinaten des jeweils maximal beanspruchten Knotens ausgelesen, siehe exemplarisch Bild 27. Bei den weiteren Berechnungen mit steigendem E-Modul wurden jeweils nur die Spannungen an den zuvor bestimmten, maximal beanspruchten Knoten ausgewertet. Da sich die Lage der maximalen Spannungen durch eine erhöhte mittragende Wirkung verändern kann, lässt sich durch die beschriebene Vorgehensweise die Spannungsreduzierung infolge einer erhöhten mittragenden Wirkung direkt bestimmen.

#### Modell 2.1 – Verbindung mittels Kontaktelementen – ohne Pufferschicht

Das Finite-Elemente-Modell 2.1 wurde in einem ersten Schritt als ein 3D-Finite-Elemente-Modell aufgebaut, in dem der Asphaltfahrbahnbelag mittels Kontaktelementen mit dem Deckblech verbunden wird. Als Kontaktelemente wurden Elemente vom Typ „Conta173“ in Verbindungen mit den erforderlichen Targetelementen „Targe170“ verwendet, siehe Bild 28. Das verwendete Kontaktelementepaar stellt einen „surface to surface“-Kontakt her, das heißt, dass der Kontakt über einen Kontakt der Oberflächen und nicht über einen Kontakt der Knoten hergestellt wird. Dies hat den Vorteil, dass sich beide Kontaktflächen bzw. die beiden Schichten, die mithilfe der Kontaktelemente miteinander verbunden werden, gegeneinander verschieben können.

Der einzige Materialparameter der Kontaktelemente ist die Reibungszahl  $\mu$ , sodass mithilfe der

| Lastfall 6_4 hinten (LF 6_4_H) |          |          |         |         |          |        |
|--------------------------------|----------|----------|---------|---------|----------|--------|
| Knotennummer                   | x-Koord. | y-Koord. | maxSy   | maxSeqv | maxEeqv  | maxU   |
| Spannungen im Deckblech        |          |          |         |         |          |        |
| 66103                          | 5950     | 3110     | 43,744  | 38,18   | 1,82E-04 | 2,938  |
| 123983                         | 7175     | 2960     | -19,859 | 15,88   | 8,47E-05 | 2,5476 |
| 66103                          | 5950     | 3110     | 43,744  | 38,18   | 1,82E-04 | 2,938  |
| 66103                          | 5950     | 3110     | 43,744  | 38,18   | 1,82E-04 | 2,938  |
| 124508                         | 6075     | 3135     | 37,653  | 32,962  | 1,57E-04 | 2,9736 |
| Spannungen in den Rippen       |          |          |         |         |          |        |
| 77556                          | 6000     | 4460     | 1,238   | 2,838   | 1,35E-05 | 2,5165 |
| 74627                          | 6000     | 2960     | -4,609  | 12,765  | 6,09E-05 | 2,7442 |
| 125044                         | 7375     | 2960     | -0,781  | 44,574  | 2,12E-04 | 2,3739 |
| 125044                         | 7375     | 2960     | -0,781  | 44,574  | 2,12E-04 | 2,3739 |
| 75425                          | 6350     | 3260     | -1,129  | 8,381   | 3,99E-05 | 2,9162 |

Bild 27: Bestimmung der maximalen Spannungen

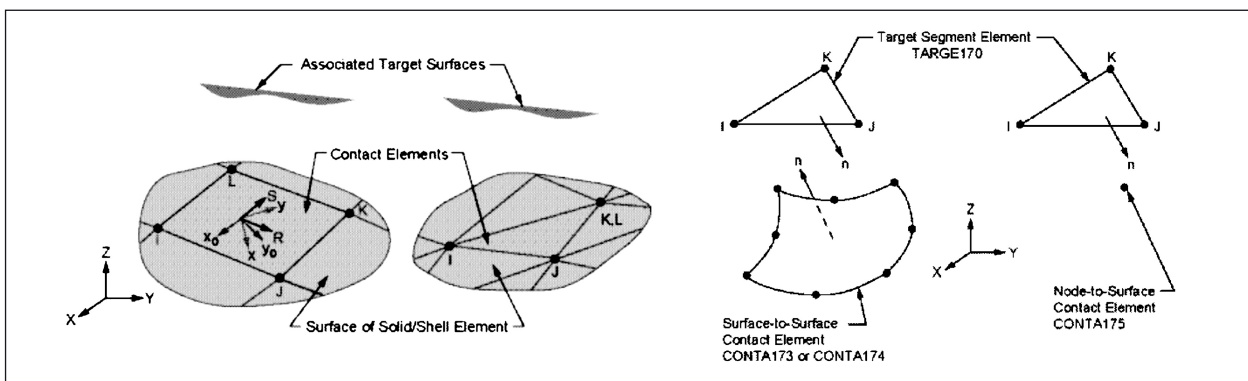


Bild 28: Verwendete Kontaktelemente

Kontaktelemente eine definierte Reibung zwischen Stahldeckblech und Asphaltfahrbahnbelag als Verbund zwischen diesen beiden Schichten simuliert werden kann. Da zum Zeitpunkt der Berechnungen keine Zahlenwerte über den Reibungswert zwischen Asphaltfahrbahnbelag und Stahldeckblech zur Verfügung standen, wurde der Reibbeiwert zunächst mit  $\mu = 0,3$  angenommen, was einer mittleren Reibungszahl von Stahl auf Stahl entspricht. Der Asphaltfahrbahnbelag wurde in zwei Schichten mit einer Schichtdicke von jeweils 35 mm abgebildet, um die Schutz- und Deckschicht einzeln abbilden zu können. In den vorliegenden Untersuchungen wurde für beide Schichten der gleiche E-Modul angesetzt. Eine Veränderung der Steifigkeit von nur einer Schicht ist damit bei zukünftigen Berechnungen möglich.

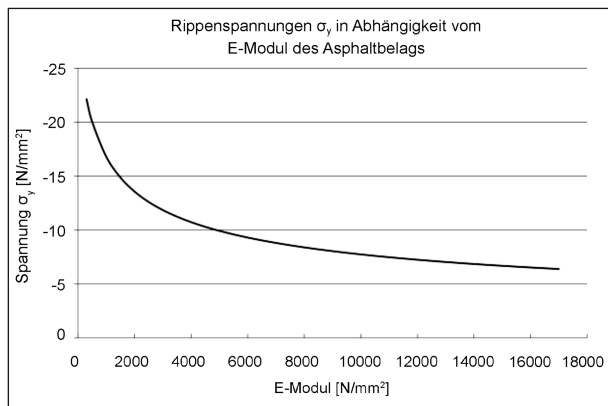
Die ungünstigsten Laststellungen wurden jeweils einmal für die minimale Querspannung  $\sigma_y$  und einmal für die maximale Vergleichsspannung  $\sigma_{\text{eqv}}$  für einen E-Modul von  $E = 300 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Diese beiden Laststellungen dienten als Grundlage für die Parameterstudie zum Einfluss des E-Moduls auf

die Spannungen im Bereich der Anschlüsse der Längsrippen an das Deckblech.

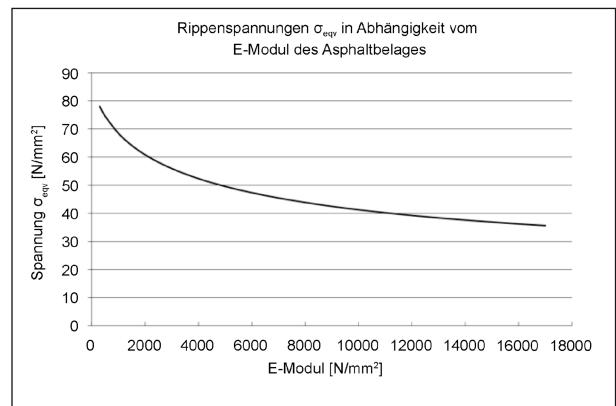
### Ergebnisse der Parameterstudie „Einfluss des E-Moduls des Asphaltfahrbahnbelags auf die Spannungen im Anschluss Längsrippen-Deckblech“ – Modell 2.1

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen sind in Bild 29 bis Bild 32 dargestellt. Bild 29 und Bild 30 zeigen den Einfluss des E-Moduls des Asphaltfahrbahnbelags auf die maximale Querspannung sowie die zugehörige Vergleichsspannung im Bereich der Anschlüsse der Längsrippen an das Deckblech. In Bild 31 und Bild 32 ist der Einfluss des E-Moduls des Asphaltfahrbahnbelags auf die maximale Vergleichsspannung sowie die zugehörige Querspannung dargestellt.

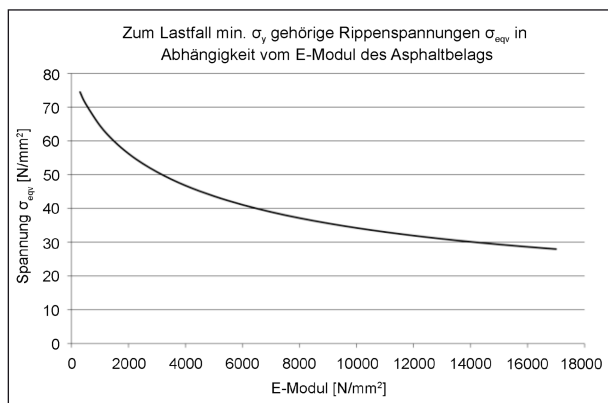
Alle vier Bilder veranschaulichen, dass mit steigendem E-Modul die Spannungen im Anschluss Längsrippe-Deckblech erwartungsgemäß reduziert werden. Besonders auffällig ist hierbei, dass gerade in den Bereichen von niedrigen E-Moduln



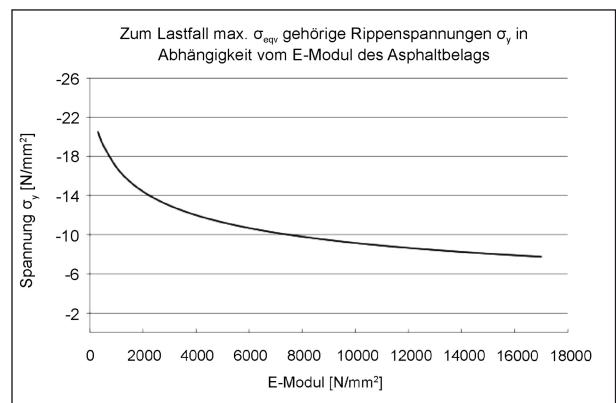
**Bild 29:** Einfluss des E-Moduls auf die maximale Querspannung



**Bild 31:** Einfluss des E-Moduls auf die Vergleichsspannung



**Bild 30:** Einfluss des E-Moduls auf die zur maximalen Querspannung zugehörige Vergleichsspannung



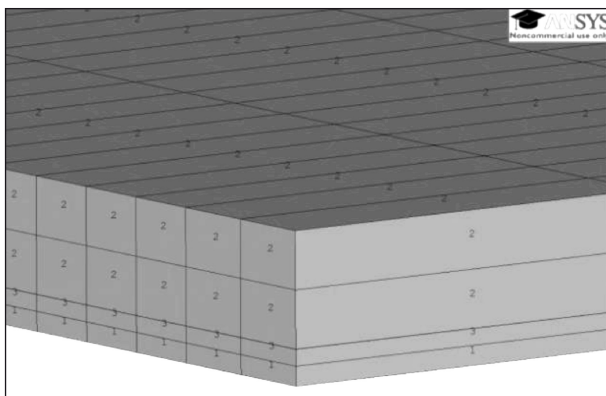
**Bild 32:** Einfluss des E-Moduls auf die zur maximalen Vergleichsspannung zugehörige Querspannung



(bis ca. 4.000 N/mm<sup>2</sup>) die Spannungen stark nicht-linear mit steigendem E-Modul abnehmen. Die Vergleichsspannung sinkt in diesem Bereich von 78 N/mm<sup>2</sup> auf 52 N/mm<sup>2</sup>, was einer Reduzierung der Spannung von 33 % entspricht. Die Querspannung wird bis zu einem E-Modul von 4.000 N/mm<sup>2</sup> um 47 % reduziert. Anhand der Spannungsreduktion lässt sich klar erkennen, dass sich die Spannungen im Anschluss zwischen Längsrippen und Deckblech durch eine Steigerung der Steifigkeit des Asphaltfahrbahnbelags und die daraus resultierende erhöhte mittragende Wirkung des Asphalts erheblich reduzieren lässt. Ab einer höheren Steifigkeit des Asphaltfahrbahnbelags (> 4.000 N/mm<sup>2</sup>) nehmen die Spannungen mit zunehmender Steifigkeit des Asphaltfahrbahnbelags zwar weiter ab, allerdings wird der Einfluss der Steifigkeit auf die Spannungen geringer.

### Modell 2.2 – Verbindung unter Berücksichtigung einer Pufferschicht

Im Rahmen einer zweiten Parameterstudie zum Einfluss des E-Moduls des Asphaltfahrbahnbelags auf die Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Längsrippen und Deckblech wurde der Verbund zwischen Asphaltfahrbahnbelag und Deckblech unter Berücksichtigung einer Pufferschicht hergestellt. Hierfür wurde ein zusätzliches Material definiert, welches die Pufferschicht abbildet, siehe Bild 33. Die Pufferschicht wurde im Finite-Elemente-Modell durch ein zusätzliches Layer in der unteren Schicht der Asphaltvolumenelemente berücksichtigt. In Anlehnung an [HUR 2002] wurde die Pufferschicht mit einem geringen Schubmodul von  $G = 5 \text{ N/mm}^2$  und mit einem im Vergleich zum Asphaltfahrbahnbelag hohen E-Modul von  $E = 100.000 \text{ N/mm}^2$  simuliert. Die Berechnungen wurden bei den beiden Modellen 2.1 und 2.2 jeweils für die gleichen Last-



**Bild 33:** 3D-Finite-Elemente-Modell unter Berücksichtigung einer Pufferschicht

stellungen durchgeführt. Die Auswertung erfolgte analog zur Auswertung der Berechnungen des Finite-Elemente-Modells 2.1.

### Ergebnisse der Parameterstudie „Einfluss des E-Moduls des Asphaltfahrbahnbelags auf die Spannungen im Anschluss Längsrippen-Deckblech“ – Modell 2.2

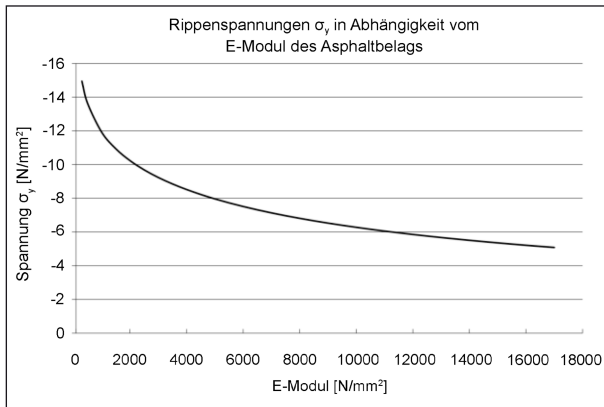
Die Ergebnisse der Parameterstudie zum Einfluss der Asphaltsteifigkeit auf die Spannungen im Anschluss zwischen Deckblech und Längsrippen sind in Bild 34 bis Bild 37 dargestellt. Bild 34 und Bild 35 zeigen den Einfluss des E-Moduls auf die maximale Querspannung sowie die zugehörige Vergleichsspannung. Bild 36 und Bild 37 stellen den Einfluss des E-Moduls auf die maximale Vergleichsspannung sowie die zugehörige Querspannung dar.

Alle vier Bilder veranschaulichen, dass die Spannungen im Anschluss der Längsrippen an das Deckblech mit steigendem E-Modul deutlich reduziert werden. In den Bereichen von niedrigen E-Moduln (bis ca. 4.000 N/mm<sup>2</sup>) ist der Einfluss der Asphaltsteifigkeit besonders groß. Die maximale Vergleichsspannung wird in diesem Bereich von 56 N/mm<sup>2</sup> auf 39 N/mm<sup>2</sup> reduziert, was einer Spannungsreduktion von 30 % entspricht. Die Querspannung wird bis zu einem E-Modul von 4.000 N/mm<sup>2</sup> um 53 % von 15 N/mm<sup>2</sup> auf 8,5 N/mm<sup>2</sup> reduziert. Mit zunehmender Steifigkeit des Asphaltfahrbahnbelags lassen sich die Spannungen im Bereich des Anschlusses Längsrippen-Deckblech zwar weiter reduzieren, der Einfluss der Steifigkeit nimmt jedoch ab.

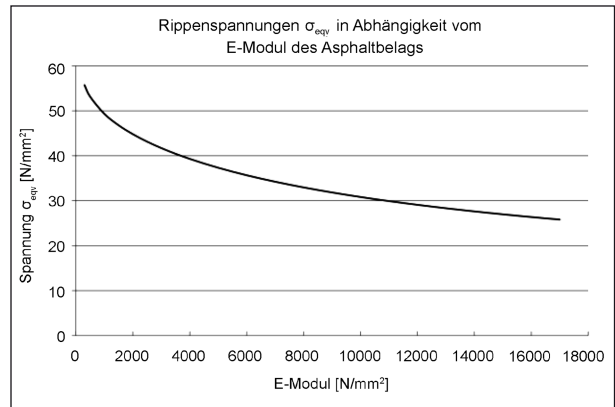
### Vergleich der Ergebnisse der Parameterstudien „Einfluss des E-Moduls des Asphaltfahrbahnbelags auf die Spannungen im Anschluss Längsrippen-Deckblech“ der beiden Finite-Elemente-Modelle 2.1 und 2.2

Beim Vergleich der Ergebnisse der mit den zwei Finite-Elemente-Modellen 2.1 und 2.2 durchgeführten Parameterstudien zum Einfluss der Steifigkeit des Asphaltfahrbahnbelags auf die Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Längsrippen und Deckblech ist festzustellen, dass die beiden unterschiedlichen Simulationsmodelle qualitativ die gleichen Ergebnisse liefern. Unabhängig von der Simulation des Verbundes zwischen Asphaltfahrbahnbelag und Stahldeckblech werden bei beiden Berechnungen die maßgebenden Spannungen im selben Steifigkeitsbereich um nahezu

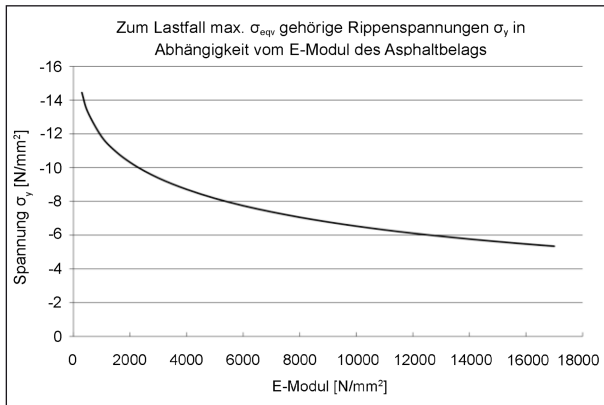




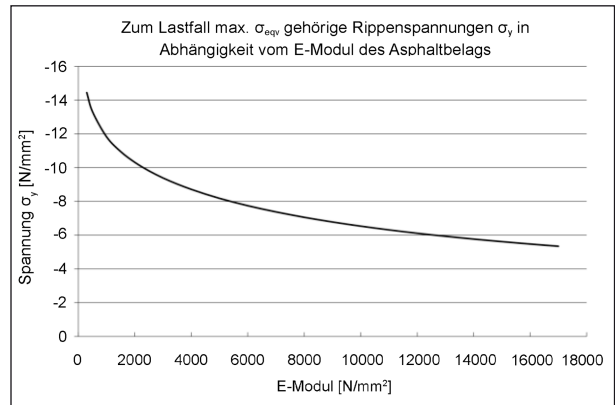
**Bild 34:** Einfluss des E-Moduls auf die maximale Querspannung



**Bild 36:** Einfluss des E-Moduls auf die Vergleichsspannung



**Bild 35:** Einfluss des E-Moduls auf die zur maximalen Querspannung zugehörige Vergleichsspannung



**Bild 37:** Einfluss des E-Moduls auf die zur maximalen Vergleichsspannung zugehörige Querspannung

| E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]                                 | Modell 2.1 Verbindung mit Kontaktelementen |                     |                     |                 | Modell 2.2. Berücksichtigung einer Pufferschicht |                     |                     |                 |
|--|--|---------------------|---------------------|-----------------|--|---------------------|---------------------|-----------------|
|  | Spannungen [N/mm <sup>2</sup> ]            |                     |                     |                 | Spannungen [N/mm <sup>2</sup> ]                  |                     |                     |                 |
|  | min. $\sigma_y$                            | zug. $\sigma_{eqv}$ | max. $\sigma_{eqv}$ | zug. $\sigma_y$ | min. $\sigma_y$                                  | zug. $\sigma_{eqv}$ | max. $\sigma_{eqv}$ | zug. $\sigma_y$ |
| 300  | -22,14                                     | 74,46               | 78,04               | -20,53          | -14,95   | 54,85               | 55,71               | -14,44          |
| 1.000  | -16,79                                     | 64,50               | 68,46               | -16,89          | -11,92   | 48,27               | 49,30               | -11,82          |
| 4.000  | -10,73                                     | 46,77               | 52,34               | -12,00          | -8,52  | 37,21               | 39,29               | -8,71           |
| 7.000  | -8,81                                      | 38,95               | 45,43               | -10,20          | -7,14  | 31,37               | 34,21               | -7,37           |
| 10.000   | -7,74                                      | 34,22               | 41,26               | -9,15           | -6,28  | 27,43               | 30,82               | -6,53           |
| 13.000   | -7,04                                      | 30,99               | 38,37               | -8,43           | -5,67  | 24,54               | 28,31               | -5,93           |
| 16.000   | -6,53                                      | 28,62               | 36,22               | -7,90           | -5,21  | 22,30               | 26,36               | -5,47           |
| 17.000   | -6,40                                      | 27,96               | 35,61               | -7,75           | -5,08  | 21,66               | 25,80               | -5,34           |
| <b>Spannungsreduktion bis E = 4.000 N/mm<sup>2</sup> [%]</b> |  |                     |                     |                 |  |                     |                     |                 |
|  | -52  | -37                 | -33                 | -42             | -43  | -32                 | -29                 | -40             |
| <b>Komplette Spannungsreduktion [%]</b>                      |  |                     |                     |                 |  |                     |                     |                 |
|  | -71  | -62                 | -54                 | -62             | -66  | -61                 | -54                 | -63             |

**Tab. 7:** Vergleich der Ergebnisse aus den Parameterstudien der Finite-Elemente-Modelle 2.1 und 2.2

den gleichen Prozentsatz reduziert. Beim Vergleich der absoluten Werte der Spannungen liefert die Simulationsvariante 2.1 (Verbund durch Kontaktelemente) gegenüber der Simulation unter Berücksichtigung einer Pufferschicht größere Spannungen, siehe Tabelle 7. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Reibungszahl  $\mu$  mit  $\mu = 0,3$  schlechtere Verbundeigenschaften abbildet als die

berücksichtigung einer Pufferschicht größere Spannungen, siehe Tabelle 7. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Reibungszahl  $\mu$  mit  $\mu = 0,3$  schlechtere Verbundeigenschaften abbildet als die

Pufferschicht mit geringer Schubsteifigkeit. Zum anderen wurde die Pufferschicht mit einer Höhe von 10 mm abgebildet, sodass alleine durch die Simulation der Pufferschicht eine größere lastverteilende Wirkung simuliert wird.

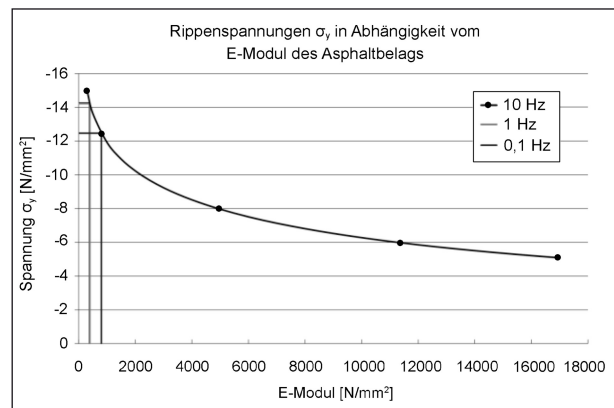
#### 4.3.2 Bewertung der mittragenden Wirkung des Asphaltfahrbahnbelags

Im Vergleich der beiden Simulationsvarianten 2.1 und 2.2 ließ sich feststellen, dass beide Varianten qualitativ die gleichen Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund wird sich bei den weiteren Ausführungen nur auf die Berechnungen mit der Simulationsvariante 2.2 bezogen.

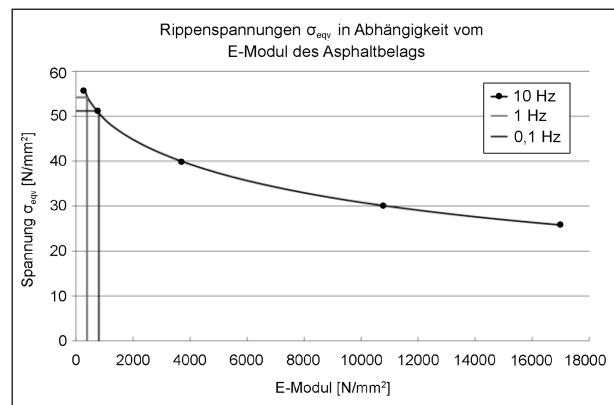
Die Ergebnisse der durchgeführten Finite-Elemente-Berechnungen wurden den Ergebnissen aus den am Gussasphalt durchgeführten Spaltzug-Schwellversuchen gegenübergestellt. Ziel war es herauszufinden, um welchen Betrag die Steifigkeit des derzeit verwendeten Gussasphaltes gesteigert werden müsste, um eine ausreichende Reduzierung der Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Längsrippen und Deckblech zu gewährleisten. Hierzu wurden zunächst die aus den Spaltzug-Schwellversuchen ermittelten Ergebnisse verwendet, um die Steifigkeit des untersuchten Gussasphaltes bei +50 °C zu bestimmen. Dieser Wert wurde als Referenzwert für die Asphaltsteifigkeit in den Sommermonaten angenommen und den Ergebnissen der Finite-Elemente-Berechnungen gegenübergestellt.

Die Bilder 38 und 39 zeigen, dass die E-Moduln des untersuchten, herkömmlichen Gussasphaltes sehr niedrig sind. Wie bereits bei der Auswertung der numerischen Untersuchungen beschrieben, können gerade in den Bereichen von niedrigen E-Moduln bis ca. 4.000 N/mm<sup>2</sup> die Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Längsrippen und Deckblech durch eine Erhöhung der Asphaltsteifigkeit deutlich reduziert werden. Der Vergleich zwischen der numerisch errechneten Spannungsreduktion infolge einer erhöhten Steifigkeit des Asphaltfahrbahnbelags mit den tatsächlichen vorhandenen E-Moduln zeigt zum einen, dass der E-Modul des Gussasphaltes bei hohen Temperaturen mit etwa 400 N/mm<sup>2</sup> sehr niedrig ist. Zum anderen wird ersichtlich, dass eine Steifigkeit von ca. 4.000 N/mm<sup>2</sup> ausreicht, um die maßgebenden Spannungen um 30 % bis 50 % zu reduzieren.

Da sich herausstellte, dass sich der Spaltzug-Schwellversuch nicht eignet, um den E-Moduln von



**Bild 38:** Gegenüberstellung der errechneten E-Moduln bei +50 °C mit den maximalen Querspannungen der FE-Berechnungen



**Bild 39:** Gegenüberstellung der errechneten E-Moduln bei +50 °C mit den maximalen Vergleichsspannungen der FE-Berechnungen

verfüllten Asphalten wie den untersuchten HANV-Varianten und Polymerbeton zu bestimmen und somit die Steifigkeit des HANVs zu bewerten, wurden als nächstes die Bauteilversuche, siehe Kapitel 5, durchgeführt. Bei den Bauteilversuchen wurde die Tragfähigkeit des Gesamtsystems im realitätsnahen Versuchsaufbau untersucht, sodass sich anhand der Ergebnisse feststellen ließ, ob und inwieweit die Verwendung von HANV-Belägen in Schutz- und Deckschicht eine erhöhte mittragende Wirkung gegenüber dem herkömmlichen Gussasphalt aufweisen.

#### 4.3.3 Numerische Untersuchungen zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die Spannungen an der Unterkante des Deckblechs

Neben der Asphaltsteifigkeit des Belags bietet auch der Schubverbund in der Verbindung zwischen Asphaltbelag und Deckblech Potenzial zur weiteren Erhöhung der mittragenden Wirkung. Bestimmt

wurde der Schubverbund durch die nach [ZTV 2010] für Bauart 1 geforderte Pufferschicht, welche aus polymermodifiziertem Bitumen (PmB) und Zusatzstoffen besteht: Je geringer die Schubsteifigkeit der Pufferschicht, desto weicher der Verbund zwischen Asphalt und Deckblech und je größer die Schubsteifigkeit, desto starrer der Verbund.

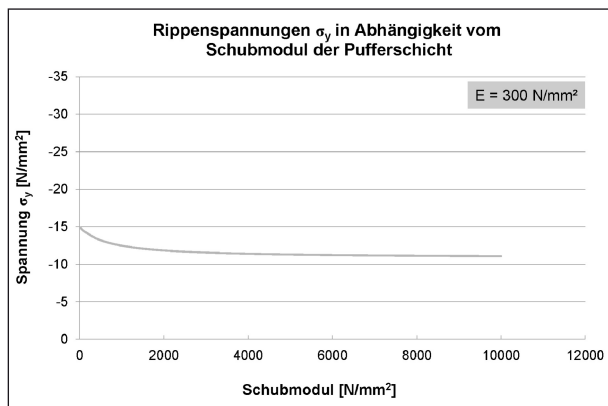
In einer Parameterstudie wurde der Einfluss eines schubweichen Verbundes mit dem eines schubstarken Verbundes auf die Spannungen an der Unterkante des Deckblechs verglichen. Dazu wurde der Schubmodul der Pufferschicht in insgesamt 35 Lastfällen von 5 N/mm<sup>2</sup> auf 10.000 N/mm<sup>2</sup> erhöht, wobei der Maximalwert der Schubsteifigkeit der Pufferschicht bei der numerischen Berechnung nicht auf tatsächlichen Werten von PmB basiert, sondern für die Parameterstudie frei gewählt wurde und allein der Simulation eines starren Verbundes dient und damit den Verzicht auf die selbige simuliert.

Zur Erfassung des Einflusses der Schubsteifigkeit der Pufferschicht bei verschiedenen E-Moduln der Asphalttschicht wurde die Parameterstudie mit

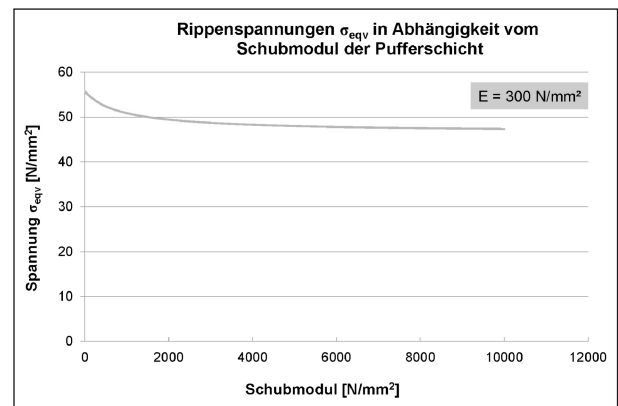
einem E-Modul der Asphalttschicht von 300 N/mm<sup>2</sup> und 4.000 N/mm<sup>2</sup> durchgeführt. Für die Auswertung wurden die minimalen Querspannungen mit den zugehörigen Vergleichsspannungen und die maximalen Vergleichsspannungen mit den zugehörigen Querspannungen an den zuvor bereits bestimmten, maximal beanspruchten Knoten ausgelesen. Die Berechnungen erfolgten an dem bereits modellierten Modell 2.2 unter Berücksichtigung einer Pufferschicht.

### Ergebnisse der Parameterstudie bei einem E-Modul von 300 N/mm<sup>2</sup>

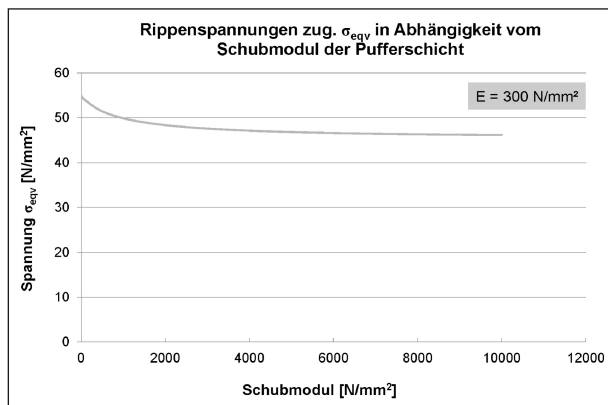
Die Ergebnisse der Parameterstudie zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die Spannungen im Anschluss zwischen Deckblech und Längsrippen bei einer Asphalttschicht von 300 N/mm<sup>2</sup> sind in Bild 40 bis Bild 43 dargestellt. In Bild 40 und Bild 41 sind die maximalen Querspannungen und die zugehörigen Vergleichsspannungen und in Bild 42 und Bild 43 die maximalen Vergleichsspannungen und die zugehörigen Quer-



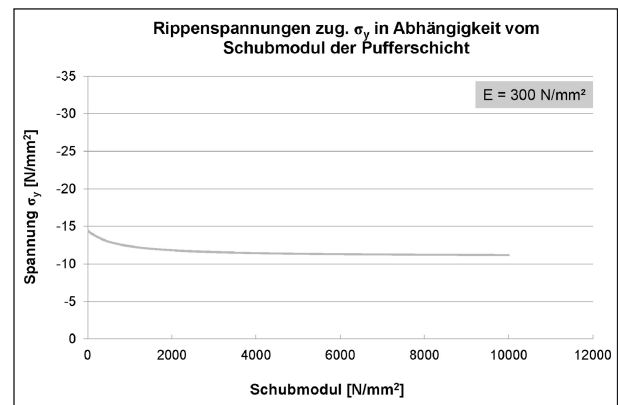
**Bild 40:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die maximalen Querspannungen (E = 300 N/mm<sup>2</sup>)



**Bild 42:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die maximalen Vergleichsspannungen (E = 300 N/mm<sup>2</sup>)



**Bild 41:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die zur maximalen Querspannung zugehörigen Vergleichsspannung (E = 300 N/mm<sup>2</sup>)



**Bild 43:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die zur maximalen Vergleichsspannung zugehörigen Querspannungen (E = 300 N/mm<sup>2</sup>)

spannungen dargestellt. Die Spannungen in der Verbindung zwischen Deckblech und Längsrippen nehmen durch die Erhöhung der Schubsteifigkeit ab. Ein starrer Schubverbund führt zu einer Reduzierung der maximalen Querspannung von 25,5 % und der maximalen Vergleichsspannungen von 15,7 %. Der größte Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht liegt im Bereich zwischen 5 N/mm<sup>2</sup> und 2.000 N/mm<sup>2</sup>.

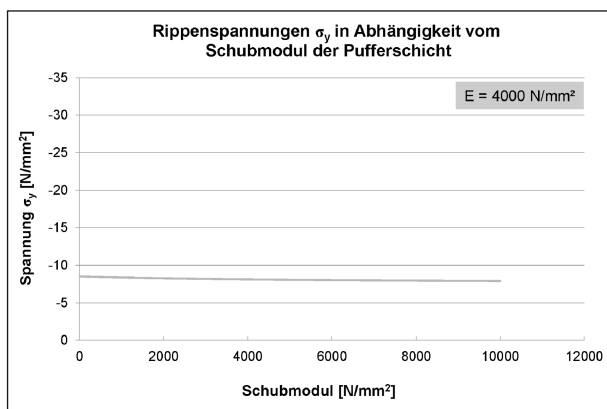
**Ergebnisse der Parameterstudie bei einem E-Modul von 4.000 N/mm<sup>2</sup>**

Die Ergebnisse der Parameterstudie zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die Spannungen im Anschluss zwischen Deckblech und Längsrippen bei einer Asphaltsteifigkeit von 4.000 N/mm<sup>2</sup> sind in Bild 44 bis Bild 47 dargestellt. In Bild 44 und Bild 45 sind die maximalen Querspannungen und die zugehörigen Vergleichsspannungen und in Bild 46 und Bild 47 die maximalen Vergleichsspannungen und die zugehörigen Querspannungen dargestellt. Durch eine erhöhte

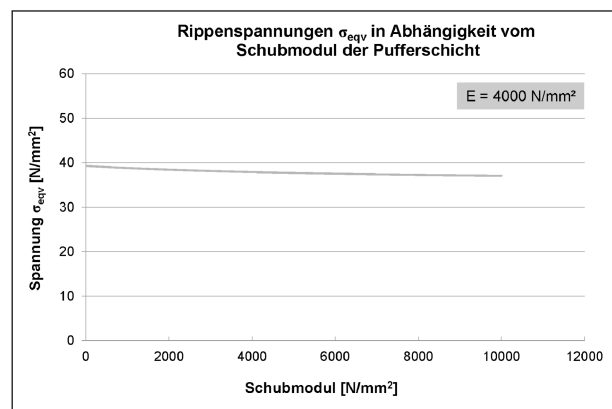
Asphaltsteifigkeit nimmt der Einfluss der Schubsteifigkeit auf die Spannungen im Bereich der Verbindung zwischen Deckblech und Längsrippen ab. Die maximalen Querspannungen werden von -8,5 N/mm<sup>2</sup> auf -7,9 N/mm<sup>2</sup> reduziert, dies entspricht einer prozentualen Spannungsänderung von 7,1 %. Die maximalen Vergleichsspannungen werden um 6,7 % reduziert.

**Vergleich und Bewertung der Parameterstudien zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht bei einem E-Modul der Asphalttschicht von 300 und 4.000 N/mm<sup>2</sup>**

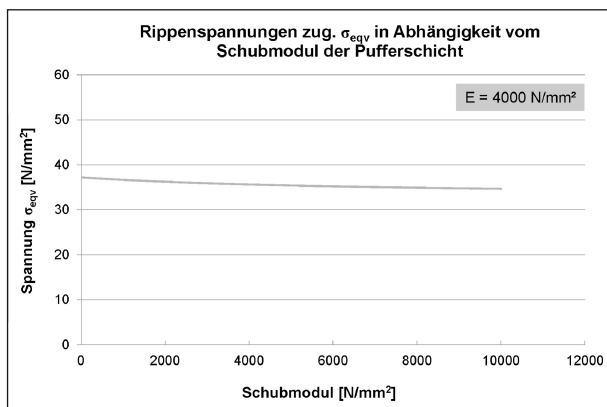
In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Parameterstudien zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht bei unterschiedlichen Asphaltsteifigkeiten dargestellt. Bei einem E-Modul der Asphalttschicht von 300 N/mm<sup>2</sup> beträgt die Spannungsreduzierung der maximalen Querspannungen bei einer Steigerung des Schubmoduls von 5 N/mm<sup>2</sup> auf 10.000 N/mm<sup>2</sup> 25,5 %, bei einer Asphaltsteifigkeit von 4.000 N/mm<sup>2</sup> liegt die Spannungsän-



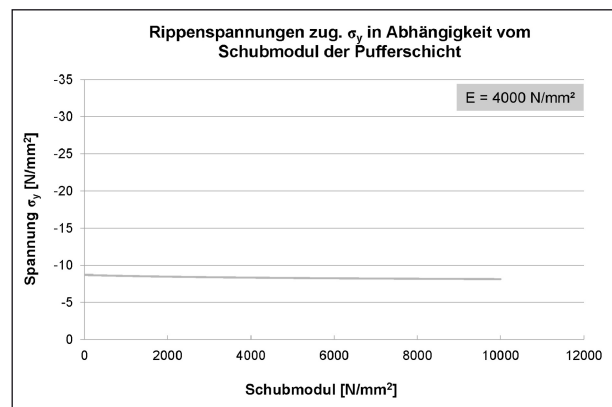
**Bild 44:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die maximalen Querspannungen (E = 4.000 N/mm<sup>2</sup>)



**Bild 46:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die maximalen Vergleichsspannungen (E = 4.000 N/mm<sup>2</sup>)



**Bild 45:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die zur maximalen Querspannung zugehörigen Vergleichsspannungen (E = 4.000 N/mm<sup>2</sup>)



**Bild 47:** Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die zur maximalen Vergleichsspannung zugehörigen Querspannungen (E = 4.000 N/mm<sup>2</sup>)

| Schubmodul<br>[N/mm <sup>2</sup> ]   | E-Modul<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Spannungen [N/mm <sup>2</sup> ] |                     |                     |                 |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
|  |                                 | min. $\sigma_y$                 | zug. $\sigma_{eqv}$ | max. $\sigma_{eqv}$ | zug. $\sigma_y$ |
| G  | E                               |                                 |                     |                     |                 |
| 5  | 300                             | -14,9                           | 54,8                | 55,7                | -14,4           |
| 10.000   |                                 | -11,1                           | 46,2                | 47,3                | -11,2           |
| <b>Spannungsänderung infolge des erhöhten Schubmoduls</b>  |                                 |                                 |                     |                     |                 |
|  |                                 | 25,5 %                          | 15,7 %              | 15,0 %              | 22,3 %          |
| 5  | 4.000                           | -8,5                            | 37,2                | 39,3                | -8,7            |
| 10.000   |                                 | -7,9                            | 34,7                | 37,1                | -8,1            |
| <b>Spannungsänderung infolge des erhöhten Schubmoduls</b>  |                                 |                                 |                     |                     |                 |
|  |                                 | 7,1 %                           | 6,7 %               | 5,6 %               | 6,9 %           |
| <b>Spannungsänderung infolge des erhöhten E-Moduls bei einem Schubmodul von 5 N/mm<sup>2</sup></b> |                                 |                                 |                     |                     |                 |
|  |                                 | 43,0 %                          | 32,2 %              | 29,5 %              | 39,6 %          |

Tab. 8: Vergleich der Ergebnisse der Parameterstudien zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht

derung infolge einer höheren Schubsteifigkeit bei 7,1 %.

Anhand der durchgeführten numerischen Untersuchungen zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Deckblech und Längsrippen lässt sich feststellen, dass ein schubstarrer Verbund zwischen Asphalt und Deckblech die Spannungen an der Unterkante des Deckblechs in Abhängigkeit der Asphaltsteifigkeit reduziert. Der herkömmlich eingesetzte Gussasphalt weist bei einer Temperatur von +50 °C eine Asphaltsteifigkeit von ca. 300 N/mm<sup>2</sup> auf, sodass der Verzicht auf eine Pufferschicht besonders im Bereich hoher Asphalttemperaturen die Spannungen an der Unterkante des Deckblechs um bis zu 26 % reduziert. Ab einer Asphaltsteifigkeit von 4.000 N/mm<sup>2</sup>, welche beim Gussasphalt bei einer Temperatur von +20 °C durchaus überschritten wird, hat die Schubsteifigkeit der Pufferschicht mit einer Spannungsreduzierung von maximal 7,5 % einen geringeren Einfluss.

Tendenziell wirkt sich ein schubstarrer Verbund positiv auf die auftretenden Spannungen an der Unterkante des Deckblechs aus. Die Spannungen werden bei hohen Temperaturen und einem dadurch bedingten Steifigkeitsverlust des Gussasphaltes durch die Ausbildung eines starren Verbundes reduziert und im Bereich niedrigerer Temperaturen (~ +20 °C) sorgt vorwiegend die höhere Asphaltsteifigkeit für die Spannungsreduzierung. Demnach kann auf den Einbau einer Pufferschicht im Hinblick auf die Spannungen in der Verbindung

zwischen Deckblech und Längsrippen verzichtet werden. Andere Eigenschaften und Funktionen der Pufferschicht, wie z. B. der thermische Schutz der orthotropen Fahrbahnplatte beim Heißeinbau des Asphaltes, wurden bei der durchgeführten Parameterstudie nicht berücksichtigt und sind zusätzlich zu bewerten.

## 5 Experimenteller Nachweis der mittragenden Wirkung

### 5.1 Allgemeines

Wie die Versuchsergebnisse (vgl. Kapitel 3.2.8 und 3.2.10) gezeigt haben, ist der Spaltzug-Schwellversuch nicht geeignet, um E-Moduln von verfüllten Asphaltmaterialien zu bestimmen. Aus diesem Grund wurde die mittragende Wirkung der zu untersuchenden HANV-Varianten anhand von statischen und dynamischen Bauteilversuchen an den folgenden Belagsvarianten nachgewiesen:

- (1) Stahlblech ohne Asphalt (Referenz),
- (2) Stahlblech + Haftschrift + Pufferschicht + Gussasphalt,
- (3) Stahlblech + Haftschrift + Gussasphalt (ohne Pufferschicht),
- (4) Stahlblech + Haftschrift + Pufferschicht + HANV (Epoxidharz),
- (5) Stahlblech + Haftschrift + HANV (Epoxidharz, ohne Pufferschicht),



(6) Stahlblech + Haftschrift + HANV  
(Bioharz, ohne Pufferschicht).

Während bei der Beurteilung der statischen Tragfähigkeit die hohen Temperaturen maßgebend sind, sind bei der Dauerhaftigkeit vor allem die tiefen Temperaturen von Interesse. Aus diesem Grund wurden die statischen Versuche bei +20 °C und +50 °C durchgeführt. Die dynamischen Versuche wurden ebenfalls bei +20 °C durchgeführt sowie bei einer tiefen Temperatur von ~ -5 °C. Die Höhe der tiefen Temperatur wurde vor Durchführung der Versuche anhand von Abkühlversuchen am Grundmaterial bei der BAST festgelegt, siehe Kapitel 3.3. In der Summe wurden jeweils zwei Prüfkörper einer Asphaltvariante bei gleicher Prüftemperatur unter gleicher Belastung geprüft. Damit ergaben sich insgesamt 40 Bauteilversuche. Eine Übersicht über das Versuchsprogramm ist in Tabelle 9 dargestellt

## 5.2 Versuchsaufbau

Die Bauteilversuche wurden am Institut für Metall- und Leichtbau an der institutseigenen, servo-hydraulischen 100 kN-Prüfmaschine der Firma Zwick/Roell durchgeführt, siehe auch Bild 8. Die Prüfung erfolgte sowohl bei den statischen als auch bei den dynamischen Versuchen in Form von Fünf-Punkt-Biege-Versuchen in Anlehnung an die Dauerschwellbiegeprüfung nach [TP 2010], siehe Bild 48.

Der Asphaltprüfkörper wurde auf drei freibeweglichen Rollen aufgelagert, welche in einem Abstand von 300 mm angeordnet sind. In Anlehnung an [SED 2010] wurde die Belastung nicht indirekt über das Stahlblech, sondern direkt auf den Asphaltbelag eingebracht. Die Lasteinleitung erfolgte über zwei Lasteinleitungsrollen, welche mit einem Abstand von 350 mm zueinander positioniert wurden. Um ein Eindringen des Asphaltes infolge der linienförmigen Lasteinleitung zu vermeiden, wurden hierzu Lastverteilungsplatten angeordnet. Während der kompletten Versuchsdauer wurden sowohl bei den statischen als auch bei den dynamischen Versuchen die Verformungen der Prüfkörper an jeweils vier Stellen an der Unterseite des Stahlblechs gemessen, siehe Bild 49.

Zur Sicherstellung der verschiedenen Prüftemperaturen von -5 °C, +20 °C und +50 °C über die gesamte Versuchsdauer, erfolgten die Bauteilversuche in einer speziell angefertigten Temperierkammer, siehe Bild 50.

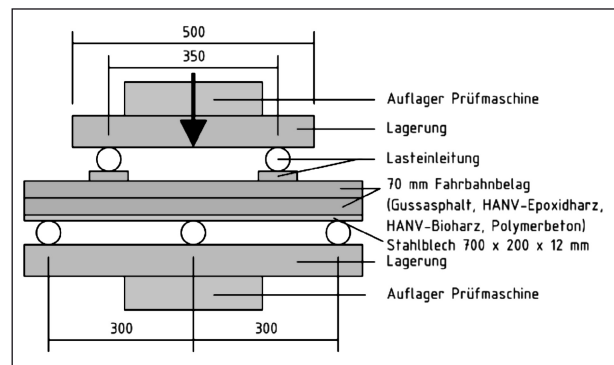


Bild 48: Versuchsaufbau Bauteilversuche

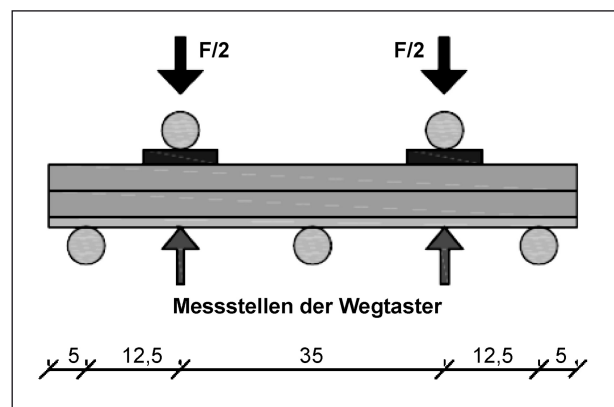


Bild 49: Versuchsaufbau Bauteilversuche [RAA 2015]



Bild 50: Temperierkammer [RAA 2015]

## 5.3 Prüfkörper

Die Prüfkörper bestanden aus rechteckigen Stahlplatten mit den Abmessungen 700 mm x 200 mm x 12 mm. Alle Prüfkörper wurden mit einem Dichtungssystem nach Bauart 1 gemäß [ZTV 2010] versehen, wobei Belagsvarianten mit und ohne Pufferschicht geprüft wurden, siehe Tabelle 9.

Die Grundplatten für die Versuchskörper wurden von einem Stahlbauunternehmen hergestellt. Bei den Straßenbauunternehmen A und B wurden

| Asphaltvariante   |                    | Bezeichnung |         | Abmessungen [mm] | Bauteilversuche |                 |                 |
|---|--------------------|-------------|---------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|   |                    |             |         |                  | Prüfung         | Temperatur [°C] | Anzahl          |
| Gussasphalt   | mit Pufferschicht  | GAP         | I-II    | 700 x 150 x 70   | statisch        | +20; +50        | 4 <sup>1)</sup> |
|   |                    |             | V-VIII  |                  | dynamisch       | +20; -10        | 4               |
|   | ohne Pufferschicht | GAoP        | I-II    |                  | statisch        | +20; +50        | 4 <sup>1)</sup> |
|   |                    |             | V-VIII  |                  | dynamisch       | +20; -10        | 4               |
| HANV-Epoxidharz   | mit Pufferschicht  | HEP         | I-II    | 700 x 150 x 70   | statisch        | +20; +50        | 4 <sup>1)</sup> |
|   |                    |             | V-VIII  |                  | dynamisch       | +20; -10        | 4               |
|   | ohne Pufferschicht | HEoP        | I-II    |                  | statisch        | +20; +50        | 4 <sup>1)</sup> |
|   |                    |             | III-VII |                  | dynamisch       | +20; -10        | 4               |
| HANV-Bioharz  | ohne Pufferschicht | HBoP        | I-II    | 700 x 200 x 70   | statisch        | +20; +50        | 4 <sup>1)</sup> |
|   |                    |             | V-VIII  |                  | dynamisch       | +20; -10        | 4               |
| <b>Summe der Bauteilversuche</b>  |                    |             |         |                  |                 |                 | <b>40</b>       |
| 1) Die statischen Versuche wurden bei +20 °C und +50 °C jeweils an den zwei gleichen Prüfkörpern durchgeführt |                    |             |         |                  |                 |                 |                 |

Tab. 9: Versuchsprogramm – Bauteilversuche [RAA 2015]

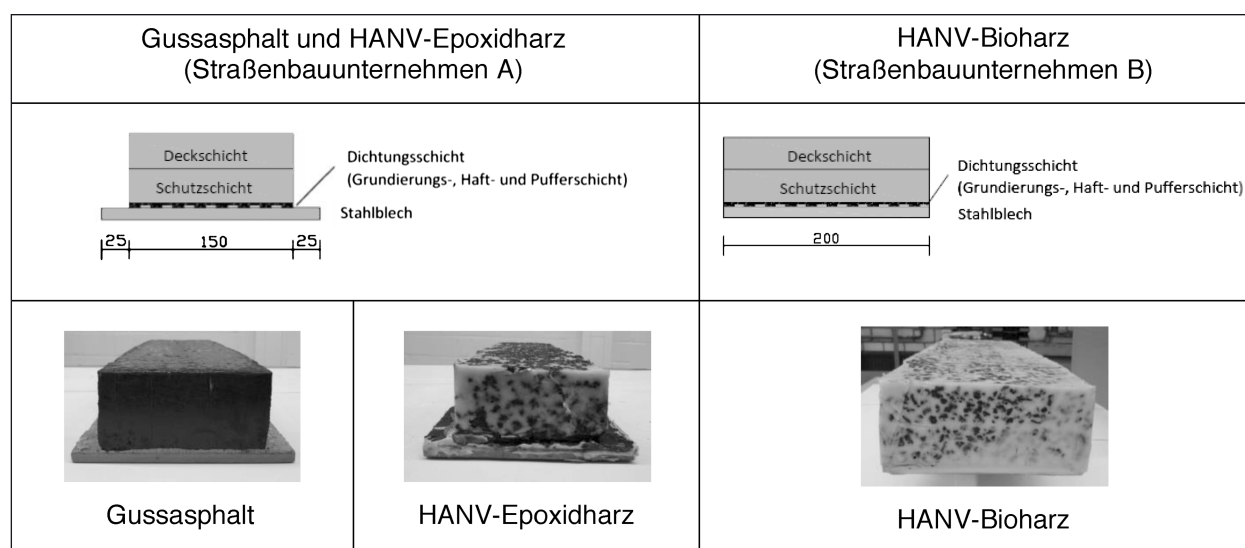


Bild 51: Übersicht Prüfkörper [RAA 2015]

anschließend die unterschiedlichen Asphaltvarianten aufgebracht. Die Referenzprüfkörper aus Gussasphalt sowie die mit Epoxidharz verfüllten Prüfkörper wurden vom Straßenbauunternehmen A hergestellt, die mit Bioharz verfüllten Prüfkörper vom Straßenbauunternehmen B. Ursprünglich wurde vorgesehen, dass der Asphaltbelag nur über eine Breite von 150 mm auf den Grundplatten aufgebracht wird. Die mit Bioharz verfüllten Prüfkörper wurden hiervon abweichend mit einem 200 mm breiten Asphaltbelag versehen, siehe Bild 51. Zudem wurden die HANV-Bioharz-Prüfkörper nur ohne Pufferschicht geliefert. Aufgrund der abweichenden Geometrie der mit Bioharz verfüllten

HANV-Prüfkörper, lassen sich die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der Bioharz-Prüfkörper nicht mit den übrigen Ergebnissen vergleichen. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Versuche der HANV-Bioharz-Varianten in Anhang C dargestellt.

## 5.4 Statische Bauteilversuche

### 5.4.1 Allgemeines

Mithilfe der statischen Bauteilversuche sollte untersucht werden, ob und inwieweit der Einsatz eines HANV-Belags in der Schutz- und Deckschicht eine

erhöhte mittragende Wirkung gegenüber dem herkömmlichen Gussasphalt liefert. Da sich die Steifigkeit des Gussasphalts mit steigender Temperatur deutlich reduziert, sind insbesondere die statischen Versuche bei +50 °C von Interesse. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob sich die Beanspruchungen im Stahlblech durch den Verzicht auf die Pufferschicht zusätzlich verringern lassen.

#### 5.4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchskörper wurden stufenweise mit einer Druckkraft beansprucht, siehe Bild 52. Für die Versuche bei 20 °C wurde die Oberlast auf 50 kN festgelegt. In Anlehnung an [SED 2010] musste die Oberlast bei den Versuchen bei 50 °C auf 15 kN abgesenkt werden, um eine zu starke Verformung des Asphalt im Bereich der Lasteinleitung zu vermeiden. Die Aufbringung der Last erfolgte weggesteuert mit einer Beanspruchungsgeschwindigkeit von 0,006 mm/s. Die zwischengeschalteten Haltezeiten von jeweils 60 s wurden kraftgesteuert gehalten. Die einzelnen Belastungsstufen inklusive Haltezeiten für den Prüfverlauf bei +20 °C sind in Bild 52 dargestellt. Die Belastung bei +50 °C erfolgte analog mit dem Unterschied, dass das Lastniveau 15 kN dreimal angefahren und der Versuch anschließend beendet wurde.

Vor Versuchsbeginn wurden die Prüfkörper für 24 Stunden in einem Trockenofen vortemperierte. Die Prüfkörper wurden anschließend auf den unteren Rollen ausgerichtet und die Lastverteilungsplatten mit den Lasteinleitungsrollen auf der Asphaltoberfläche positioniert, siehe Bild 53 und Bild 54. An der Unterseite des Stahlblechs wurden die Wegtaster fixiert und bei Kontakt mit dem Stahlblech tariert, siehe Bild 54. Anschließend wurde die Datenaufzeichnung gestartet und der Prüfkörper mit minimaler Kraft an die obere Lagerung angedrückt, sodass der Versuchsaufbau stabil war. Die auftretenden Verformungen infolge des „Andrückens“ wurden bei der Messung der Verformungen mitberücksichtigt. Nach Sicherstellung eines stabilen Versuchsaufbaus wurde die Temperierkammer um Prüfkörper und Versuchsaufbau geschoben und geschlossen. Die eigentliche Belastung wurde 30 min nach Erreichen der Prüftemperatur aufgebracht.

Während der statischen Bauteilversuche wurden folgende Messdaten mit einer Frequenz von 10 Hz aufgezeichnet:

- Zeit [s],
- Kraft [kN],
- Kolbenweg [kN],
- Weg\_V\_L [mm] – Verformung vorne links,
- Weg\_V\_R [mm] – Verformung vorne rechts,
- Weg\_H\_L [mm] – Verformung hinten links und
- Weg\_H\_R [mm] – Verformung hinten rechts.

Für die Auswertung der Versuche wurden die Einzelmessungen der vier Wegtaster zu einem Mittelwert zusammengefasst. Exemplarisch sind die

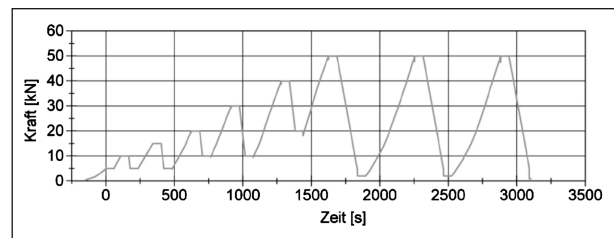


Bild 52: Last-Zeit-Verlauf der statischen Versuche

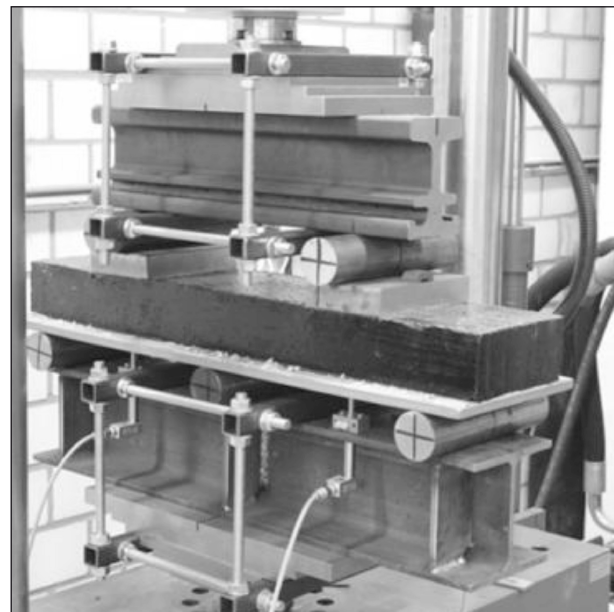


Bild 53: Durchführung der Bauteilversuche [RAA 2015]

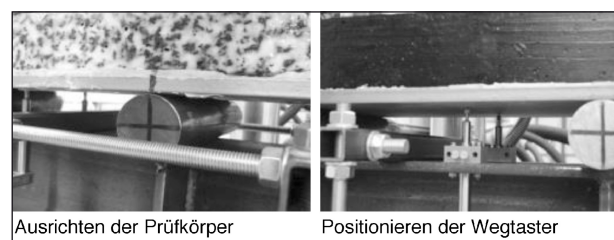
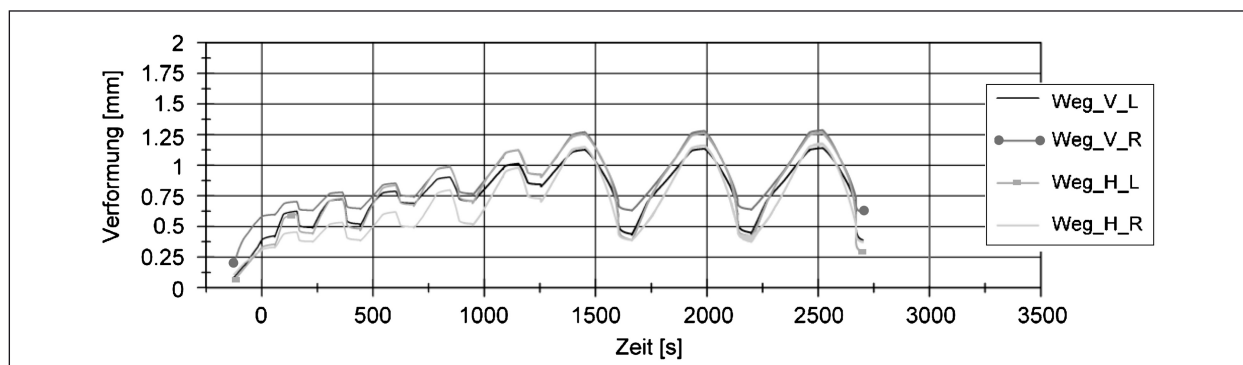


Bild 54: Einbau der Prüfkörper [RAA 2015]



**Bild 55:** Messergebnisse der vier Wegtaster am HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht – statisch 20° C

Verformungen der vier Wegtaster am Prüfkörper HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht (HEoP-I) bei einer Prüftemperatur von +20 °C in Bild 55 dargestellt.

Ein erster Vergleich der Verformungen an den Gussasphalten bei +50 °C mit denen bei +20 °C zeigte, dass die gemessenen Verformungen bei +50 °C wider Erwarten geringer waren als bei +20 °C. Durch den Steifigkeitsverlust des Gussasphaltes mit zunehmender Temperatur wären an den Prüfkörpern größere Verformungen an der Stahlblechunterseite bei +50 °C zu erwarten gewesen. Aufgrund der unerklärlichen Ergebnisse wurden die bereits bei +20 °C geprüften Prüfkörper, sowohl Gussasphalt als auch HANV-Epoxidharz, nochmals bei +50 °C geprüft und die zuerst bei +50 °C geprüften Varianten anschließend bei +20 °C. Unabhängig von der Reihenfolge der Prüftemperatur waren bei allen Asphaltvarianten die gemessenen Verformungen am selben Prüfkörper bei einer Temperatur von +50 °C größer als bei +20 °C. Für die Bewertung der Steifigkeit von HANV im Vergleich zum Gussasphalt bei verschiedenen Prüftemperaturen schien es daher sinnvoll die gleichen Prüfkörper zu betrachten, sodass die Bewertung der statischen Bauteilversuche sowohl bei +20 °C als auch bei +50 °C anhand der Ergebnisse erfolgte, die an den gleichen Prüfkörpern ermittelt wurden.

#### 5.4.3 Ergebnisse der statischen Versuche bei 20 °C

Für die Auswertung der statischen Bauteilversuche bei +20 °C wurden normierte Kraft-Verformung-Kurven der unterschiedlichen Asphaltvarianten erstellt. Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit wurde jeweils nur der letzte Belastungszyklus herangezogen. Die Verformungen wurden bei einer Kraft

von 10 kN auf 0,25 mm normiert. Somit konnten Unterschiede in den Anfangssteigungen, welche aus Imperfektionen der Prüfkörper herrührten, eliminiert werden.

Zunächst erfolgte der Vergleich der verschiedenen Asphaltvarianten bei einer Prüftemperatur von +20 °C anhand der normierten Kraft-Verformung-Kurven. Die Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper aus Gussasphalt mit und ohne Pufferschicht sind in Bild 56 und die der HANV-Epoxidharze mit und ohne Pufferschicht sind in Bild 57 dargestellt. Um den Einfluss der Pufferschicht auf die Gesamtsteifigkeit des Systems ebenfalls zu erfassen sind in Bild 58 und Bild 59 jeweils die Prüfkörper mit und ohne Pufferschicht für Gussasphalt und HANV-Epoxidharz dargestellt.

Bei den Kraft-Verformung-Kurven der Gussasphalte, siehe Bild 56, lässt sich eine geringfügig höhere Steifigkeit der Variante ohne Pufferschicht gegenüber der Variante mit Pufferschicht erkennen. Ein deutlicher Unterschied lässt sich zwischen den Steifigkeiten der HANV-Varianten mit und ohne Pufferschicht erkennen. Der Vergleich der unterschiedlichen Asphaltvarianten getrennt nach mit und ohne Pufferschicht, siehe Bild 58 und Bild 59, zeigt nur bei den Varianten ohne Pufferschicht einen deutlichen Unterschied. Hier ist die Steifigkeit der HANV-Variante deutlich größer gegenüber der Gussasphaltvariante. Bei den Belagsvarianten mit Pufferschicht lässt sich ebenfalls erkennen, dass die HANV-Variante eine größere Steifigkeit aufweist, der Unterschied in der Steifigkeit ist jedoch deutlich geringer als bei den Varianten ohne Pufferschicht.

Um die Versuchsergebnisse auch quantitativ zu bewerten, wurden für die einzelnen Prüfkörper Verformungsmoduln bestimmt. Die teilweise erkennbaren Knicke in den Kraft-Verformung-Kurven sind auf Imperfektionen der Prüfkörper zurückzu-

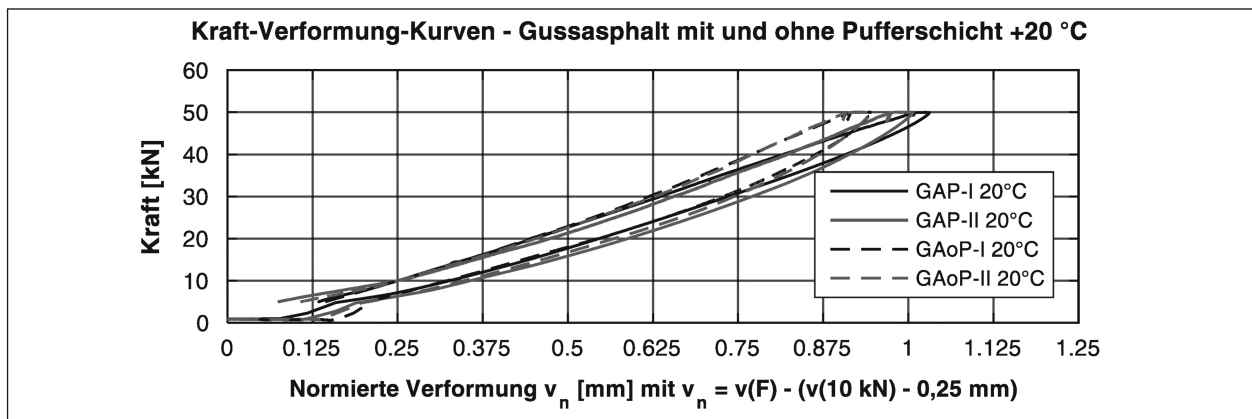


Bild 56: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper aus Gussasphalt mit und ohne Pufferschicht – statisch +20 °C

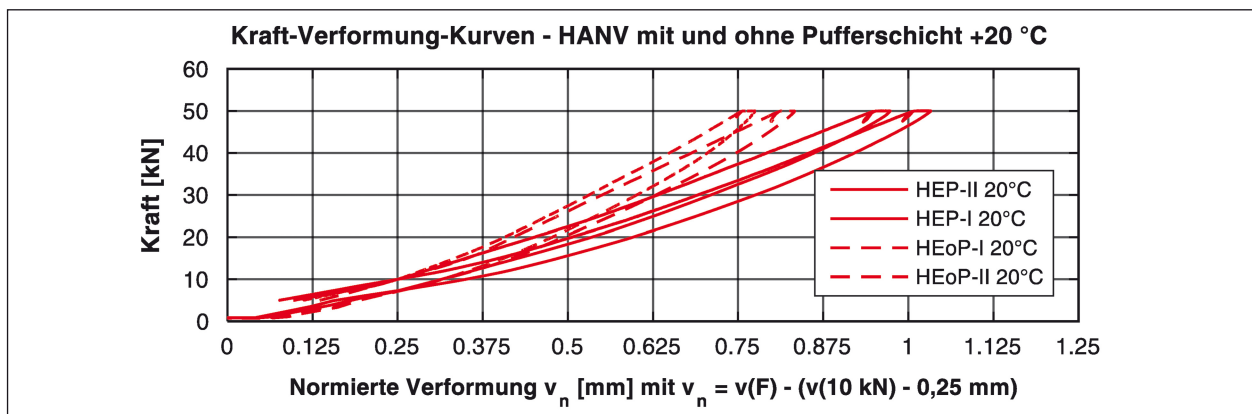


Bild 57: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper HANV-Epoxidharz mit und ohne Pufferschicht – statisch +20 °C

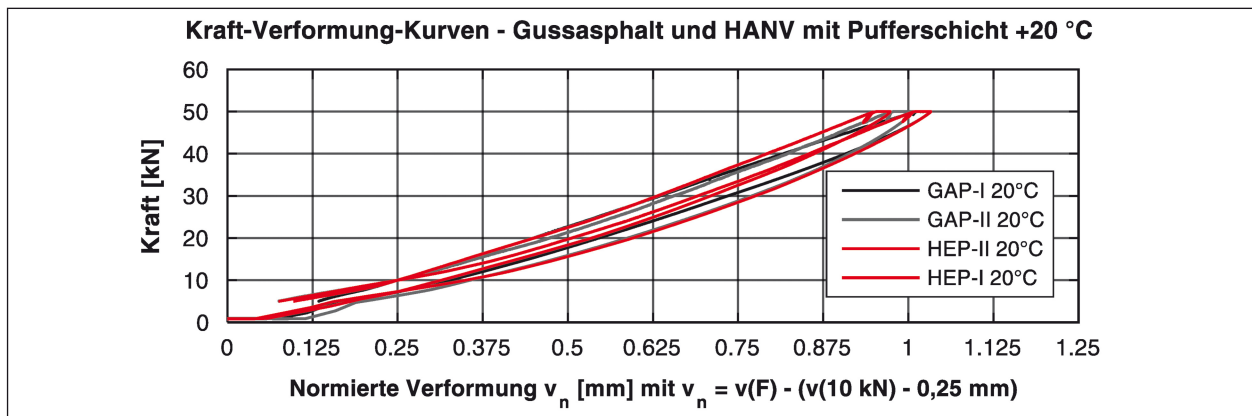


Bild 58: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper mit Pufferschicht (Gussasphalt und HANV-Epoxidharz) – statisch +20 °C

führen. Zur Eliminierung des Einflusses der Imperfektionen der Prüfkörper wurden die Verformungsmoduln erst ab einem Lastniveau von 30 kN bestimmt, ab dem anzunehmen war, dass die Prüfkörper perfekt in der Versuchsvorrichtung lagen. Hierfür wurden die zwischen den Kräften 30 kN und 50 kN liegenden Messwerte durch eine Ausgleichsgerade, siehe exemplarisch Bild 60, mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate approximiert, siehe Gleichung (13):

$$F(v_n) = m v_n + n \quad (13)$$

Die Verformungsmoduln wurden als Kehrwert der ermittelten Steigung  $m$  ermittelt. Eine Übersicht über die rechnerisch ermittelten Verformungsmoduln ist in Tabelle 10 gegeben. Neben den Verformungsmoduln sind die prozentualen Abweichungen der Verformungsmoduln der einzelnen Varianten, bezogen auf den Verformungsmodul des Referenzsystems Gussasphalt mit Pufferschicht, darge-



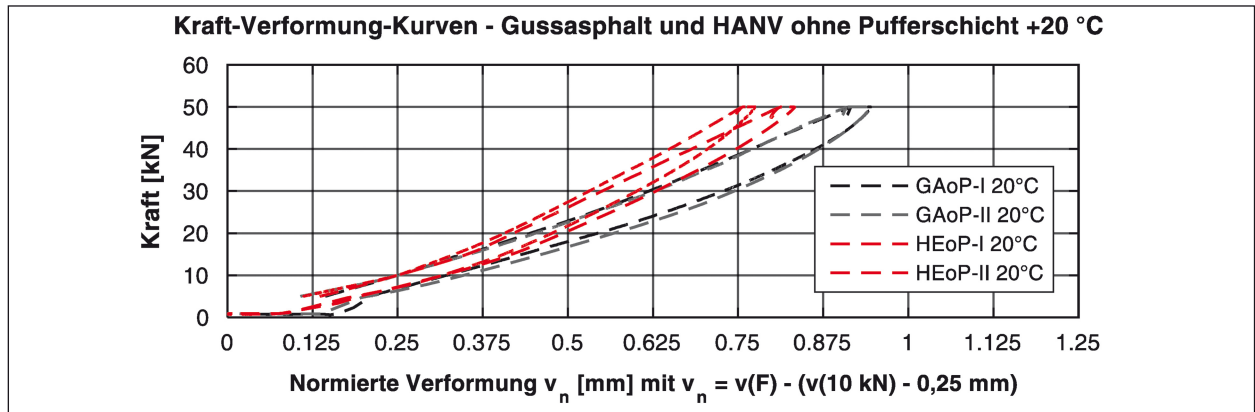


Bild 59: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper ohne Pufferschicht (Gussasphalt und HANV-Epoxidharz) – statisch +20 °C

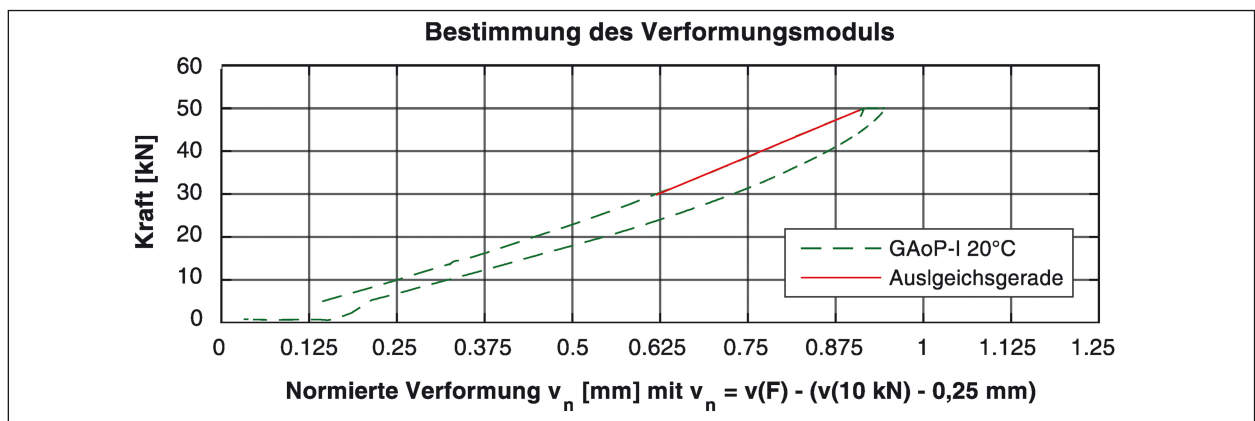


Bild 60: Exemplarische Darstellung der Ausgleichsgraden zur Bestimmung des Verformungsmoduls

| Asphalt-variante | Prüfkörper | Prüf-temperatur | Verformungs-modul | Mittelwert Verfor-mungsmodul | Abweichung der Verformungsmoduln von GAP als Referenzsystem |                        |                      |                    |
|------------------|------------|-----------------|-------------------|------------------------------|---|------------------------|----------------------|--------------------|
|                  |            | [°C]            | [mm/kN]           | [mm/kN]                      | Verhältnis Variante/GAP                                     | Prozentuale Steigerung |                      |                    |
|                  |            |                 |                   |                              |   | Min. <sup>1)</sup>     | Mittel <sup>2)</sup> | Max. <sup>3)</sup> |
| GAP              | GAP-I      | 20              | 0,019             | 0,0175                       | /   | /                      | /                    | /                  |
|                  | GAP-II     |                 | 0,016             |                              |   |                        |                      |                    |
| GAoP             | GAoP-I     | 20              | 0,015             | 0,0145                       | 0,83  | -6 %                   | -17 %                | -26 %              |
|                  | GAoP-II    |                 | 0,014             |                              |   |                        |                      |                    |
| HEP              | HEP-I      | 20              | 0,016             | 0,016                        | 0,91  | -9 %                   | -9 %                 | -9 %               |
|                  | HEP-II     |                 | 0,016             |                              |   |                        |                      |                    |
| HEoP             | HEoP-I     | 20              | 0,013             | 0,012                        | 0,69  | -19 %                  | -31 %                | -42 %              |
|                  | HEoP-II    |                 | 0,011             |                              |   |                        |                      |                    |

1) Minimale Abweichung: Größter Verformungsmodul Variante/kleinsten Verformungsmodul GAP  
2) Mittelwert: Verhältnis aus Mittelwert Variante/Mittelwert GAP  
3) Maximale Abweichung: Kleinsten Verformungsmodul Variante/größter Verformungsmodul GAP

Tab. 10: Verformungsmodul – statische Bauteilversuche bei +20 °C

stellt. Da es auch zwischen zwei Prüfkörpern einer Variante Streuungen von bis zu 20 % gibt, sind hier einmal die minimale, die maximale sowie der Mittelwert der prozentualen Abweichungen dargestellt.

Bei der Betrachtung der mittleren Abweichung lässt sich erkennen, dass die Verwendung eines Fahrbahnbelags aus HANV mit Pufferschicht eine Verringerung des Verformungsmoduls, also eine Ver-

besserung der mittragenden Wirkung des Fahr-  
bahnbelags, von 9 % liefert. Der reine Verzicht auf  
eine Pufferschicht beim Gussasphalt führt im Mittel  
zu einer Verbesserung von 17 %. Die deutlichste  
Verbesserung der mittragenden Wirkung liefert der  
HANV-Fahrbahnbelag ohne Pufferschicht, bei dem  
sich die mittragende Wirkung gegenüber dem Re-  
ferenzsystem im Mittel um 31 % Prozent erhöht.  
Auch bei der Betrachtung der minimalen Abwei-  
chungen liefert die Variante HANV ohne Puffer-  
schicht die besten Resultate. Die Erhöhung der mit-  
tragenden Wirkung beträgt hier immer noch 19 %.  
Der reine Verzicht auf die Pufferschicht beim Guss-  
asphalt erhöht die mittragende Wirkung im ungüns-  
tigsten Fall um 6 %, die Variante HANV mit Puffer-  
schicht führt im ungünstigsten Fall zu einer Erhö-  
hung der mittragenden Wirkung von 9 %.

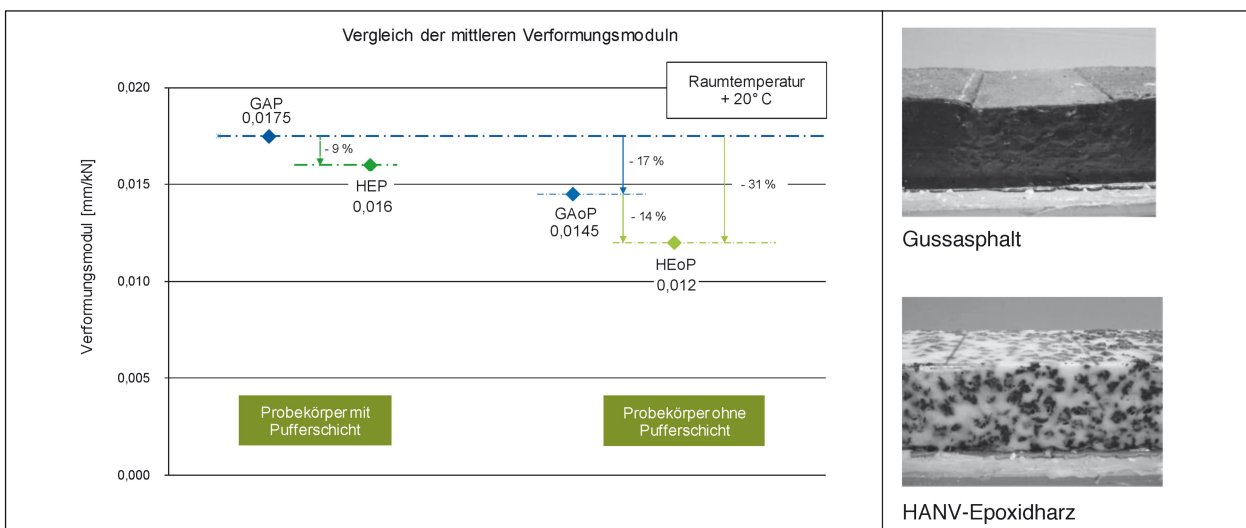
Grundsätzlich treten an den Prüfkörpern ohne  
Pufferschicht, unabhängig von der Asphaltvariante,  
geringere Verformungen an der Unterseite des  
Stahlblechs auf als an den Prüfkörpern mit Puffer-  
schicht bei gleicher Belagsart. Die gemessenen  
Verformungen an baugleichen Prüfkörpern weichen  
bei allen Varianten teilweise mit bis zu 15 % von-  
einander ab und liegen damit in einem ähnlichen  
Bereich wie die prozentualen Abweichungen der  
HANV-Varianten mit Pufferschicht zum Referenz-  
system aus Gussasphalt mit Pufferschicht. Mög-  
liche Ursachen sowie Empfehlungen zur Behebung  
solcher Streuungen sind in Kapitel 5.6 angegeben.

In Bild 61 sind die Mittelwerte der Verformungs-  
moduln der jeweils zwei gleichen Asphaltvarianten mit  
den prozentualen Abweichungen zum Referenz-  
system Gussasphalt mit Pufferschicht dargestellt.

Neben den messbaren Verformungen und dem  
Vergleich der Steifigkeiten über die Kraft-Verfor-  
mungs-Verläufe wurden auch die Bereiche der  
Lasteinleitung nach Durchführung der Versuche  
einer Sichtprüfung unterzogen. An der Asphalt-  
oberfläche der Gussasphalte, mit und ohne Puffer-  
schicht, zeichneten sich nach Versuchsende Ein-  
drückungen im Bereich der Lasteinleitung ab, siehe  
Bild 61. Die Oberflächen der HANV-Varianten  
wiesen keine sichtbare Schädigung der Oberfläche  
auf.

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass die Verfor-  
mungen an der Unterseite des Stahlblechs sowohl  
durch den Einsatz eines HANV in der Schutz- und  
Deckschicht als auch durch einen starren Verbund  
zwischen Asphalt und Deckblech durch den Ver-  
zicht auf den Einbau einer Pufferschicht reduziert  
werden. Der Einsatz eines HANV-Epoxidharzes in  
Kombination mit einem starren Verbund zwischen  
Asphalt und Stahlblech führt zu einer Reduzierung  
des Verformungsmoduls von ca. 31 % im Vergleich  
zum herkömmlich eingesetzten Belagssystem  
Gussasphalt mit Pufferschicht. Anhand der Kraft-  
Verformungs-Verläufe lässt sich erkennen, dass die  
mit Epoxidharz verfüllten Prüfkörper eine höhere  
Steifigkeit als das Referenzsystem Gussasphalt mit  
Pufferschicht aufweisen. Auch der Verzicht auf eine  
Pufferschicht erhöht die Gesamtsteifigkeit des Sys-  
tems.

Durch die Prüfung von jeweils nur zwei Prüfkörpern  
einer Variante lässt sich anhand der Ergebnisse  
allerdings lediglich eine Tendenz zur Erhöhung der  
mittragenden Wirkung durch den Einsatz von  
HANV ableiten.



**Bild 61:** Ergebnisse der statischen Bauteilversuche bei 20 °C in Anlehnung an [RAA 2015]

#### 5.4.4 Ergebnisse der statischen Versuche bei 50 °C

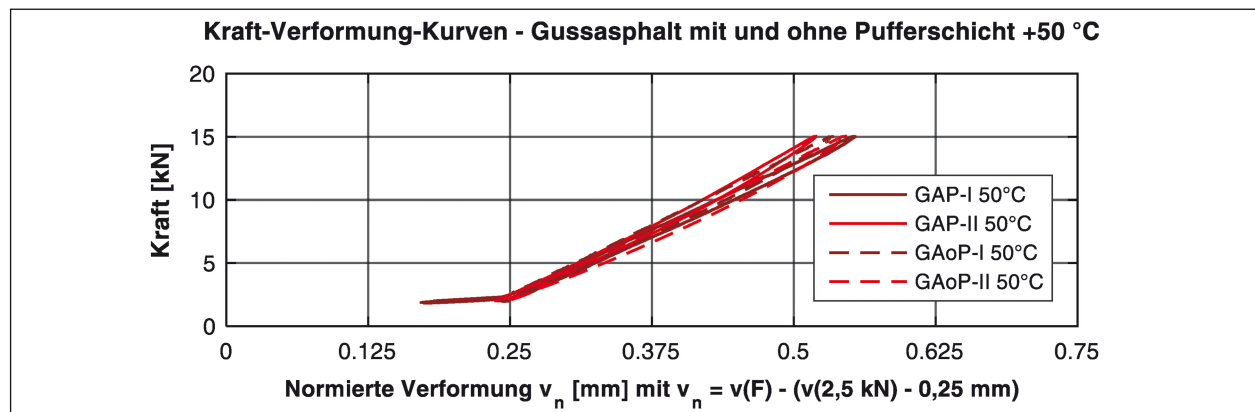
Bei der Bewertung der statischen Tragfähigkeit sind insbesondere die hohen Temperaturen, wie sie in den Sommermonaten vorkommen, von Interesse. Aus diesem Grund wurden die statischen Versuche auch bei +50 °C durchgeführt. Es wurden, wie bereits bei der Prüftemperatur +20 °C, normierte Kraft-Verformung-Kurven erstellt, aus denen Verformungsmoduln abgeleitet und miteinander verglichen wurden. Die Ergebnisse der HANV-Epoxidharze wurden denen der Referenzsysteme aus Gussasphalt gegenübergestellt und die Prüfkörper mit und ohne Pufferschicht beider Varianten aus Gussasphalt und HANV-Epoxidharz miteinander verglichen.

Die normierten Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper mit und ohne Pufferschicht sind für den Gussasphalt in Bild 62 und die HANV-Epoxidharze in Bild 63 dargestellt. Bild 64 zeigt die Verformungen der Gussasphalt- und HANV-Epoxidharz-Prüfkörper mit Pufferschicht. In Bild 65 sind die Asphaltvarianten Gussasphalt und HANV-Epoxidharz ohne

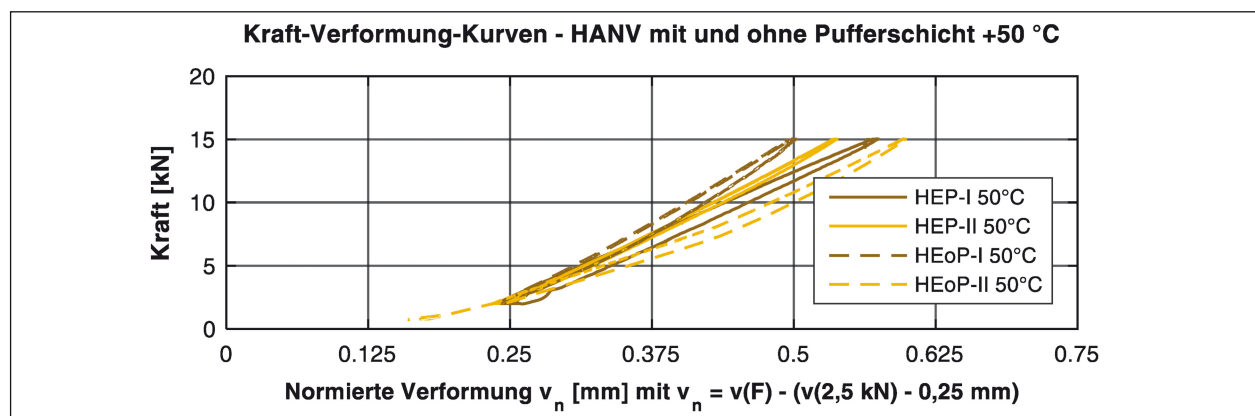
Pufferschicht gegenübergestellt und in Bild 66 die Varianten Gussasphalt mit und HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht.

Die Verläufe der normierten Kraft-Verformung-Kurven der Gussasphalte mit und ohne Pufferschicht zeigen zunächst keinen signifikanten Unterschied. Gleiches gilt für die HANV-Epoxidharz-Varianten. Aus dem Vergleich der unterschiedlichen Varianten mit und ohne Pufferschicht geht hervor, dass an den Prüfkörpern mit Pufferschicht unabhängig vom eingesetzten Asphaltbelag die Kraft-Verformung-Kurven im Mittel alle nahezu die gleiche Steigung aufweisen. Beim Vergleich der unterschiedlichen Asphaltvarianten ohne Pufferschicht lässt sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied in den Steigungen erkennen.

Bei den Vergleichen der Kraft-Verformung-Kurven und der berechneten Verformungsmoduln ist jedoch zu beachten, dass die statischen Versuche bei +50 °C auf einem, im Vergleich zu den Versuchen bei +20 °C, sehr geringen Lastniveau ausgewertet werden mussten, da die Maximallast der Versuche lediglich 15 kN betrug. Bei den



**Bild 62:** Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper Gussasphalt mit und ohne Pufferschicht – statisch +50 °C



**Bild 63:** Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper HANV-Epoxidharz mit und ohne Pufferschicht – statisch +50 °C

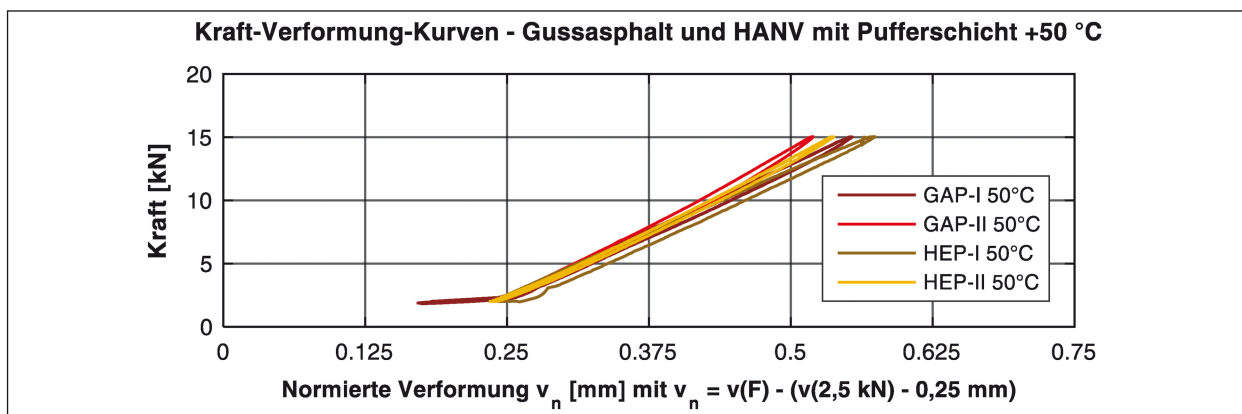


Bild 64: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper mit Pufferschicht (Gussasphalt und HANV-Epoxidharz) – statisch +50 °C

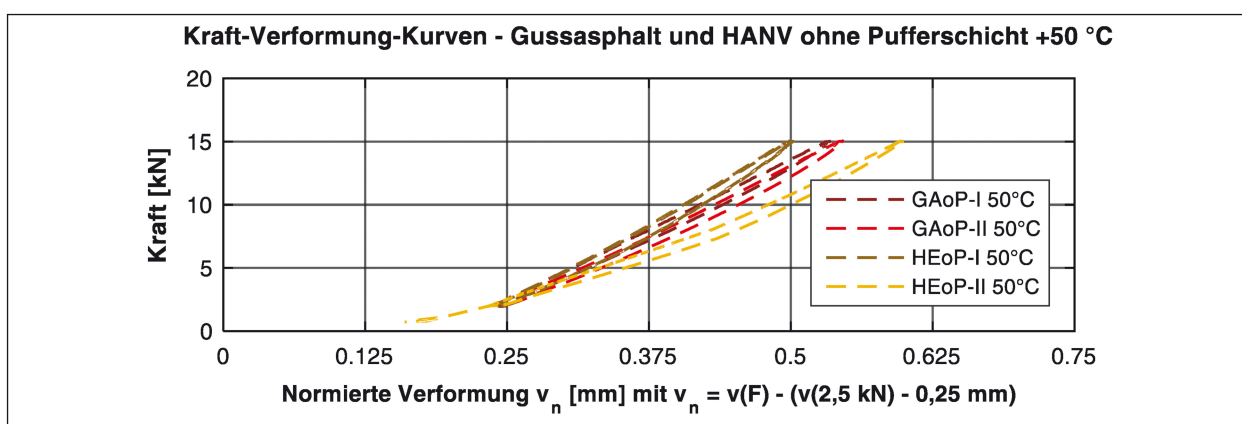


Bild 65: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper ohne Pufferschicht (Gussasphalt und HANV-Epoxidharz) – statisch +50 °C

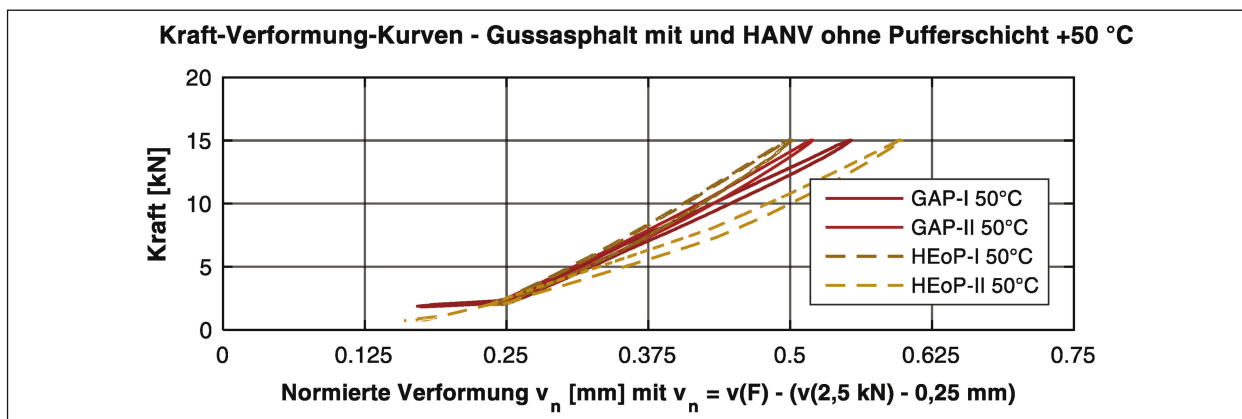


Bild 66: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper Gussasphalt mit Pufferschicht und HANV ohne Pufferschicht – statisch +50 °C

Kraft-Verformung-Kurven der Versuche bei +20 °C zeigte sich, dass erst ab einem Lastniveau von ca. 30 kN davon ausgegangen werden kann, dass die Prüfkörper perfekt im Versuchsaufbau aufliegen. Ein Einfluss von Imperfektionen auf die Versuchsergebnisse bei +50 °C kann demnach nicht ausgeschlossen werden.

In Tabelle 11 sind die rechnerisch ermittelten Verformungsmoduln dargestellt. Die Ermittlung der Verfor-

mungsmoduln erfolgte analog zu der Ermittlung bei +20 °C mit dem Unterschied, dass hier nicht der Kraftbereich zwischen 30 kN und 50 kN ausgewertet werden konnte und stattdessen der Kraftbereich zwischen 2 kN und 15 kN ausgewertet wurde.

Zunächst fällt auf, dass die beiden Prüfergebnisse der Variante HANV ohne Pufferschicht deutlich voneinander abweichen (Abweichung ca. 30 %), woraus sich durch den Vergleich der minimalen und

| Asphalt-variante | Prüfkörper | Prüf-temperatur | Verformungs-modul | Mittelwert Verfor-mungsmodul | Abweichung der Verformungsmoduln von GAP als Referenzsystem |                        |                      |                    |
|------------------|------------|-----------------|-------------------|------------------------------|---|------------------------|----------------------|--------------------|
|                  |            | [°C]            | [mm/kN]           | [mm/kN]                      | Verhältnis Variante/GAP                                     | Prozentuale Steigerung |                      |                    |
|                  |            |                 |                   |                              |   | Min. <sup>1)</sup>     | Mittel <sup>2)</sup> | Max. <sup>3)</sup> |
| GAP              | GAP-I      | 50              | 0,024             | 0,0225                       | /   | /                      | /                    | /                  |
|                  | GAP-II     |                 | 0,021             |                              |   |                        |                      |                    |
| GAoP             | GAoP-I     | 50              | 0,022             | 0,022                        | 0,98  | 0 %                    | -2 %                 | -8 %               |
|                  | GAoP-II    |                 | 0,022             |                              |   |                        |                      |                    |
| HEP              | HEP-I      | 50              | 0,025             | 0,0235                       | 1,0   | +20 %                  | 0 %                  | -8 %               |
|                  | HEP-II     |                 | 0,022             |                              |   |                        |                      |                    |
| HEoP             | HEoP-I     | 50              | 0,019             | 0,023                        | 1,0   | +28 %                  | 0 %                  | -21 %              |
|                  | HEoP-II    |                 | 0,011             |                              |   |                        |                      |                    |

1) Minimale Abweichung: Größter Verformungsmodul Variante/kleinsten Verformungsmodul GAP  
2) Mittelwert: Verhältnis aus Mittelwert Variante/Mittelwert GAP  
3) Maximale Abweichung: Kleinsten Verformungsmodul Variante/größten Verformungsmodul GAP

Tab. 11: Verformungsmoduln – statische Bauteilversuche bei +50 °C

maximalen Steigerung der Steifigkeit ein breites Streuband ergibt. Die übrigen Versuchsergebnisse weisen in etwa die gleichen Streuungen auf wie die Versuche bei +20 °C. Beim Vergleich der Mittelwerte der Verformungsmoduln aus je zwei Versuchen ist festzustellen, dass keine der untersuchten Varianten eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit gegenüber der Referenzvariante Gussasphalt mit Pufferschicht bewirkt. Aufgrund der geringen Versuchsanzahl von zwei Versuchen je Variante lässt sich aus den Ergebnissen keine klare Tendenz ableiten. Im ungünstigsten Fall führen die untersuchten Varianten zu einer Verringerung der Steifigkeit, im günstigsten Fall zu einer leichten Erhöhung. Wie bereits erwähnt ist hierbei aber zu beachten, dass die Versuche auf einem sehr niedrigen Lastniveau ausgewertet werden mussten und somit ein Einfluss von Imperfektionen auf die Versuchsergebnisse nicht auszuschließen ist.

#### 5.4.5 Bewertung der Versuchsergebnisse der statischen Bauteilversuche

Die Ergebnisse der statischen Bauteilversuche geben einen ersten Eindruck über das Verhalten von verschiedenen Asphaltbelägen unter einer stufenweise aufgebrachten Belastung. Zur Bewertung des Temperatureinflusses auf die Verformungen an der Unterseite des Stahlblechs dienen die an den normierten Kraft-Verformung-Kurven ermittelten Verformungsmoduln. Um die Ergebnisse der Versuche bei +20 °C und +50 °C miteinander vergleichen zu können und den Einfluss der Imper-

fektionen auf die Versuchsergebnisse zu bewerten, wurden die Versuche bei +20 °C noch einmal auf demselben Lastniveau wie die Versuche bei +50 °C, also mit einer Maximallast von 15 kN ausgewertet. Eine Übersicht über alle rechnerisch ermittelten Verformungsmoduln ist in Tabelle 12 dargestellt.

Beim Vergleich der Verformungsmoduln der baugleichen Varianten bei +50 °C und +20 °C lassen sich zunächst keine großen Unterschiede feststellen. Auffällig ist hierbei, dass die Verformungsmoduln bei +20 °C teilweise über denen bei +50 °C liegen, was darauf hindeutet, dass die Imperfektionen der Prüfkörper bei dem niedrigen Lastniveau zwischen 5 kN und 15 kN einen erheblichen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben. Besonders deutlich wird der Einfluss der Imperfektionen bei dem Vergleich der Verformungsmoduln der baugleichen Varianten bei +20 °C, die bei den unterschiedlichen Lastniveaus (5 kN bis 15 kN bzw. 30 kN bis 50 kN) ermittelt wurden. Zum einen sind auf dem niedrigeren Lastniveau deutlich größere Streuungen zwischen den zwei Prüfkörpern einer Varianten gegenüber dem höheren Lastniveau erkennbar. Zum anderen liegen, wie bereits erwähnt, die Verformungsmoduln, die auf dem niedrigeren Lastniveau ermittelt wurden, alle in derselben Größenordnung wie die Verformungsmoduln bei +50 °C. Prinzipiell liegen die Verformungsmoduln auf dem höheren Lastniveau deutlich unter denen des niedrigeren Lastniveaus. Außerdem lässt sich ein „Abknicken“ der Kraft-



| Prüf-<br>temperatur                         | Asphaltvariante |        |        |         |       |        |        |         |
|---|-----------------|--------|--------|---------|-------|--------|--------|---------|
|   | GAP             |        | GAoP   |         | HEP   |        | HEoP   |         |
|   | Prüfkörper      |        |        |         |       |        |        |         |
|   | GAP-I           | GAP-II | GAoP-I | GAoP-II | HEP-I | HEP-II | HEoP-I | HEoP-II |
| <b>Ausgewertet zwischen 5 kN und 15 kN</b>  |                 |        |        |         |       |        |        |         |
| 50 °C                                       | 0,024           | 0,022  | 0,022  | 0,025   | 0,022 | 0,019  | 0,027  | 0,024   |
| 20 °C                                       | 0,022           | 0,021  | 0,025  | 0,025   | 0,034 | 0,022  | 0,023  | 0,022   |
| <b>Ausgewertet zwischen 30 kN und 50 kN</b> |                 |        |        |         |       |        |        |         |
| 20 °C                                       | 0,019           | 0,015  | 0,014  | 0,016   | 0,016 | 0,013  | 0,011  | 0,019   |

Tab. 12: Verformungsmodul – statische Bauteilversuche auf verschiedenen Lastniveaus ausgewertet, in [mm/kN]

Verformung-Kurven, teilweise deutlich oberhalb des Lastniveaus von 15 kN erkennen.

Die Versuchsergebnisse werden demnach auf dem niedrigen Lastniveau mehr von den Imperfektionen der einzelnen Prüfkörper als von der Steifigkeit des aufgetragenen Fahrbahnbelags beeinflusst. Eine direkte Bewertung des Einflusses der Temperatur auf die Steifigkeit des Belags sowie ein Vergleich der unterschiedlichen Belagsvarianten bei hohen Temperaturen ist, bedingt durch das niedrigere Lastniveau der Versuche bei +50 °C, damit nicht möglich.

Die Versuche bei +20 °C zeigten, dass sich die Gesamtsteifigkeit der Prüfkörper durch die Verwendung eines Fahrbahnbelags aus HANV prinzipiell vergrößern lässt. Ein Verzicht auf die Pufferschicht führt ebenfalls zur Erhöhung der Steifigkeit. Der niedrigste Verformungsmodul und damit die größte Steifigkeit konnte durch die Verwendung eines Fahrbahnbelags aus HANV und dem Verzicht auf die Pufferschicht erreicht werden. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass sich die Lasteinleitungsplatten nach Versuchsende in die Prüfkörper aus Gussasphalt eingedrückt hatten. Bei den Prüfkörpern aus HANV konnten keine sichtbaren Schädigungen festgestellt werden. Eine quantitative Bewertung der unterschiedlichen Varianten konnte nicht vorgenommen werden, da hierfür der Prüfumfang von je zwei Prüfkörpern je Variante zu gering war.

Da die Steifigkeit des Asphaltbelags nicht nur temperatur-, sondern auch frequenzabhängig ist, sind die statischen Versuche alleine, aufgrund der sehr langsam aufgetragenen Belastung, zur Bewertung einer erhöhten mittragenden Wirkung nicht ausreichend.

Die HANV-Varianten scheinen durchaus steifer als die Gussasphalte zu sein, eindeutig konnte dies im Rahmen der statischen Bauteilversuche allerdings nicht nachgewiesen werden. Die anschließend durchgeführten dynamischen Bauteilversuche unter einer realitätsnahen schwingenden Belastung mit einer Frequenz von 2 Hz sollten weiteren Aufschluss liefern.

Bei allen Versuchsreihen ist zu beachten, dass jeweils nur zwei Prüfkörper einer Variante geprüft wurden und der Vergleich der Mittelwerte lediglich eine Tendenz zur mittragenden Wirkung des HANV gegenüber dem Gussasphalt liefert.

## 5.5 Dynamische Bauteilversuche

### 5.5.1 Allgemeines

Im Rahmen der dynamischen Bauteilversuche wurde die Dauerhaftigkeit und Elastizität der verschiedenen Asphaltvarianten aus HANV und Gussasphalt unter einer realitätsnahen, mit 2 Hz schwingenden Belastung untersucht. Mit zunehmender Steifigkeit des Asphaltbelags kann es besonders im Bereich tiefer Temperaturen zu Rissen kommen. Daher sind die Versuche bei -5 °C, siehe Kapitel 3.3, von besonderem Interesse. Neben den messbaren Verformungen an der Unterseite des Stahlblechs wurde untersucht, ob eine dynamische Beanspruchung von insgesamt 1 Millionen Lastwechseln schadlos von den verschiedenen Belagsystemen aufgenommen werden kann.

### 5.5.2 Versuchsdurchführung

Die dynamische Belastung der Prüfkörper erfolgte in Anlehnung an die Dauerschwellbiegeprüfung

nach [TP 2010]. Die Belastung entsprach einer Sinusfunktion, welche zwischen einer variierenden Oberlast  $F_O$  und der Grundlast  $F_G$  mit einer Frequenz von 2 Hz schwingt. Die Bestimmung der Oberlasten erfolgte gemäß [TP 2010], sodass sich infolge der Last am reinen Stahlblech vorgegebene Durchbiegungen von 0,95 mm bis 0,45 mm einstellten, siehe Bild 67 und Tabelle 13. Entsprechend den Vorgaben für die Dauerschwellbiegeprüfung wurde die Grundlast für jede Belastungsstufe mit 3,30 kN angesetzt. Dies entspricht 15 % der Oberlast bei einer Durchbiegung von 0,45 mm unterhalb der Lasteinleitung. Die Anzahl der Lastwechsel für jede Belastungsstufe wurde dem Belastungskollektiv nach [TP 2010] entnommen und ist ebenfalls in Tabelle 13 angegeben. Das Kollektiv besteht aus insgesamt 10.000 Lastwechseln, sodass die Prüfkörper bis zum Erreichen der geforderten 1 Millionen Lastwechsel entsprechend 100 mal damit beansprucht wurden. Der Lastzyklus begann immer mit der größten Oberlast von 46,44 kN und wurde nach Erreichen der geforderten Anzahl an Lastwechseln auf die nächst kleinere Laststufe verringert und anschließend wiederholt.

Es wurden sowohl Versuche bei einer Prüftemperatur von +20 °C als auch -5 °C mit der gleichen Belastung gefahren. Die Prüfkörper für die Versuche bei -5 °C wurden vor der Durchführung der dynamischen Versuche für 24 Stunden in einer

| Belastung [kN] | Durchbiegung [mm] | Anzahl Lastwechsel |
|----------------|-------------------|--------------------|
| 46,44          | 0,95              | 59                 |
| 41,56          | 0,85              | 59                 |
| 36,67          | 0,75              | 180                |
| 31,78          | 0,65              | 277                |
| 26,89          | 0,55              | 1.218              |
| 22,00          | 0,45              | 8.207              |

Tab. 13: Belastungsstufen der dynamischen Bauteilversuche

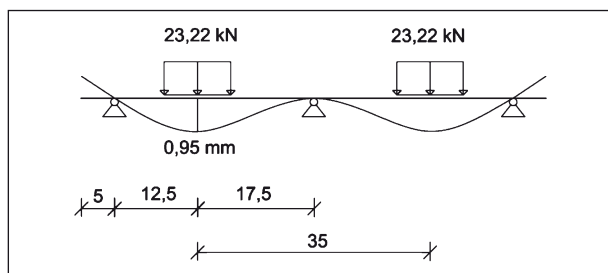


Bild 67: Statisches System – Berechnung der Oberlasten anhand von Durchbiegungen

Kühlkammer auf ca. null Grad abgekühlt. Anschließend wurden die Prüfkörper eingebaut, die Temperierkammer geschlossen und auf die Prüftemperatur -5 °C herunter gekühlt. Die Prüfkörper wurden dann über Nacht weitergekühlt und der Versuch am nächsten Morgen gestartet.

Die Durchführung der dynamischen Bauteilversuche erfolgte bezüglich des Einbaus der Prüfkörper, dem Tarieren der Wegtaster und dem Schließen der Temperierkammer analog zu den statischen Versuchen. Die Aufzeichnung der in Kapitel 4.1.1 aufgelisteten Messdaten erfolgte über die gesamte Versuchsdauer mit einer Frequenz von 50 Hz. Beim Erreichen der 1 Millionen Lastwechsel entspricht dies in Summe 25 Millionen Messwerten je Messkanal. Aufgrund der großen Datenmenge wurde nach eingehender Kontrolle des sinusförmigen, harmonischen Verlaufs von Kraft, Kolbenweg und den Verformungen über die gesamte Versuchsdauer nur ein Teil der Messdaten für die Auswertung herangezogen. Dabei wurde der jeweils letzte Belastungszyklus einer Belastungsstufe herausgeschrieben. Aus den sechs Belastungsstufen ergaben sich somit sechs Belastungszyklen, die als normierte Kraft-Verformung-Kurven geplottet und in Form von Verformungsmoduln ausgewertet wurden. Da sich bereits bei den statischen Versuchen herausstellte, dass die gemessenen Verformungen auf niedrigen Lastniveaus primär von den Imperfektionen der Prüfkörper beeinflusst werden, wurde nur die jeweils höchste Belastungsstufe herangezogen, um Verformungsmoduln zu bestimmen. Exemplarisch sind die gemittelten Verformungen am Gussasphalt-Prüfkörper mit Pufferschicht über 10.000 Lastwechseln und als Ausschnitt von je fünf Lastwechseln einer jeden Belastungsstufe in Bild 68 und Bild 69 dargestellt. Bedingt durch die Maschinensteuerung ließen sich nicht bei allen Varianten alle Lastamplituden sauber anfahren. Aus diesem Grund liegen trotz konstant eingestellter Unterlast nicht alle Minimalwerte der Verformungen auf demselben unteren Niveau.

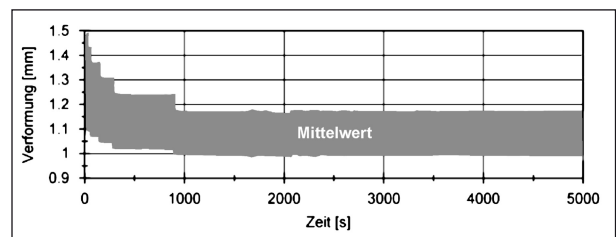
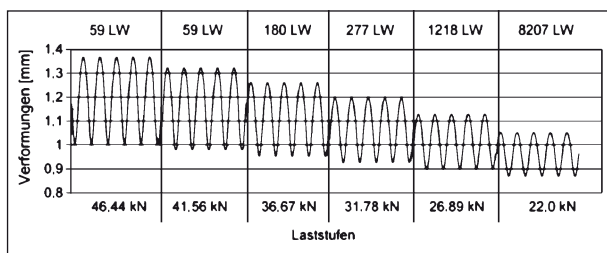


Bild 68: Verformungs-Zeit-Verlauf eines Belastungskollektivs der dynamischen Versuche



**Bild 69:** Ausschnitt einiger Lastwechsel einer jeden Belastungsstufe

Wie bei den statischen Versuchen kam es auch bei den dynamischen Versuchen teilweise zu erheblichen Streuungen innerhalb der untersuchten Varianten, vor allem bei den Gussasphalten. Um die gemessenen Verformungen besser miteinander vergleichen zu können, wurden deshalb einige Prüfkörper sowohl bei +20 °C als auch bei -5 °C getestet. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst wurden jeweils unterschiedliche Prüfkörper bei +20 °C und -5 °C getestet, um zu überprüfen, ob die jeweilige Variante die geforderten 1 Millionen Lastwechsel ohne Beschädigung übersteht. Waren die Streuungen der Messwerte zwischen den Prüftemperaturen sehr groß, wurden die bereits bei -5 °C getesteten Versuchskörper noch einmal bei +20 °C getestet, um die Verformungen besser miteinander vergleichen zu können. Eine erneute Prüfung eines bereits bei +20 °C getesteten Gussasphaltes war aufgrund der starken Schädigung der Asphaltoberfläche nicht mehr möglich.

### 5.5.3 Ergebnisse der dynamischen Versuche bei 20 °C

Neben den gemessenen Verformungen ist bei den dynamischen Versuchen von Interesse, ob die geprüften Varianten 1 Millionen Lastwechsel ohne Schaden aufnehmen können. Die Gussasphaltprüfkörper zeigten bereits nach ca. 40.000 Lastwechseln bei einer Temperatur von +20 °C Schädigungen der Asphaltoberfläche besonders im Bereich der Lasteinleitung. Nach etwa 100.000 aufgebrauchten Lastwechseln war die Schädigung an den

Gussasphalt-Prüfkörpern, sowohl mit als auch ohne Pufferschicht, so stark, siehe Bild 70, dass der Versuch vor dem Erreichen der 1 Millionen Lastwechsel beendet wurde.

Die HANV-Varianten, Epoxidharz mit und ohne Pufferschicht sowie Bioharz ohne Pufferschicht, überstanden die geforderte Anzahl von 1 Millionen Lastwechsel ohne sichtbare Schädigung. Sie scheinen bei einer Prüftemperatur von +20 °C einen höheren Widerstand gegen Verformungen und Schädigung unter Ermüdungsbeanspruchung aufzuweisen als die Gussasphalte.

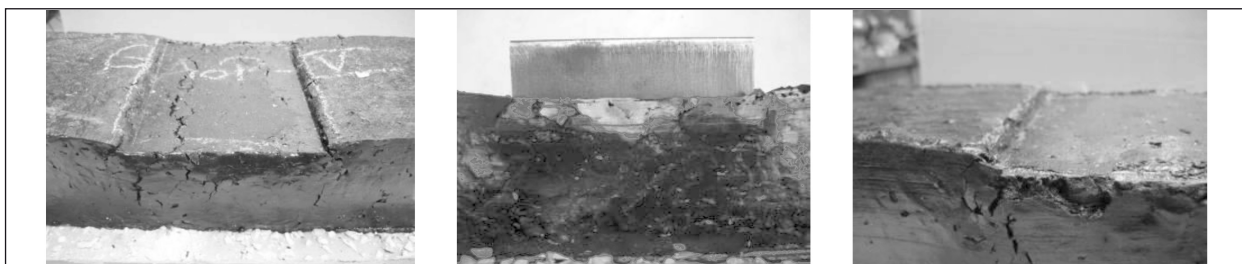
Für die Auswertung wurden, wie auch bei den statischen Versuchen, die Verformungen eines Prüfkörpers zu einem Mittelwert zusammengefasst. Zur Darstellung der normierten Kraft-Verformung-Kurven wurde aus jedem darzustellenden Belastungszyklus die minimale Verformung auf den Wert „0“ normiert.

Exemplarisch sind in Bild 71 die Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper HANV-Epoxidharz dargestellt. Die Verformungen an baugleichen Varianten wurden für einen abschließenden Vergleich zu einem Mittelwert zusammengefasst.

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse der HANV-Varianten mit denen der Referenzsysteme aus Gussasphalt sowie den Prüfkörpern mit und ohne Pufferschicht wurden die Kraft-Verformung-Kurven der einzelnen Laststufen der Lastwechsel 40.000 bis 50.000 ausgewertet. Dies entspricht etwa der maximal erreichten Anzahl an Lastwechseln der Gussasphalte, sowohl mit als auch ohne Pufferschicht, bis zum Versagen des Systems.

Ein Vergleich der Verformungen für die Lastwechsel 990.000 bis 1.000.000 an den HANV-Varianten, welche im Gegensatz zu den Gussasphalten die 1 Millionen Lastwechsel ohne Schädigung erreichten, wurde an dieser Stelle nicht geführt, da hier kein Vergleich mit dem Referenzsystem aus Gussasphalt möglich war.

Die Ergebnisse der dynamischen Bauteilversuche bei einer Prüftemperatur von +20 °C für die Last-



**Bild 70:** Schädigung der Gussasphalte nach 100.000 Lastwechseln – dynamisch 20 °C [RAA 2015]

wechsel 40.000 bis 50.000 sind in Bild 71 bis Bild 73 dargestellt. Bild 71 zeigt den Vergleich der Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper aus Guss-

asphalt mit und ohne Pufferschicht. Die Bilder 72 und 73 zeigen einen Vergleich der Kraft-Verformung-Kurven zwischen Gussasphalt und HANV-

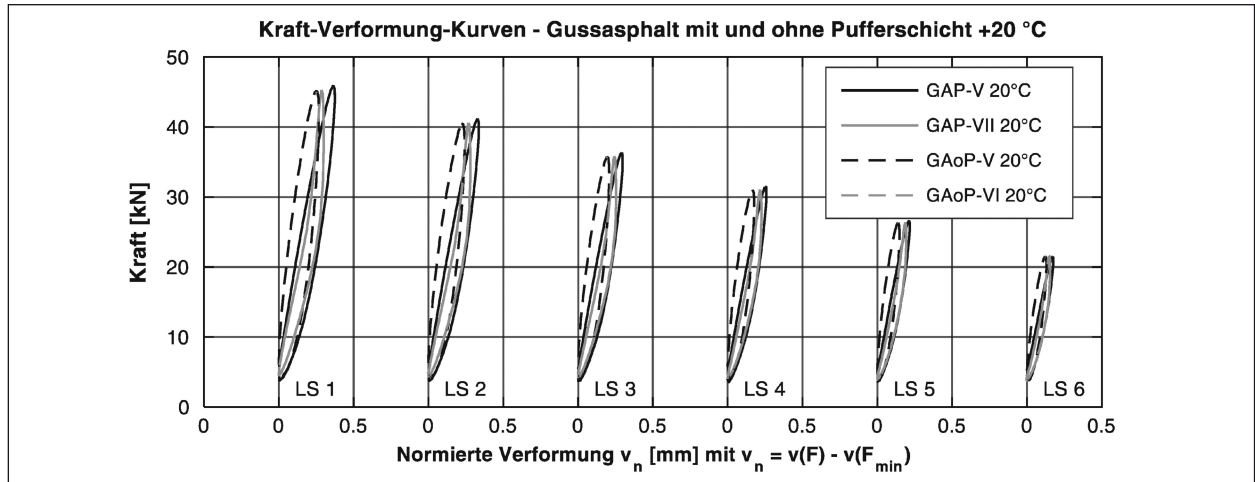


Bild 71: Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufen 1 bis 6 der Prüfkörper aus Gussasphalt – dynamisch +20 °C

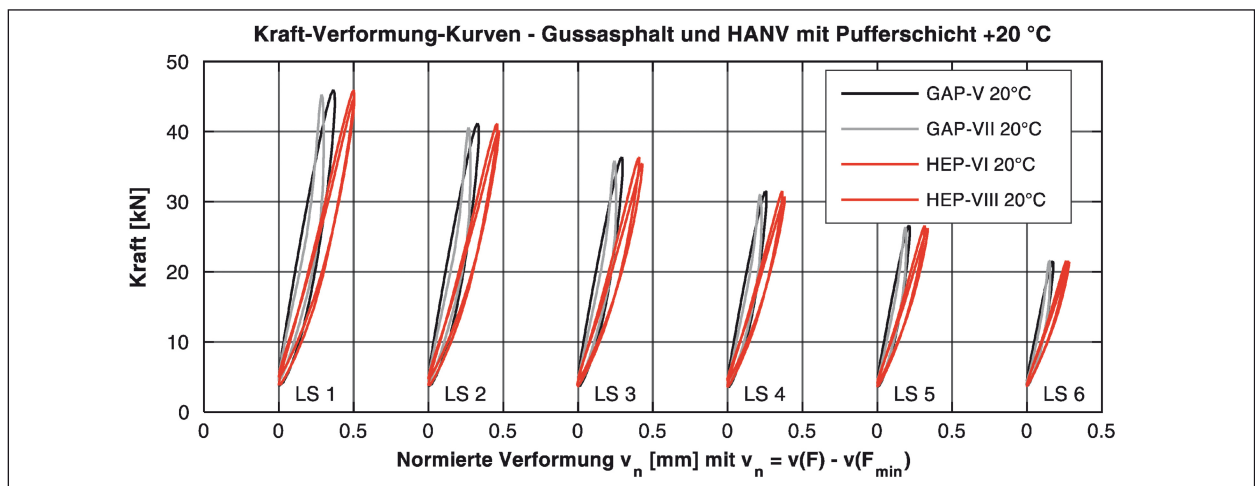


Bild 72: Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufen 1 bis 6 der Prüfkörper Gussasphalt und HANV-Epoxidharz mit Pufferschicht – dynamisch +20 °C (Lastwechsel 40.000-50.000)

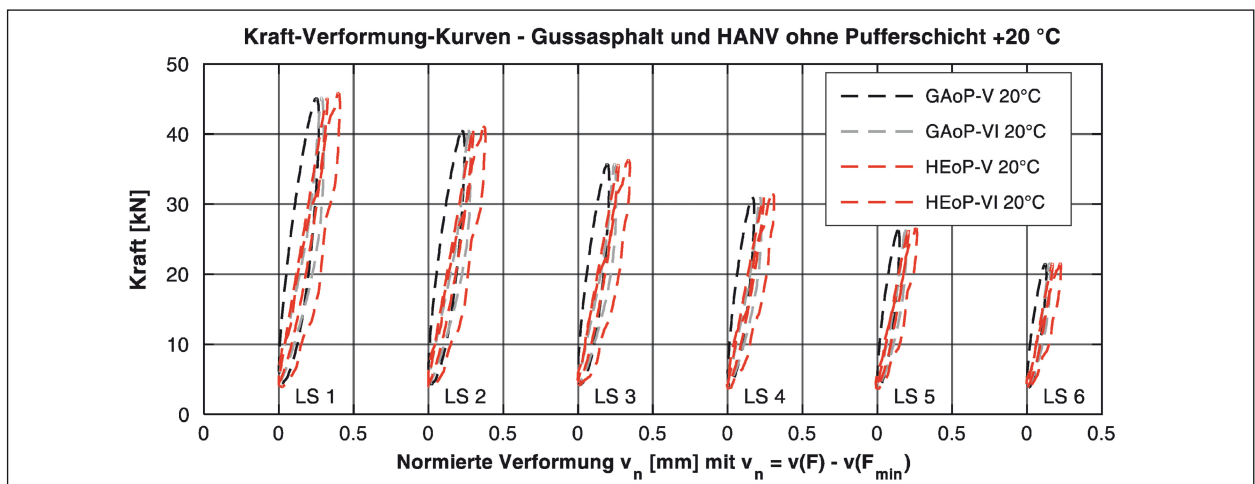


Bild 73: Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufen 1 bis 6 der Prüfkörper Gussasphalt und HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht – dynamisch +20 °C (Lastwechsel 40.000-50.000)

Epoxidharz, jeweils mit Pufferschicht und ohne Pufferschicht.

Prinzipiell lässt sich erkennen, dass der Verzicht auf die Pufferschicht zu einer Erhöhung der Steifigkeit des Prüfkörpers führt. Der Vergleich der unterschiedlichen Varianten zeigt, dass bei der mit 2 Hz aufgetragenen dynamischen Belastung die Prüfkörper aus Gussasphalt sowohl mit als auch ohne Pufferschicht einen geringeren Widerstand gegen Verformungen und Schädigungen gegenüber den HANV-Varianten aufweisen. Zur quantitativen Bewertung der Steifigkeit wurden wie bereits bei den statischen Versuchen Verformungsmoduln ermittelt. Um den Einfluss von Imperfektionen auf die Versuchsergebnisse auszuschließen, wurden die Verformungsmoduln nur für die erste Laststufe, wie bei den statischen Versuchen zwischen 30 kN und der jeweiligen Maximallast bestimmt. Die Verformungsmoduln sind in Tabelle 14 dargestellt.

Aus dem Vergleich der Verformungsmoduln ergibt sich, dass sich durch den Verzicht auf die Pufferschicht beim Gussasphalt die größte Steigerung der mittragenden Wirkung erzielen lässt. Der mittlere Verformungsmodul von HANV-Epoxidharz mit Pufferschicht liegt deutlich über dem Verformungsmodul des Referenzsystems. Der Verzicht auf die Pufferschicht wirkt sich auch bei der HANV-Epoxidharz-Variante positiv auf die mittragende Wirkung aus. Der ermittelte Verformungsmodul liegt jedoch immer noch über dem des Referenzsystems aus Gussasphalt mit Pufferschicht.

Die Ergebnisse der dynamischen Bauteilversuche bei +20 °C zeigen, dass sich die mittragende Wirkung des Asphaltbelags am deutlichsten durch den Verzicht auf die Pufferschicht erhöhen lässt. Der Einsatz eines HANV-Belags mit Pufferschicht führt unter der dynamischen Belastung zu einer deutlichen Verschlechterung des Verformungsverhaltens. Durch den Verzicht auf die Pufferschicht lässt sich die mittragende Wirkung des HANV-Belags erhöhen. Bei reiner Betrachtung der Verformungseigenschaften wird die mittragende Wirkung des Gussasphaltes jedoch nicht erreicht.

Im Bereich von 40.000 bis 50.000 Lastwechseln besitzt der Gussasphalt ohne Pufferschicht die größte mittragende Wirkung. Allerdings ist zu beachten, dass die HANV-Epoxidharz-Prüfkörper im Gegensatz zu den Gussasphaltvarianten die 1 Millionen Lastwechsel ohne sichtbare Schädigung überstehen.

#### 5.5.4 Ergebnisse der dynamischen Versuche bei -5 °C

Bei den dynamischen Versuchen bei -5 °C erreichten alle Prüfkörper (Gussasphalt, HANV-Epoxid und HANV-Bio) die geforderte Anzahl von 1 Millionen Lastwechsel ohne sichtbare Schädigung des Systems. Für die Erstellung der Kraft-Verformungskurven und die Bestimmung der Verformungsmoduln der verschiedenen Asphaltvarianten sowie den Vergleich der Prüfkörper mit und ohne Pufferschicht wurden wie bei den dynamischen Versuchen bei +20 °C jeweils der letzte Belastungs-

| Asphalt-variante | Prüfkörper | Prüftemperatur | Verformungsmodul | Mittelwert Verformungsmodul | Abweichung der Verformungsmoduln von GAP als Referenzsystem |                        |                      |                    |
|------------------|------------|----------------|------------------|-----------------------------|---|------------------------|----------------------|--------------------|
|                  |            | [°C]           | [mm/kN]          | [mm/kN]                     | Verhältnis Variante/GAP                                     | Prozentuale Steigerung |                      |                    |
|                  |            |                |                  |                             |   | Min. <sup>1)</sup>     | Mittel <sup>2)</sup> | Max. <sup>3)</sup> |
| GAP              | GAP-V      | 20             | 0,0050           | 0,0036                      | /   | /                      | /                    | /                  |
|                  | GAP-VII    |                | 0,0021           |                             |   |                        |                      |                    |
| GAoP             | GAoP-V     | 20             | 0,0022           | 0,0022                      | 0,44  | +5 %                   | <b>-39 %</b>         | -58 %              |
|                  | GAoP-VI    |                | 0,0021           |                             |   |                        |                      |                    |
| HEP              | HEP-VI     | 20             | 0,0081           | 0,0076                      | 1,52  | +286 %                 | <b>+111 %</b>        | +42 %              |
|                  | HEP-VIII   |                | 0,0071           |                             |   |                        |                      |                    |
| HEoP             | HEoP-V     | 20             | 0,0051           | 0,0056                      | 1,12  | +190 %                 | <b>+56 %</b>         | +2 %               |
|                  | HEoP-VI    |                | 0,0061           |                             |   |                        |                      |                    |

1) Minimale Abweichung: Größter Verformungsmodul Variante/kleinsten Verformungsmodul GAP  
2) Mittelwert: Verhältnis aus Mittelwert Variante/Mittelwert GAP  
3) Maximale Abweichung: Kleinsten Verformungsmodul Variante/größter Verformungsmodul GAP

Tab. 14: Verformungsmoduln – statische Bauteilversuche bei +20 °C



zyklus einer jeden Belastungsstufe ausgewertet. Da bei  $-5\text{ °C}$  alle Versuchskörper 1 Millionen Lastwechsel ohne Schädigung überstanden, wurden hier die einzelnen Laststufen der Lastwechsel 990.000 bis 1.000.000 ausgewertet. Anhand der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass die Verformungen an der Unterseite des Stahlblechs erwartungsgemäß bei allen Asphaltvarianten über die Versuchsdauer leicht zunehmen, vorausgesetzt der Versuch wurde nicht unterbrochen.

Die Verformungen der vier Weglaster wurden zu einem Mittelwert zusammengefasst. Exemplarisch sind in Bild 74 die Kraft-Verformung-Kurven der Gussasphalte mit und ohne Pufferschicht dargestellt.

Eine Gegenüberstellung der Kraft-Verformung-Kurven der Gussasphalte mit den HANV-Varianten mit und ohne Pufferschicht ist in den Bildern 75 und 76 dargestellt.

Bild 75 zeigt die Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper mit Pufferschicht, Gussasphalt und HANV-Epoxidharz. In Bild 76 sind die Kraft-Verformung-Kurven der HANV-Epoxidharze ohne Pufferschicht denen der Gussasphalte ohne Pufferschicht gegenübergestellt.

Im Gegensatz zu den Versuchen bei  $+20\text{ °C}$  lassen sich aus der reinen Betrachtung der Kraft-Verformung-Kurven nur wenig Rückschlüsse auf die Steifigkeit der einzelnen Asphaltvarianten ziehen. Vom prinzipiellen Verlauf her scheinen sich die Steifigkeiten der Einzelvarianten kaum zu unterscheiden. Dies ist jedoch der Skalierung der Darstellung der Kraft-Verformung-Kurven für alle 6 Belastungsstufen geschuldet. Eine weniger stark skalierte Darstellung der Kraft-Verformung-Kurven für den Belastungszyklus 1 für die Asphaltvarianten Gussasphalt und HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht ist exemplarisch in Bild 77 dargestellt. Während die

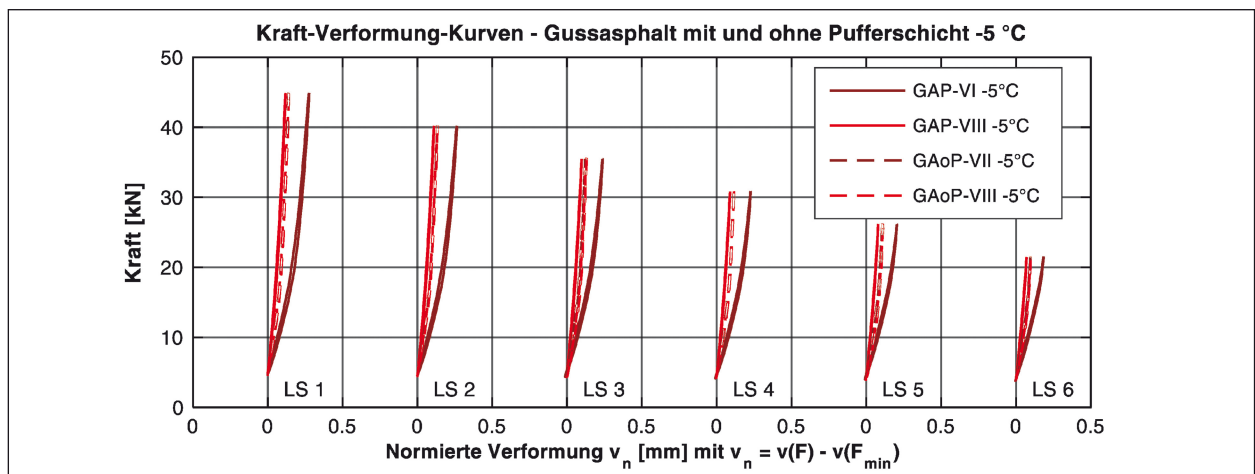


Bild 74: Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufen 1 bis 6 der Prüfkörper aus Gussasphalt – dynamisch  $-5\text{ °C}$

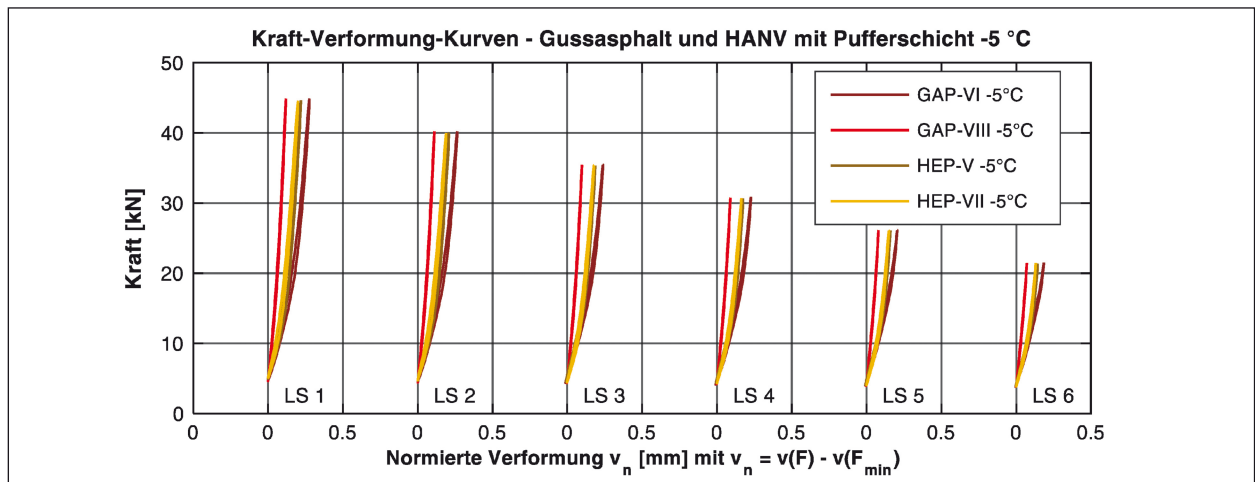
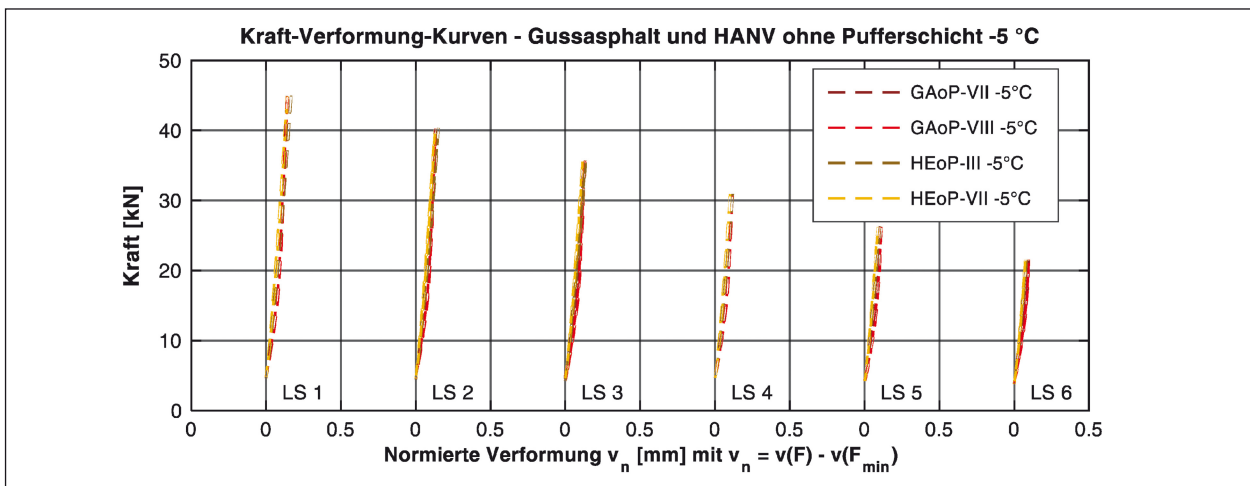
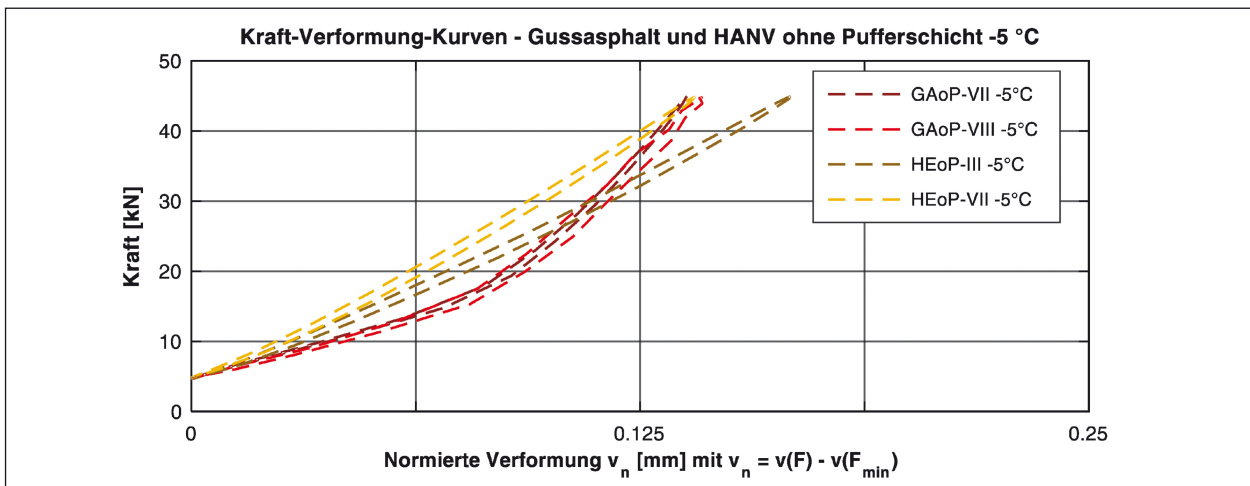


Bild 75: Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufen 1 bis 6 der Prüfkörper aus Gussasphalt und HANV-Epoxidharz mit Pufferschicht – dynamisch  $-5\text{ °C}$  (Lastwechsel 990.000-1.000.000)



**Bild 76:** Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufen 1 bis 6 der Prüfkörper aus Gussasphalt und HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht – dynamisch -5 °C (Lastwechsel 990.000-1.000.000)



**Bild 77:** Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufe 1 der Prüfkörper Gussasphalt und HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht – dynamisch -5 °C

Kraft-Verformung-Kurven der ersten Laststufe in Bild 76 vom Verlauf her für alle Varianten identisch aussehen, ist bei der Vergrößerung derselben Kraft-Verformung-Kurven in Bild 77 ein deutlicher Unterschied in den Verläufen erkennbar. Dieser drückt sich auch in den deutlich unterschiedlichen Verformungsmoduln aus, die analog zu den Verformungsmoduln bei +20 °C ermittelt wurden. Aus diesem Grund wurden bei der Bewertung der Versuchsergebnisse der dynamischen Versuche bei -5 °C ausschließlich die rechnerisch ermittelten Verformungsmoduln betrachtet. Die Verformungsmoduln für alle Varianten sind in Tabelle 15 dargestellt.

Im Mittel liefert die Asphaltvariante Gussasphalt ohne Pufferschicht die niedrigsten Verformungsmoduln und somit die höchste Steifigkeit. Der Mittelwert des Verformungsmoduls liegt 28 %

unter dem Verformungsmodul des Referenzsystems Gussasphalt mit Pufferschicht. Die Variante HANV-Epoxidharz weist im Mittelwert größere Verformungsmoduln gegenüber dem Referenzsystem auf. Die größten Verformungsmoduln wurden für die Variante HANV-Epoxidharz ohne Pufferschicht bestimmt. Der Mittelwert des Verformungsmoduls dieser Variante lag über dem mittleren Verformungsmodul des Referenzsystems.

Im Gegensatz zu den Versuchen bei +20 °C sind die bei -5 °C ermittelten Verformungsmoduln nur bei den Gussasphalten ohne Pufferschicht geringer als bei denen mit Pufferschicht. Bei den Varianten HANV-Epoxidharz weisen die Prüfkörper ohne Pufferschicht größere Verformungsmoduln gegenüber den Prüfkörpern mit Pufferschicht auf.

| Asphalt-variante | Prüfkörper | Prüf-temperatur | Verformungs-modul | Mittelwert Verfor-mungsmodul | Abweichung der Verformungsmoduln von GAP als Referenzsystem |                        |                      |                    |
|------------------|------------|-----------------|-------------------|------------------------------|---|------------------------|----------------------|--------------------|
|                  |            |                 |                   |                              | Verhältnis Variante/GAP                                     | Prozentuale Steigerung |                      |                    |
|                  |            | [°C]            | [mm/kN]           | [mm/kN]                      |   | Min. <sup>1)</sup>     | Mittel <sup>2)</sup> | Max. <sup>3)</sup> |
| GAP              | GAP-VI     | -5              | 0,0031            | 0,0025                       | /   | /                      | /                    |                    |
|                  | GAP-VIII   |                 | 0,0019            |                              |   |                        |                      |                    |
| GAoP             | GAoP-VII   | -5              | 0,0017            | 0,0018                       | 0,72  | +0 %                   | <b>-28 %</b>         | -45 %              |
|                  | GAoP-VIII  |                 | 0,0019            |                              |   |                        |                      |                    |
| HEP              | HEP-V      | -5              | 0,0027            | 0,0027                       | 1,08  | +42 %                  | <b>+8 %</b>          | -13 %              |
|                  | HEP-VII    |                 | 0,0027            |                              |   |                        |                      |                    |
| HEoP             | HEoP-III   | -5              | 0,0034            | 0,0032                       | 1,28  | +79 %                  | <b>+28 %</b>         | -6 %               |
|                  | HEoP-VII   |                 | 0,0029            |                              |   |                        |                      |                    |

1) Minimale Abweichung: Größter Verformungsmodul Variante/kleinsten Verformungsmodul GAP  
2) Mittelwert: Verhältnis aus Mittelwert Variante/Mittelwert GAP  
3) Maximale Abweichung: Kleinsten Verformungsmodul Variante/größten Verformungsmodul GAP

Tab. 15: Verformungsmodul – statische Bauteilversuche bei -5 °C

### 5.5.5 Bewertung der Versuchsergebnisse der dynamischen Bauteilversuche

Bis auf die Gussasphalte, die bei +20 °C im Bereich der Lasteinleitung versagten, konnten alle untersuchten Varianten sowohl bei +20 °C als auch bei -5 °C die geforderten 1 Millionen Lastwechsel ohne sichtbare Schädigung aufnehmen. Der Vergleich der Verformungsmoduln zeigt, dass der untersuchte Gussasphalt unter dynamischer Belastung im Bereich von 40.000 bis 50.000 Lastwechseln eine höhere Steifigkeit gegenüber den HANV-Varianten aufweist, obwohl dieser bei +20 °C vorzeitig versagte. Eine Übersicht über alle rechnerisch ermittelten Verformungsmoduln ist in Bild 78 dargestellt.

Bild 78 zeigt, dass unabhängig von der Prüftemperatur lediglich die Belagsvariante Gussasphalt ohne

Pufferschicht zu einer Erhöhung der Steifigkeit unter dynamischer Beanspruchung führt. Die untersuchten HANV-Varianten weisen jeweils höhere Verformungsmoduln gegenüber dem Referenzsystem Gussasphalt mit Pufferschicht auf. Unter Berücksichtigung der Streuungen der einzelnen Prüfkörper, siehe Tabelle 14 und Tabelle 15, ergibt sich für einzelne Prüfkörper der HANV-Varianten zwar eine Erhöhung der Steifigkeit gegenüber der des Referenzsystems, diese liegen jedoch immer noch unter der Steifigkeit der Variante Gussasphalt ohne Pufferschicht.

Die Ergebnisse der dynamischen Bauteilversuche zeigen, dass durch den Verzicht auf den Einbau einer Pufferschicht die Verformungen an der Stahlblechunterseite reduziert werden können. Die größte Reduzierung wurde durch den Einsatz eines Gussasphalts in Kombination mit einem starren

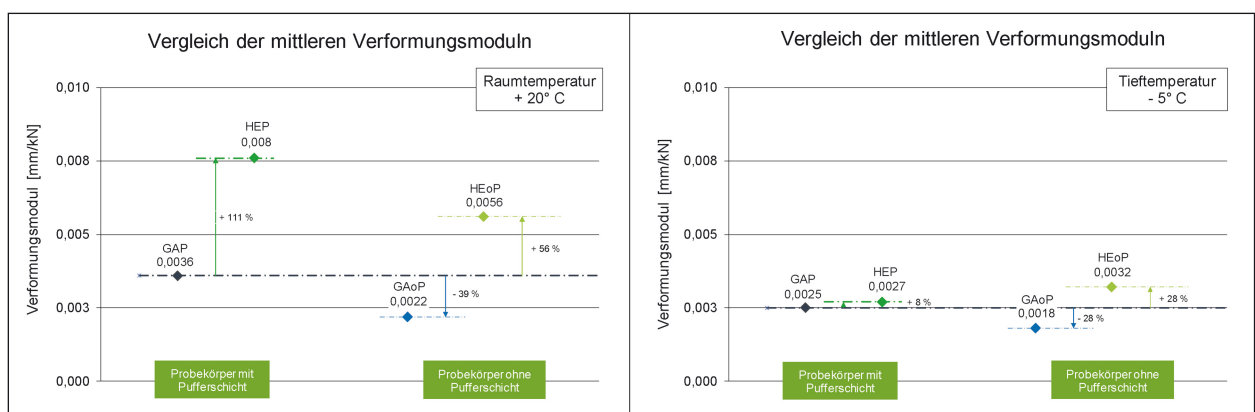


Bild 78: Mittelwerte der ermittelten Verformungsmoduln – links Raumtemperatur +20 °C – rechts Tieftemperatur -5 °C

Verbund zwischen Stahlblech und Asphaltbelag erzielt. Bei allen Versuchsreihen ist zu beachten, dass jeweils nur zwei Prüfkörper einer Variante geprüft wurden und der Vergleich der Mittelwerte lediglich eine Tendenz zur mittragenden Wirkung des HANV gegenüber dem Gussasphalt liefert. Bei reiner Betrachtung des Verformungsverhaltens, also ohne Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit, zeigte bei allen dynamisch geprüften Varianten die Variante Gussasphalt ohne Pufferschicht die größte Steifigkeit.

Der Vergleich über die maximal aufnehmbare Anzahl an Lastwechseln zeigte allerdings auch, dass die HANV-Varianten sowohl bei +20 °C als auch -5 °C die geforderte Anzahl von 1 Millionen Lastwechseln ohne sichtbare Schädigung am Prüfkörper aufnehmen können, die Gussasphalte mit und ohne Pufferschicht jedoch bei +20 °C bereits nach ca. 40.000 Lastwechseln versagten. Die Pufferschicht hat dabei keinerlei Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Prüfkörper. Die Oberfläche der HANV-Varianten übersteht die 1 Millionen Lastwechseln ohne Eindrückungen des Asphaltbelags, sodass unabhängig von der Prüftemperatur grundsätzlich eine gleichbleibende Lastverteilung unter einem Winkel von 45° sichergestellt zu sein scheint. Bei den Gussasphalten dagegen wird die Lastverteilung infolge der Eindrückungen im Asphalt verkleinert, daraus resultiert eine erhöhte lokale Beanspruchung des Stahldeckblechs. In Bezug auf die Dauerhaftigkeit scheint der HANV-Belag demnach günstigere Eigenschaften gegenüber dem Gussasphalt aufzuweisen.

Für alle untersuchten Varianten konnte gezeigt werden, dass sie auch im Bereich tiefer Temperaturen ausreichend elastisch sind und auch beim Verzicht auf die Pufferschicht 1 Millionen Lastwechseln ohne sichtbare Schädigung aufgenommen werden können.

## 5.6 Probleme/Empfehlungen

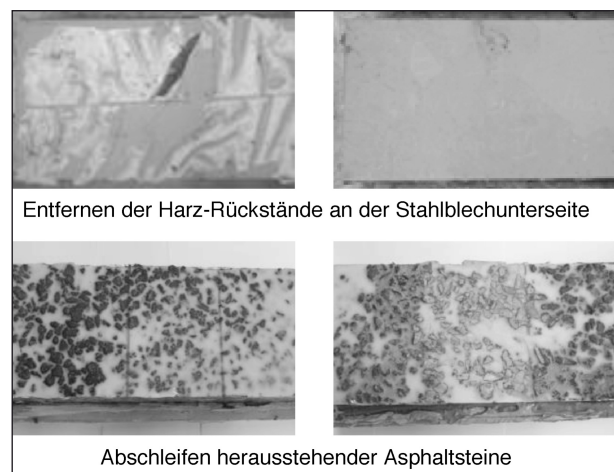
Bei der Durchführung und Auswertung der Kleinteilversuche traten teilweise erheblich Streuungen bei den gemessenen Verformungen auch innerhalb einer untersuchten Variante auf. Mögliche, zu vermeidende Ursachen sowie Empfehlungen zur Verbesserung der Prüfkörperherstellung werden im Folgenden gegeben.

Besonders bei den HANV-Epoxidharzen führten herausstehende Steine an der Asphaltoberfläche

und Harz-Rückstände an der Unterseite des Stahlblechs, welche vor Versuchsbeginn entfernt werden mussten, zu einem erheblichen Mehraufwand, siehe Bild 79.

Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Lasteinleitung ist eine ebene Asphaltoberfläche besonders im Bereich der Auflagefläche der Lasteinleitungsplatten wichtig. Zudem ist die Unterseite des Stahlblechs von Harz und/oder Asphalt-Rückständen zu befreien, um den vollständigen Kontakt zwischen den Auflagerrollen und dem Stahlblech sowie den Wegastern und dem Stahlblech sicherzustellen.

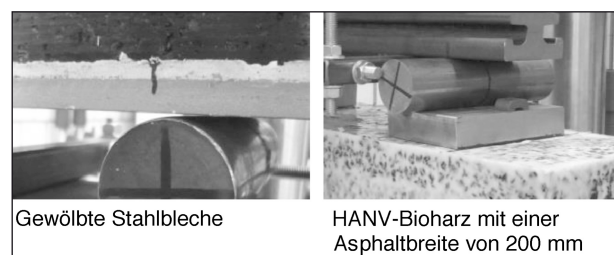
Ursächlich für weitere Messungenauigkeiten waren leicht tordierte oder gewölbte Stahlbleche einiger Prüfkörper, wodurch diese nicht exakt auf den unteren Auflagerrollen ausgerichtet werden konnten, siehe Bild 80. Ein vollständiger Kontakt zwischen Stahlblech und Auflagerrolle war nicht bei allen Prüfkörpern durch das Andrücken mit minimaler Kraft sicherzustellen, sondern wurde teilweise erst mit dem Aufbringen der statischen oder dynamischen Belastung während der Versuchsdurchführung erreicht. Durch unterschiedliche Wölbungen der einzelnen Prüfkörper war es nicht möglich, generell einen bestimmten Wert von



Entfernen der Harz-Rückstände an der Stahlblechunterseite

Abschleifen herausstehender Asphaltsteine

**Bild 79:** Beseitigung der Störfaktoren an den HANV-Epoxidharzen [RAA 2015]



Gewölbte Stahlbleche

HANV-Bioharz mit einer Asphaltbreite von 200 mm

**Bild 80:** Messungenauigkeiten [RAA 2015]

den Verformungen abzuziehen und die Varianten damit vergleichbarer zu machen.

Bei den dynamischen Bauteilversuchen kam es unplanmäßig bei einigen Prüfkörpern zu Unterbrechungen des Versuches (z. B. durch Stromausfall), sodass nicht immer die Möglichkeit bestand, die Versuche über die gesamte Dauer von ca. sieben Tagen (inklusive Vorkühlung) zu fahren. Dies führte teilweise dazu, dass am Versuchsende geringere Verformungen gemessen wurden als zu Versuchsbeginn. Das liegt hauptsächlich daran, dass die Prüfkörper durch die Lagerung und die unterschiedlichen Vorverformungen des Stahlblechs nicht immer exakt gleich eingebaut werden konnten. Bei den Versuchen, die über die gesamte Dauer gefahren wurden, nahmen die Verformungen kontinuierlich zu.

Für einen optimalen Vergleich verschiedener Asphaltbeläge ist es zudem sinnvoll, alle Prüfkörper einer Versuchscharge mit den gleichen Abmessungen herzustellen. Das Auftragen des HANV-Bioharzes über die gesamte Breite (200 mm) des Stahlblechs machte einen Vergleich der Verformungen mit den Varianten aus Gussasphalt und HANV-Epoxidharz (Asphaltbreite 150 mm) nicht möglich. Durch die nur 150 mm breiten Lastverteilungsplatten konnte zudem während der statischen und dynamischen Bauteilversuche die Last nicht über die gesamte Breite des HANV-Bioharz-Belags aufgebracht werden, siehe Bild 80. Eine Aussage darüber, welches Füllmaterial, HANV-Epoxidharz oder HANV-Bioharz, besser geeignet ist, um die mittragende Wirkung des Fahrbahnbelags zu erhöhen, kann daher auch nach Durchführung der Bauteilversuche nicht getroffen werden.

Prinzipiell erscheint es sinnvoll, von dem Versuchsaufbau nach [TP 2010] dahingehend abzuweichen, dass der Asphaltbelag nicht über eine Breite von 150 mm, sondern über die komplette Breite der Stahlbleche von 200 mm aufgebracht wird. Eine derartige Modifizierung des Versuchsaufbaus brächte den Vorteil, dass sich Haftschrift und Asphaltbelag großflächig auftragen ließen und die Prüfkörper erst abschließend ausgesägt werden könnten, was in der Herstellung wesentlich einfacher ist und zu besseren Ergebnissen führt.

Für einen aussagekräftigen Nachweis zur Erhöhung der mittragenden Wirkung durch den Einsatz eines HANV gegenüber dem herkömmlich eingesetzten Gussasphalt ist eine Prüfung von zwei

Prüfkörpern einer Asphaltvariante sowohl bei den statischen als auch den dynamischen Bauteilversuchen nicht ausreichend.

Eine Prüfung von mindestens drei Prüfkörpern wäre für die Bestimmung eines Mittelwertes aus den Verformungen der einzelnen Prüfkörper empfehlenswert. Da die Steifigkeit der Beläge sowohl temperatur- als auch frequenzabhängig ist, scheint die Durchführung von dynamischen Bauteilversuchen bei verschiedenen Prüftemperaturen ausreichend, um das Verformungsverhalten und die Dauerhaftigkeit von HANV mit denen des Gussasphaltes zu vergleichen und zu bewerten. Dies bedeutet, dass die Durchführung von statischen Versuchen nicht zwingend erforderlich ist.

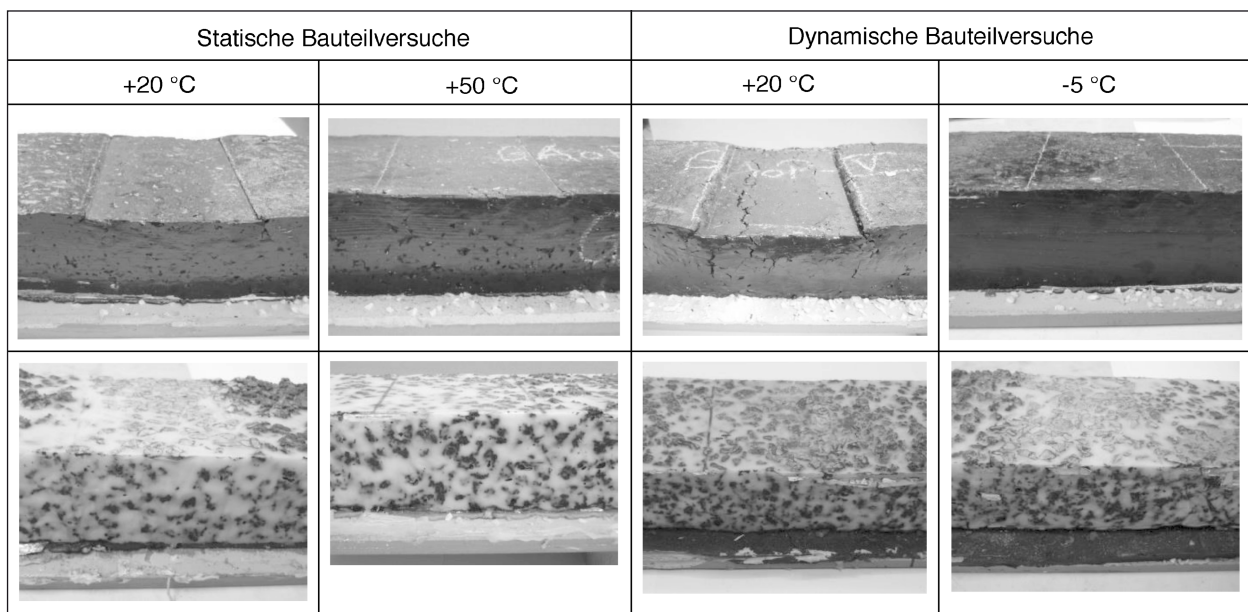
Voraussetzung für weitere Kleinbauteilprüfungen wäre eine Optimierung der Herstellung der Prüfkörper wie z. B. oben beschrieben, sodass keine Messungenauigkeiten infolge der Unebenheiten an den Prüfkörpern selber auftreten.

## 5.7 Gesamtbewertung der mittragenden Wirkung

Im Rahmen von insgesamt 20 statischen und 20 dynamischen Kleinbauteilversuchen sollte untersucht werden, ob eine erhöhte mittragende Wirkung durch den Einsatz eines HANV in Schutz- und Deckschicht nachgewiesen werden kann. Aus den aufgezeichneten Verformungen wurden hierfür Kraft-Verformung-Kurven erstellt, aus denen Verformungsmoduln ermittelt und miteinander verglichen wurden. Zusätzlich wurde die Dauerhaftigkeit der verschiedenen Asphaltvarianten über die maximal aufnehmbare Anzahl an Lastwechseln bis zum Versagen des Systems untersucht. Neben dem Vergleich der HANV-Beläge mit den Referenzsystemen aus Gussasphalt wurden auch die Varianten mit und ohne Pufferschicht verglichen, um den Einfluss eines starren Verbunds zwischen Stahlblech und Asphalt auf die Verformungen an der Stahlblechunterseite zu erfassen.

Die Ergebnisse der Bauteilversuche zeigen, dass die Gussasphalt-Prüfkörper (mit und ohne Pufferschicht) ab einer Temperatur von ca. +20 °C sowohl unter einer langsam aufgebrachten statischen Beanspruchung als auch unter einer mit 2 Hz schwingenden dynamischen Belastung Schädigungen im Bereich der Lasteinleitung an der Asphalt-oberfläche aufwiesen, siehe Bild 81. Zusätzliche





**Bild 81:** Schädigung der Asphaltoberflächen infolge verschiedener Belastungen und Prüftemperaturen an den Gussasphalt- (oben) und HANV-Epoxidharz-Prüfkörpern (unten)

Eindrückungen bei einer Prüftemperatur von +50 °C sind aufgrund der herabgesetzten Last von 50 kN auf 15 kN nicht zu verzeichnen. Bei einer Prüftemperatur von -5 °C sind keine Schädigungen an der Asphaltoberfläche sichtbar. Erwartungsgemäß zeigen die Versuche demnach, dass die Steifigkeit der Gussasphalte stark von der Temperatur abhängt. Insbesondere im Bereich hoher Temperaturen nimmt die Steifigkeit sehr stark ab, sodass bereits nach ca. 40.000 Lastwechseln sichtbare Schädigungen auftraten.

Die Prüfkörper aus HANV-Epoxidharz wiesen unabhängig von der Beanspruchungsart, statisch oder dynamisch, keine sichtbaren Schädigungen der Asphaltoberfläche auf, siehe Bild 81. Alle Prüfkörper erreichten die geforderte Anzahl von 1 Millionen Lastwechseln.

Der Vergleich der Verformungsmoduln im Bereich von 40.000 bis 50.000 Lastwechseln zeigte zum einen, dass die Steifigkeit des HANV ebenfalls stark temperatur- und frequenzabhängig ist. Im Vergleich zu den Gussasphalten ließ sich trotz der höheren Dauerhaftigkeit keine Steigerung der Steifigkeit in diesem Lastwechselbereich feststellen.

Anhand der ermittelten Verformungsmoduln im Bereich von 40.000 bis 50.000 Lastwechsel ließ sich ferner feststellen, dass diese, mit Ausnahme der dynamischen Versuche bei -5 °C, an den Prüfkörpern ohne Pufferschicht grundsätzlich geringer

sind als an den Prüfkörpern mit Pufferschicht. Die experimentell ermittelten prozentualen Abweichungen im Bereich hoher Asphaltsteifigkeiten sind jedoch wesentlich höher als die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zum Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die Beanspruchungsgrößen an der Unterseite des Deckblechs. Diese zeigten, dass der Einfluss eines starren Verbundes ab einer Asphaltsteifigkeit von 4.000 N/mm<sup>2</sup> deutlich nachlässt und nur noch gut 7 % ausmacht. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die Betrachtung von zwei verschiedenen statischen Systemen sein, einem 2-Feld-Träger und einem Brückenquerschnitt mit den Abmessungen 7,0 m x 8,0 m. Für eine quantitative Bewertung der hier untersuchten Varianten sind Großbauteilversuche unverzichtbar. Hierdurch ließen sich herstellungsbedingte Streufaktoren minimieren und die Einflüsse am tatsächlichen Detail Anschluss Längsrippe-Deckblech untersuchen.

Unter dynamischer Beanspruchung bei tiefen Temperaturen (-5 °C) zeigt die Belagsvariante Gussasphalt ohne Pufferschicht die höchste mittragende Wirkung. In Bezug auf die Dauerhaftigkeit bei höheren Temperaturen (+20 °C) zeigte die HANV-Variante bessere Eigenschaften, da diese auch bei Raumtemperatur 1 Millionen Lastwechsel ohne sichtbare Schädigungen überstanden. Generell bietet der Einsatz eines HANV-Epoxidharzes und auch HANV-Bioharzes in Kombination mit dem Verzicht auf eine Pufferschicht Potenzial, die mit-

tragende Wirkung des Verbundsystems zu erhöhen. Es ist zu empfehlen, auch das Bioharz weiter zu untersuchen, da dieser aufgrund seiner Bestandteile weniger gesundheitsgefährdend ist als Epoxidharz.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die in den letzten Jahren enorm gestiegenen Verkehrsbelastungen und damit einhergehenden gestiegenen lokalen Beanspruchungen im Deckblech kommt es bei bestehenden Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten vermehrt zu Ermüdungsschäden im Bereich der geschweißten Anschlüsse der Längsrippen an das Deckblech (Kategorie-1-Schäden). Ziel des Forschungsprojekts war es zu untersuchen, ob sich durch eine erhöhte mittragende Wirkung des Fahrbahnbelags die lokalen Radlasten besser verteilen und die Spannungen im Bereich der Anschlüsse Längsrippe-Deckblech somit reduziert werden können.

Zum Nachweis einer erhöhten mittragenden Wirkung wurden numerische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Untersucht wurden die folgenden Asphaltvarianten: Gussasphalt als Referenzsystem sowie hohlraumreiche Asphaltgerüste mit nachträglicher Verfüllung (HANV, verfüllt mit Epoxidharz und mit Bioharz). Zusätzlich wurde untersucht, ob es möglich ist, auf den Einsatz der Pufferschicht zu verzichten, um damit zusätzlich die mittragende Wirkung des Fahrbahnbelags zu erhöhen.

Zunächst wurden Untersuchungen zur Charakterisierung des Grundmaterials in Form von Spaltzug-Schwellversuchen und Abkühlversuchen durchgeführt. Mithilfe der Spaltzug-Schwellversuche sollten E-Moduln bei  $-10\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ ,  $10\text{ °C}$  und  $20\text{ °C}$  bestimmt werden. Zusätzlich wurden die E-Moduln bei  $-20\text{ °C}$ ,  $35\text{ °C}$  und  $50\text{ °C}$  berechnet. Anhand der so ermittelten E-Moduln sollte untersucht werden, ob eine erhöhte Steifigkeit der verfüllten Asphalte nachweisbar ist. Des Weiteren sollten sie als Eingangswerte für die nachfolgenden numerischen Berechnungen dienen. Während der Versuchsdurchführung und Auswertung zeigte sich jedoch, dass der Spaltzug-Schwellversuch nicht geeignet ist, um E-Moduln an verfüllten Asphaltmaterialien zu bestimmen. Sinnvolle E-Moduln ließen sich dadurch nur am Gussasphalt, nicht aber an den

HANV-Varianten bestimmen. Die am Gussasphalt bestimmten und berechneten E-Moduln dienten in den nachfolgenden numerischen Parameterstudien als Referenzwerte.

Mithilfe der Abkühlversuche wurden die Temperaturen für die nachfolgenden Kleinbauteilversuche bestimmt.

Für die numerischen Untersuchungen wurde ein 3D-Finite-Elemente-Modell erstellt, das einen Ausschnitt der orthotropen Fahrbahnplatte der Rheinbrücke Duisburg-Neuenkamp simuliert und mit dem Ermüdungslastmodell 3 nach DIN EN 1991-2 beansprucht. Prinzipiell wurden zwei unterschiedliche Varianten des Fahrbahnaufbaus simuliert. In Modell 1 wurde die Pufferschicht durch Kontaktelemente simuliert und die Schubsteifigkeit durch Reibungskoeffizienten eingestellt. In Modell 2, welches im Anschluss für die weiterführenden Parameterstudien genutzt wurde, wurde die Pufferschicht direkt als eigene Schicht simuliert. Nachdem zunächst die ungünstigste Laststellung des Lastmodells ermittelt wurde, wurden Parameterstudien zum Einfluss der Belagssteifigkeit sowie der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die Spannungen im Bereich der Anschlüsse zwischen Deckblech und Längsrippen durchgeführt. Es zeigte sich, dass sich die Spannungen mit höher werdender Asphaltsteifigkeit um bis zu 40 % reduzieren lassen. Je niedriger die Ausgangssteifigkeit des Asphaltbelags ist, desto größer ist die Spannungsreduktion bei steigender Belagssteifigkeit. Im Vergleich zu den im Spaltzug-Schwellversuch ermittelten E-Moduln bzw. mit den anschließend für  $+50\text{ °C}$  berechneten E-Moduln zeigte sich, dass sich durch eine höhere Steifigkeit eine deutliche Spannungsreduktion erzielen ließe.

Zusätzlich zum E-Modul wurde auch der Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht untersucht. Ziel der Untersuchungen war zu überprüfen, ob sich die Spannungen an der Unterkante des Stahlblechs durch einen Verzicht auf die Pufferschicht zusätzlich reduzieren lassen. Die Parameterstudie zeigte, dass sich bei niedrigen E-Moduln, so wie sie derzeit in den warmen Sommermonaten beim Gussasphalt vorliegen, die Spannungen durch einen Verzicht auf die Pufferschicht um bis zu 25 % reduzieren lassen. Der Einfluss der Schubsteifigkeit der Pufferschicht auf die Spannungen im Bereiche der Anschlüsse Längsrippen-Deckblech ist jedoch abhängig von der Steifigkeit des Asphaltbelags. Bei niedriger Belagssteifigkeit lassen sich die

Spannungen durch den Verzicht auf die Pufferschicht deutlich reduzieren. Bei hohen Steifigkeiten zeigt die Pufferschicht bzw. der Verzicht auf die Pufferschicht kaum einen Einfluss auf die Spannungen.

Die weiteren experimentellen Untersuchungen umfassten sowohl statische als auch dynamische 5-Punkt-Biegeversuche, die bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt wurden. Die Prüfkörper bestanden aus einem Stahlblech mit Asphaltbelag und Pufferschicht nach ZTV-ING Teil 7, Abschnitt 4 und einer Abdichtung nach Bauart 1.

Mithilfe der statischen Versuche sollte untersucht werden, ob die verfüllten Beläge auch bei hohen Temperaturen eine erhöhte mittragende Wirkung gegenüber dem Referenzsystem aus Gussasphalt aufweisen. Aus diesem Grund wurden die statischen Versuche bei Raumtemperatur sowie bei +50 °C durchgeführt. Anhand der dynamischen Versuche sollte die Dauerhaftigkeit der untersuchten Asphaltbeläge untersucht werden. Da es insbesondere bei kalten Temperaturen zu Rissbildung im Asphalt kommen kann, wurden die dynamischen Versuche bei Raumtemperatur und bei -5 °C durchgeführt. Bis auf die bioharzverfüllten HANV-Prüfkörper wurden alle Varianten mit und ohne Pufferschicht geprüft. Da die Bioharzprüfkörper in anderen Abmessungen als die übrigen Prüfkörper geliefert wurden, sind die an diesem Prüfkörpern erzielten Ergebnisse nicht mit denen der übrigen Prüfkörper vergleichbar.

Für alle durchgeführten Versuche wurden Kraft-Verformung-Kurven ermittelt, aus denen anschließend Verformungsmoduln bestimmt wurden. Bei den erzielten Versuchsergebnissen ist zu beachten, dass je Variante und Versuch lediglich zwei Prüfkörper zur Verfügung standen und die gemessenen Verformungen auch innerhalb einer Variante teilweise so stark streuten wie die Differenzen der Mittelwerte zweier unterschiedlicher Varianten. Neben den Streuungen, die aus der Herstellung der HANV-Prüfkörper resultieren, ergaben sich zusätzliche Unterschiede in den gemessenen Verformungen infolge unterschiedlich vorverformter Stahlbleche. Im Bereich hoher Belastungen konnte der Einfluss aus Imperfektionen durch eine Normierung der Kraft-Verformung-Kurven kompensiert werden, auf niedrigen Lastniveaus, wie beispielsweise den statischen Versuchen bei +50 °C, war dies nicht möglich. Aus diesem Grund sind die hier vorgestellten Bewertungen nur als Tendenzen zu verstehen.

Die statischen Versuche bei +20 °C zeigten, dass sich die Gesamtsteifigkeit der Prüfkörper durch die Verwendung eines Fahrbahnbelags aus HANV prinzipiell vergrößern lässt. Ein Verzicht auf die Pufferschicht führt ebenfalls zur Erhöhung der Steifigkeit. Der niedrigste Verformungsmodul und damit die größte Steifigkeit konnte durch die Verwendung eines Fahrbahnbelags aus HANV und dem Verzicht auf die Pufferschicht erreicht werden. Zusätzlich konnte für die Gussasphaltvarianten beobachtet werden, dass sich die Lasteinleitungsplatten nach Versuchsende in die Prüfkörper eingedrückt hatten. Bei den Prüfkörpern aus HANV konnten keine sichtbaren Schädigungen festgestellt werden. Eine quantitative Bewertung der unterschiedlichen Varianten konnte nicht vorgenommen werden, da hierfür der Prüfumfang von je zwei Prüfkörpern je Variante zu gering war.

Die statischen Versuche bei +50 °C ergaben, dass die Versuchsergebnisse auf dem niedrigen Lastniveau mehr von den Imperfektionen der einzelnen Prüfkörper als von der Steifigkeit des aufgetragenen Fahrbahnbelags beeinflusst wurden. Eine direkte Bewertung des Einflusses der Temperatur auf die Steifigkeit des Belags sowie ein Vergleich der unterschiedlichen Belagsvarianten bei hohen Temperaturen war, bedingt durch das niedrigere Lastniveau der Versuche bei +50 °C, nicht möglich.

Nachdem in den statischen Versuchen erste Tendenzen in Bezug auf eine erhöhte mittragende Wirkung erkennbar wurden, wurde die Dauerhaftigkeit der einzelnen Varianten in dynamischen Versuchen untersucht. Hierbei war zum einen die Dauerhaftigkeit selber von Interesse, also die Frage, ob die verschiedenen Varianten die geforderten 1 Millionen Lastwechsel überstehen, ohne zu versagen. Zum anderen waren die während der Versuche aufgezeichneten Verformungen ebenfalls von besonderem Interesse, da die Steifigkeit von Asphaltbelägen sowohl temperatur- als auch belastungsfrequenzabhängig ist. Die gewählte Belastungsfrequenz der Kleinbauteilversuche von 2 Hz entspricht hierbei einer realistischen Beanspruchungsgeschwindigkeit.

Die Prüfkörper aus Gussasphalt versagten bei Raumtemperatur, +20 °C, nach wenigen 10.000 Lastwechseln im Bereich der Lasteinleitung, sodass die Versuche nach 50.000 bis 100.000 Lastwechseln abgebrochen werden mussten. Alle übrigen Varianten überstanden 1 Millionen Lastwech-

sel, ohne dass sich äußere Schädigungen am Material feststellen ließen. Die rechnerisch ermittelten Verformungsmoduln im Bereich von 40.000 bis 50.000 Lastwechseln zeigten allerdings, dass die Variante Gussasphalt ohne Pufferschicht in diesem Lastwechselbereich dennoch die höchste Steifigkeit gegenüber dem Referenzsystem aufweist.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit waren vor allem die dynamischen Versuche bei  $-5\text{ °C}$  von Interesse. Hierbei konnten alle Prüfkörper 1 Millionen Lastwechsel ohne feststellbare Schädigungen aufnehmen. Im Bereich von 990.000 bis 1.000.000 Lastwechseln lieferte die Asphaltvariante Gussasphalt ohne Pufferschicht im Mittel die niedrigsten Verformungsmoduln und somit die höchste Steifigkeit.

Wie bei den statischen Versuchen gilt auch bei den dynamischen Versuchen, dass die Versuchsergebnisse aufgrund der Streuungen nur als Tendenzen interpretiert werden können.

Für eine quantitative Bewertung der hier untersuchten Varianten sind Großbauteilversuche unverzichtbar. Hierdurch ließen sich herstellungsbedingte Streuungsfaktoren minimieren und die Einflüsse am tatsächlichen Detail Anschluss Längsrippe-Deckblech untersuchen.

Für weiterführende Untersuchungen im Kleinbauteilformat sollten die Empfehlungen aus [SED 2010] und Kapitel 5.6 berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für die Versuchskörperherstellung und die Versuchsanzahl.

Belegbare Steifigkeiten in Form von E-Moduln konnten für die untersuchten HANV-Epoxidharz- und HANV-Bioharz-Asphalte aus den erläuterten Gründen (Spaltzug-Schwellversuch nicht geeignet, Verzug der Prüfkörper der Kleinbauteile, Anzahl der Versuchskörper etc.) nicht ermittelt werden.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen konnte das prinzipielle Potenzial des Einsatzes eines modifizierten Fahrbahnbelags zur Vermeidung von Kategorie-1-Schäden nicht eindeutig bestätigt werden. Eine Tendenz, dass ein verfüllter Asphaltbelag eine erhöhte mittragende Wirkung gegenüber herkömmlichem Gussasphalt aufweist, ist jedoch erkennbar.

Zur quantitativen Bewertung der untersuchten Varianten sind weiterführende Forschungsaktivitäten notwendig.

## 7 Literatur

- [AL 2009] AL Sp-Asphalt 09: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung, FGSV Verlag (2009)
- [ALP 2003] ALP A-StB, Teil 11: Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt Teil 11: Herstellung von Asphaltprobepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät, FGSV-Verlag (2003)
- [ANS 2010] ANSYS, Version 13.0, ANSYS Inc., 2010
- [BIS 1992] BISAR, Version PC 9/92, Shell AG, 1992]
- [BOE 2005] BOERSMA, P. D.; de JONG, F. B. P.; LEENDERTZ, J. S.: Erfahrungen aus den Niederlanden – Analysen und Lösungen für Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten in den Niederlanden, Expertengespräch: Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten, BAST, Bergisch Gladbach, 19.10.2005
- [CUN 1996] CUNINGHAME, J.; KOLSTEIN, H.; PASCHEN, M.: Ermüdungsversuche mit orthotropen Platten und Konsequenzen für die Beurteilung bestehender Fahrbahnplatten, Stahlbau 65 (1996), Heft 11, S., 452-458
- [DEJ 2007] de JONG, F. B. P.: Renovation techniques for fatigue cracked orthotropic steel bridge decks, TU Delft, Dissertation, 2007
- [DEN 2006] DENKINGER, M. D.; BUITELAAR, P.: Ertüchtigung orthotroper Fahrbahnplatten von Stahlbrücken, Stahlbau 75, Heft 7, S. 2-4
- [DIN 12390] DIN EN 12390-8:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck; Deutsche Fassung EN 12390-8:2009



- [DIN 12697-1] DIN EN 12697-1:2006-02: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt, Deutsche Fassung EN 12697-1:2005
- [DIN 12697-6] DIN EN 12697-1:2003-06: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern, Deutsche Fassung EN 12697-6:2003
- [DIN 12697-29] DIN EN 12697-1:2002-12: Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 6: Bestimmung der Maße von Asphalt-Probekörpern, Deutsche Fassung EN 12697-29:2002
- [DIN 16945] DIN 16945:1989-03: Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen
- [DIN 1991] DIN EN 1991-2:2004-05: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Deutsche Fassung EN 1991-2:2003
- [DIN 1996] DIN 1996-4:1984-11: Prüfung von Asphalt; Herstellung von Probekörpern aus Mischgut
- [DUD 2003] DUDENHÖFER, B.; SCHUMANN, R.: Verfüllter offenporiger Asphalt: Zur Instandsetzung von Fahrbahnbelägen an Brücken-, Tunnel- und Trogbauwerken, Asphalt Heft 4/2003, S. 16-24
- [DVS 1709] DVS-Merkblatt 1709: Instandsetzung und Verstärkung orthotroper Fahrbahnplatten, Merkblatt, DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe „Schweißen im Bauwesen“, DVS Verlag GmbH, Düsseldorf, Mai 2008
- [FAR 2006] F ARMER, I.: Sandwich plate system for new build and repair, The Structural Engineer, 7 March 2006
- [FEL 2010] FELDMANN, M.; SEDLACEK, G.; MÖLLER, S.; GEßLER, A.; UNGERMANN, D.; KALAMEYA, J.: Herstellung von Stahlfahr-
- bahnen in Sandwichbauweise mit verringertem Schweißaufwand, Forschungsbericht P268, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 2010
- [FIE 2009] FIEDLER, E.: Die Entwicklung der orthotropen Fahrbahnplatte in Deutschland, Stahlbau 78 (2009), Heft 8, S. 562-576
- [FRI 2005a] FRIEDRICH, H.: Instandsetzung durch Aufkleben von Stahlblechen, Expertengespräch: Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten, BAST, Bergisch Gladbach, 19.10.2005
- [FRI 2005b] FRIEDRICH, H.; EILERS, M.; QUAAS, B.; STAECK, M.: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen – Optimierung der Klebetechnologie-, Schlussbericht, BAST Bergisch Gladbach, September 2005
- [FRI 2007] FRIEDRICH, H.: Schönwasserbrücke: Untersuchungen zur thermischen Beanspruchung von SPS beim Einbau bituminöser Fahrbahnbeläge, Stahlbau 76 (2007), Heft 7, S. 472-437
- [FRI 2008] FRIEDRICH, H.: Überblick: Schäden und Instandsetzungsvarianten, Expertengespräch: Neue Entwicklungen im Stahlbrückenbau, BAST, Bergisch Gladbach, 22.10.2008
- [FRI 2010] FRIEDRICH, H.; QUAAS, B.: Zukunftsfähigkeit des Bestands, Zukünftiger Bedarf an Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen bei orthotropen Fahrbahnplatten von Stahlbrücken, Bundesanstalt für Straßenwesen, BAST, Bergisch Gladbach, Juli 2010
- [HAM 2007] HAMME, M.; NAUMANN, J.; PREHN, W.: Pilotprojekt zur Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten, Stahlbau 76 (2007), Heft 7, S. 432-437
- [HUE 1982] HÜRTGEN, H.: Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt, Forschung Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 361, 1982



- [HUR 2002] HUURMAN, M.; MEDANI, T. O.; MOLENAAR, A. A. A.; KASBERGEN, C.: 3D-FEM for the Estimation of the Behaviour of Asphalt Surfacing on Orthotropic Steel Deck Bridges, Proceedings of the Third International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Amsterdam, the Netherlands, 2-5 April 2002
- [KEN 2007] KENNEDY, St.: Das Sandwich-Platten-System (SPS), Stahlbau 76 (2007), Heft 7, S., 455-464
- [LEE 2005] LEENDERTZ, J. S.: Erfahrungen aus den Niederlanden – Aspekte zur Ermüdung von orthotropen Fahrbahnplatten in den Niederlanden, Expertengespräch: Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten, BAST, Bergisch Gladbach, 19.10.2005
- [LEE 2007] LEENDERTZ, J. S.; de JONG, F. B. P.: Schadens-, Reparatur- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten in den Niederlanden, Stahlbau 76 (2007), Heft 7, S., 503-508
- [LEE 2008] LEENDERTZ, J. S.; den BESTEN, C.; van DOOREN, F.; SLIEDRECHT, H.; de VRIES, J.: Erfahrungen aus den Niederlanden, Expertengespräch: Neue Entwicklungen im Stahlbrückenbau, BAST, Bergisch Gladbach, 22.10.2008
- [LUD 2009] LUDWIG, S.: Entwicklung von lang - lebigen Deckschichten aus Asphalt unter Verwendung von Epoxydharz, Universität Duisburg-Essen, Institut für Straßenbau und Verkehrswesen, Schriftenreihe Heft 1, Essen (2009)
- [MAT 2007] MATUSCHEK, J.; STIHL, Th.; BILD, St.: Verstärkung der orthotropen Stahlfahrbahn der Schönwasserbrücke mittels Stahl-Elastomer-Sandwich (SPS), Stahlbau 76 (2007), Heft 7, S., 465-471
- [MER 1998] Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt, FGSV-Verlag (1998)
- [MER 2002] Merkblatt für Griffigkeitsverbessernde Maßnahmen an Verkehrsflächen aus Asphalt, FGSV-Verlag (2002)
- [MHD 2004] M HD, Merkblatt für die Herstellung von halbstarren Deckschichten, FGSV-Verlag (2004)
- [MIN 2007] MINTEN, J.; SEDLACEK, G.; PASCHEN, M.; FELDMANN; GEßLER, A.: SPS – ein neues Verfahren zur Instandsetzung und Ertüchtigung von stählernen orthotropen Fahrbahnplatten, Stahlbau 76 (2007), Heft 7, S. 438-454
- [NAU 2008] NAUMANN, J.: 100 Jahre Straßenbrücken in Stahl- und Verbundbauweise, Jubiläumsband „100 Jahre deutscher Ausschuss für Stahlbau“, Frehner Consulting GmbH Deutschland, 2008
- [NAU 2010] NAUMANN, J.: Brücken und Schwerkverkehr – Strategie zur Ertüchtigung des Brückenbestands in Bundesfernstraßen, Bauingenieur, Band 85, Mai 2010, S. 210-216
- [PET 2004] PETERS, N.; FRIEDRICH, H.: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen – Computersimulation, Schlussbericht, BAST Bergisch Gladbach, September 2004
- [RAA 2015] RAAKE, V.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Nachweis einer erhöhten mittragenden Wirkung von verschiedenen Asphaltbelägen auf Stahlbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte , 2015
- [SCH 2004] SCHER, J.: Verstärkungswirkung von Kohlefaserbewehrung in Asphaltstrassen, Strasse und Verkehr, Nr. 1-2, Jan/Feb 2004
- [SED 2005] SEDLACEK, G.; PASCHEN, M.: Untersuchung zur nachhaltigen Instandsetzung von orthotropen Fahrbahnplatten, Expertengespräch: Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten, BAST, Bergisch Gladbach, 19.10.2005

- [SED 2008] SEDLACEK, G.; PASCHEN, M.: Neue Wege bei der Verstärkung orthotroper Fahrbahnplatten, Expertengespräch: Neue Entwicklungen im Stahlbrückenbau, BAST, Bergisch Gladbach, 22.10.2008
- [SED 2010] SEDLACEK, G.; PASCHEN, M.; FELDMANN, M.; GEßLER, A.; STEINHAUER, B.; SCHARNIGG, K.: Nachhaltige Instandsetzung von orthotropen Fahrbahnplatten von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems, Entwurf Schlussbericht, Januar 2010
- [STE 2006] STEINER, J.; LAIER, R.; WÜRFEL, T.; BUCAK, Ö.; SCHERER, M.: Instandsetzung einer müden Straßenbrücke mit orthotroper Fahrbahn, Stahlbau 75 (2006), Heft 2, S. 161-169
- [STI 2013] STIHL, Th.; CHASSARD, C.; FELDMANN, M.; BILD, St.: Neue Technologie für die Hängebrücke über die Saar in Mettlach – Brückfahrbahn aus Sandwich Plate System (SPS), Stahlbau 82 (2013), Heft 3, S 179-187
- [STÖ 2002] STÖCKERT, U.: Ein Beitrag zur Festlegung von Grenzwerten für den Schichtenverbund im Asphaltstraßenbau, Dissertation TU Darmstadt, 2002
- [STR 2009] STRAUBE, E.; KRASS, K.: Straßenbau und Straßenerhaltung, Erich Schmidt Verlag, 9. Auflage, Berlin 2009
- [STR 2011] STRANGHÖNER, N.; LORENZ, Chr.; STRAUBE, E.; KNAUFF, M.: Effizienzsteigerung des Fahrbahnbelags auf Stahlbrücken mit Schäden in Form von Rissen im Bereich von Anschlüssen am Deckblech (Kategorie-1-Schäden), 1. Zwischenbericht, August 2011
- [SUG 2009] SUGIURA, K.; HASHIMOTO, K.; OSHIMA, Y.; YAMAGUCHI, T.: Assessment of fatigue cracks in orthotropic steel decks, Steel Construction 2 (2009), No. 3, p. 175-180
- [TEI 2012] TEIXEIRA DE FREITAS, S.: Steel plate reinforcement of orthotropic bridge decks, Dissertation TU-Delft, 2012
- [TP 2010] TL/TP-ING, Technische Lieferbedingungen und technische Prüfvorschriften für Ingenieurbauten, Teil 7, Abschnitt 4, Technische Prüfvorschriften für die Prüfung der Dichtungssysteme für Brückenbeläge auf Stahl, TP BEL-ST, Ausgabe 2010
- [TPG 2004] TP Griff-StB, Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, FGSV-Verlag (2004)
- [UNG 2010] UNGERMANN, D.: Sanierung orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Fertigteilen aus ultrahochfestem Beton, Abschlussbericht, 17.05.2010
- [WOL 2007] WOLCHUK, R.: Orthotrope Fahrbahnplatte – Entwicklungen und Möglichkeiten für die Zukunft, Stahlbau 76 (2007), Heft 7, S. 478-494
- [ZTV 2001] ZTV Asphalt – StB 01, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, FGSV-Verlag (2001)
- [ZTV 2007] ZTV -ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, FGSV-Verlag (2007)
- [ZTV 2010] ZTV-ING Teil 7 Abschnitt 4, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Brückenbelag auf Stahl mit einem Dichtungssystem, FGSV-Verlag (2010)

## Anhang

### A Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche

Tab. A.1: Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche an Gussasphalt

| Temperatur<br>[°C] | Frequenz<br>[Hz] | Last<br>[N] | max F<br>[kN] | el. Anfangs-<br>dehnung<br>[‰] | E-Modul<br>[N] |
|--------------------|------------------|-------------|---------------|--------------------------------|----------------|
| <b>Gussasphalt</b> |                  |             |               |                                |                |
| <b>-10</b>         | 10               | 11593       | 11,78         | -0,10                          | 27018          |
|                    | 10               | 11593       | 11,72         | -0,12                          | 23601          |
|                    | 10               | 11593       | 11,34         | 0,10                           | 24100          |
|                    | 1                | 8460        | 8,43          | 0,09                           | 20932          |
|                    | 1                | 8460        | 8,45          | 0,10                           | 20633          |
|                    | 1                | 8460        | 8,05          | 0,94                           | 20421          |
|                    | 0,1              | 6893        | 6,89          | -0,10                          | 15852          |
|                    | 0,1              | 6893        | 6,89          | 0,09                           | 16718          |
|                    | 0,1              | 6893        | 6,47          | 0,96                           | 16021          |
| <b>0</b>           | 10               | 5640        | 5,68          | 0,06                           | 21355          |
|                    | 10               | 5640        | 5,63          | 0,07                           | 20189          |
|                    | 10               | 5640        | 5,70          | -0,65                          | 20534          |
|                    | 1                | 4073        | 4,04          | -0,06                          | 14923          |
|                    | 1                | 4073        | 4,05          | 0,06                           | 16788          |
|                    | 1                | 4073        | 4,05          | -0,06                          | 14319          |
|                    | 0,1              | 2507        | 2,49          | 0,05                           | 11576          |
|                    | 0,1              | 2802        | 2,78          | 0,05                           | 11650          |
|                    | 0,1              | 2802        | 2,79          | 0,06                           | 9481           |
| <b>10</b>          | 10               | 2820        | 2,89          | -0,06                          | 11626          |
|                    | 10               | 2820        | 2,89          | -0,05                          | 13594          |
|                    | 10               | 2820        | 2,81          | -0,06                          | 11818          |
|                    | 1                | 2193        | 2,18          | 0,06                           | 7555           |
|                    | 1                | 2193        | 2,19          | 0,06                           | 7736           |
|                    | 1                | 2193        | 2,20          | 0,06                           | 8070           |
|                    | 0,1              | 1253        | 1,25          | 0,05                           | 4564           |
|                    | 0,1              | 1253        | 1,27          | 0,04                           | 5243           |
|                    | 0,1              | 1253        | 1,27          | 0,05                           | 4982           |
| <b>20</b>          | 10               | 1880        | 2,00          | 0,05                           | 9228           |
|                    | 10               | 2193        | 2,26          | -0,06                          | 9257           |
|                    | 10               | 2193        | 2,22          | -0,07                          | 8487           |
|                    | 1                | 1253        | 1,30          | -0,05                          | 4689           |
|                    | 1                | 1567        | 1,59          | -0,08                          | 4647           |
|                    | 1                | 1567        | 1,59          | 0,07                           | 4737           |
|                    | 0,1              | 940         | 0,99          | 0,08                           | 1961           |
|                    | 0,1              | 940         | 0,96          | 0,07                           | 2200           |
|                    | 0,1              | 940         | 0,97          | -0,07                          | 2151           |
| <b>40</b>          | 10               | 940         | 0,98          | 0,07                           | 2556           |
|                    | 10               | 940         | 1,00          | 0,08                           | 2160           |
|                    | 10               | 1253        | 1,28          | 0,12                           | 2353           |
|                    | 1                | 815         | 0,98          | -0,14                          | 1464           |
|                    | 1                | 627         | 1,01          | -0,03                          | 780            |
|                    | 1                | 940         | 0,96          | 0,19                           | 920            |
|                    | 0,1              | 627         | 0,96          | -28,89                         | 1152           |
|                    | 0,1              | 501         | 0,65          | 0,08                           | 299            |
|                    | 0,1              | 815         | 0,84          | 0,59                           | 182            |

Tab. A.2: Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche an HANV-Epoxidharz

| Temperatur<br>[°C]     | Frequenz<br>[Hz] | Last<br>[N] | max F<br>[kN] | el. Anfangs-<br>dehnung<br>[‰] | E-Modul<br>[N] |
|------------------------|------------------|-------------|---------------|--------------------------------|----------------|
| <b>HANV-Epoxidharz</b> |                  |             |               |                                |                |
| <b>-10</b>             | 10               | 5326        | 5,40          | 0,15                           | 7865           |
|                        | 10               | 4700        | 4,79          | 0,09                           | 11160          |
|                        | 10               | 4700        | 4,69          | -0,10                          | 10053          |
|                        | 1                | 3133        | 3,14          | 0,10                           | 6369           |
|                        | 1                | 3133        | 3,14          | 0,06                           | 10190          |
|                        | 1                | 3133        | 3,13          | -0,08                          | 8100           |
|                        | 0,1              | 1880        | 1,90          | 0,07                           | 4897           |
|                        | 0,1              | 1880        | 1,90          | 0,04                           | 7955           |
| <b>0</b>               | 10               | 3760        | 3,86          | 0,11                           | 7284           |
|                        | 10               | 3446        | 3,45          | 0,09                           | 7931           |
|                        | 10               | 3446        | 3,54          | 0,11                           | 6444           |
|                        | 1                | 2507        | 2,50          | -0,09                          | 5623           |
|                        | 1                | 2507        | 2,51          | -0,09                          | 5391           |
|                        | 1                | 2507        | 2,51          | -1,00                          | 4880           |
|                        | 0,1              | 1253        | 1,26          | 0,05                           | 3906           |
|                        | 0,1              | 1567        | 1,58          | 0,06                           | 4174           |
| <b>10</b>              | 10               | 2193        | 2,26          | 0,08                           | 6183           |
|                        | 10               | 2193        | 2,22          | 0,10                           | 4701           |
|                        | 10               | 2193        | 2,28          | -0,06                          | 8124           |
|                        | 1                | 1880        | 1,88          | 0,08                           | 4922           |
|                        | 1                | 1880        | 1,89          | 0,12                           | 3274           |
|                        | 1                | 1880        | 1,91          | 0,08                           | 4623           |
|                        | 0,1              | 1253        | 1,27          | 0,05                           | 4222           |
|                        | 0,1              | 1253        | 1,27          | 0,09                           | 2358           |
| <b>20</b>              | 10               | 1253        | 1,26          | 0,09                           | 2701           |
|                        | 10               | 1253        | 1,30          | 0,08                           | 2975           |
|                        | 10               | 1253        | 1,26          | -0,08                          | 2877           |
|                        | 1                | 940         | 0,95          | 0,09                           | 1684           |
|                        | 1                | 940         | 0,94          | 0,09                           | 1690           |
|                        | 1                | 940         | 0,93          | 0,08                           | 1897           |
|                        | 0,1              | 627         | 0,63          | 0,05                           | 1138           |
|                        | 0,1              | 627         | 0,63          | 0,05                           | 1147           |
| <b>40</b>              | 10               | 940         | 0,97          | -0,18                          | 956            |
|                        | 10               | 815         | 0,85          | 0,12                           | 1127           |
|                        | 10               | 815         | 0,86          | 0,11                           | 1254           |
|                        | 1                | 627         | 0,64          | 0,11                           | 644            |
|                        | 1                | 627         | 0,65          | 0,10                           | 534            |
|                        | 1                | 627         | 0,65          | 0,09                           | 774            |
|                        | 0,1              | 501         | 0,53          | 0,06                           | 488            |
|                        | 0,1              | 501         | 0,52          | 0,05                           | 579            |
| 0,1                    | 501              | 0,64        | 0,06          | 458                            |                |

Tab. A.3: Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche an HANV-Bioharz

| Temperatur<br>[°C]  | Frequenz<br>[Hz] | Last<br>[N] | max F<br>[kN] | el. Anfangs-<br>dehnung<br>[%] | E-Modul<br>[N] |
|---------------------|------------------|-------------|---------------|--------------------------------|----------------|
| <b>HANV-Bioharz</b> |                  |             |               |                                |                |
| <b>-10</b>          | 10               | 5326        | 5,34          | 0,12                           | 10195          |
|                     | 10               | 5326        | 5,46          | 0,11                           | 10739          |
|                     | 10               | 5326        | 5,31          | -0,12                          | 10485          |
|                     | 1                | 3133        | 3,13          | 0,05                           | 12788          |
|                     | 1                | 3133        | 3,14          | -0,08                          | 8408           |
|                     | 1                | 3133        | 3,14          | 0,07                           | 8975           |
|                     | 0,1              | 1880        | 1,89          | 0,05                           | 6771           |
|                     | 0,1              | 1880        | 1,89          | 0,05                           | 6512           |
|                     | 0,1              | 1880        | 1,90          | 0,05                           | 7388           |
| <b>0</b>            | 10               | 3760        | 3,83          | -0,08                          | 11364          |
|                     | 10               | 3760        | 3,71          | -0,03                          | 15641          |
|                     | 10               | 3760        | 3,83          | -0,05                          | 12314          |
|                     | 1                | 2507        | 2,50          | -0,06                          | 8462           |
|                     | 1                | 2507        | 2,51          | 0,02                           | 9729           |
|                     | 1                | 2507        | 2,50          | -0,03                          | 8623           |
|                     | 0,1              | 1253        | 1,25          | -0,04                          | 5861           |
|                     | 0,1              | 1253        | 1,24          | 0,03                           | 5281           |
|                     | 0,1              | 1253        | 1,25          | -0,05                          | 5              |
| <b>10</b>           | 10               | 5953        | 7,53          | -1,48                          | 1301           |
|                     | 10               | 3760        | 3,83          | -0,18                          | 5220           |
|                     | 10               | 4386        | 4,40          | 0,25                           | 4440           |
|                     | 1                | 3133        | 3,14          | 1,50                           | 491            |
|                     | 1                | 2507        | 2,51          | -0,19                          | 2941           |
|                     | 1                | 2820        | 2,82          | 0,29                           | 2234           |
|                     | 0,1              | 1880        | 1,90          | 2,32                           | 173            |
|                     | 0,1              | 1253        | 1,27          | 0,11                           | 2025           |
|                     | 0,1              | 1567        | 1,58          | 0,29                           | 1095           |
| <b>20</b>           | 10               | 3133        | 3,08          | 0,40                           | 1932           |
|                     | 10               | 2193        | 2,16          | 0,30                           | 1718           |
|                     | 10               | 1253        | 1,25          | -0,14                          | 1729           |
|                     | 1                | 1880        | 1,87          | 0,66                           | 683            |
|                     | 1                | 1253        | 1,23          | 0,28                           | 887            |
|                     | 1                | 940         | 0,95          | -0,17                          | 901            |
|                     | 0,1              | 940         | 0,94          | -0,47                          | 346            |
|                     | 0,1              | 940         | 0,92          | 0,28                           | 553            |
|                     | 0,1              | 627         | 0,64          | 0,10                           | 601            |
| <b>40</b>           | nicht prüfbar    |             |               |                                |                |



## B Beanspruchungsberechnung nach der Mehrschichtentheorie

### B.1 Allgemeines

Zur ersten Beurteilung der mittragenden Wirkung der zu untersuchenden Belagsaufbauvarianten und zur Unterstützung der nachfolgenden Finite-Elemente-Berechnungen wurden die Beanspruchungsgrößen (Dehnungen, Spannungen, Verschiebungen) auf dem Deckblech mit der Mehrschichtentheorie berechnet. Die Mehrschichtentheorie setzt voraus, dass alle Schichten einer Straßenbefestigung homogen, isotrop, linearelastisch, masselos und seitlich unendlich ausgedehnt sind. Die unterste Schicht des Mehrschichtensystems ist zudem unendlich dick (Halbraum). Die mit der Mehrschichtentheorie berechneten Beanspruchungsgrößen sind mit denen in der Straßenbefestigung gemessenen Beanspruchungsgrößen ausreichend genau verifizierbar [STR 2009]. Mit der Mehrschichtentheorie ist die Berechnung der Beanspruchungsgrößen für jede beliebige Position ( $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung) eines Mehrschichtensystems möglich. Für Mehrschichtenrechnungen werden folgende Eingabegrößen benötigt:

- N Anzahl der Schichten,
- $E_n$  E-Modul der Schicht  $n$ ,
- $\nu_n$  Querdehnzahl der Schicht  $n$ ,
- $h_n$  Dicke der Schicht  $n$ ,
- $a$  Radius der Reifenaufstandsfläche,
- $p$  Reifenkontaktdruck.

Die Berechnung der Beanspruchungsgrößen nach der Mehrschichtentheorie erfolgt mithilfe des von der Firma Shell entwickelten Programms BISAR (Bitumen Structure Analysis in Roads) [BIS 1992]. Die Mehrschichtenrechnungen können an einem bis zu zehn Schichten bestehenden Mehrschichtensystem durchgeführt werden. Das Mehrschichtensystem kann durch eine oder mehrere kreisrunde statische Lasten auf der Systemoberseite (Straßenoberfläche) belastet werden. Das Materialverhalten von Asphalt wird über den frequenz- und temperaturabhängigen E-Modul der jeweiligen Schicht beschrieben. Der Schichtenverbund zwischen den Schichten kann im BISAR-Programm berücksichtigt werden.

Zunächst war beabsichtigt, die Berechnungen nach der Mehrschichtentheorie an 12 verschiedenen Grundvarianten durchzuführen, die verschiedene Dichtungssysteme und Belagsvarianten berücksichtigen sollten. Im Zuge des Forschungsvorhabens wurde dies dahingehend abgeändert, dass das Dichtungssystem in allen zu untersuchenden Varianten nach Bauart 1 gemäß [ZTV 2010] ausgebildet wurde. Bei den experimentellen Untersuchungen wurde untersucht, ob gegebenenfalls auf eine Pufferschicht verzichtet werden kann.

Zur Berechnung der Beanspruchungsgrößen auf dem Deckblech muss ein Mehrschichtensystem modelliert werden. Die unterste Schicht des Mehrschichtensystems entspricht immer einem Halbraum und ist daher unendlich dick. Dies widerspricht einer Stahlbrücke, da das Deckblech eine definierte Dicke hat, unter der sich Luft befindet. In Bild B.1 ist das Mehrschichtensystem dargestellt, welches den Mehrschichtenrechnungen zugrunde gelegt wurde.

Die oberen drei Schichten und die Dichtungsschicht entsprechen dem Belagsaufbau bestehend aus Deckschicht (Schicht 1), Schutzschicht (Schicht 2) und Dichtungsschicht gemäß ZTV ING Teil 7 Abschnitt 4 [ZTV 2010]. Die Dicken und die E-Moduln dieser drei Schichten können in Abhängigkeit des zu untersuchenden Belagsaufbaus variiert werden. Unterhalb der Dichtungsschicht befindet sich eine 12 mm dicke Schicht 4, welche das Deckblech der Stahlbrücke simuliert. Für diese Schicht wurde ein E-Modul von  $210.000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt. Die unterste Schicht (Schicht 5), die eine

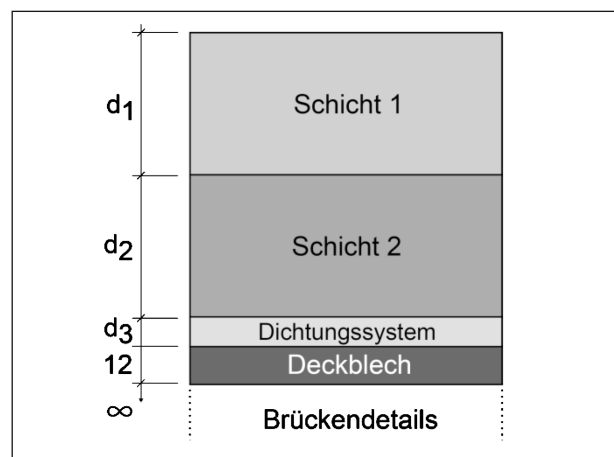


Bild B.1: Varianten des Mehrschichtensystems

|                                | Schicht 1 | Schicht 2 | Dichtungssystem | Deckblech | Brückendetails |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|----------------|
| E-Modul<br>N/mm <sup>2</sup> ] | variabel  | variabel  | variabel        | 210.000   | 40             |
| Schichtdicke<br>[mm]           | variabel  | Variabel  | variabel        | 12        | ∞              |
| Querdehnzahl $\nu$<br>[-]      | 0,35      | 0,35      | 0,4             | 0,3       | 0,35           |

Tab. B.1: Eingangparameter Mehrschichtenrechnungen

unendliche Dicke aufweist, simuliert weitere Brückendetails wie Längsrippen, Querträger, Hauptträger usw. sowie die darunter befindliche Luftschicht. Die Mehrschichtenrechnungen wurden mit vollem Verbund zwischen den einzelnen Schichten durchgeführt.

Für die unterste Schicht (Schicht 5) wurde ein äquivalenter E-Modul bestimmt. Hierfür wurde am Deckblech des 3D-Finite-Elemente-Modells eine Radlast aufgebracht, die der Radlast für die Mehrschichtenberechnung entspricht. Infolge der Belastung wurden am Finite-Elemente-Modell die Verformungen an der Unterkante des Deckblechs berechnet. Aus diesen Verformungen wurde der E-Modul für die unterste Schicht des Mehrschichtensystems zurückgerechnet.

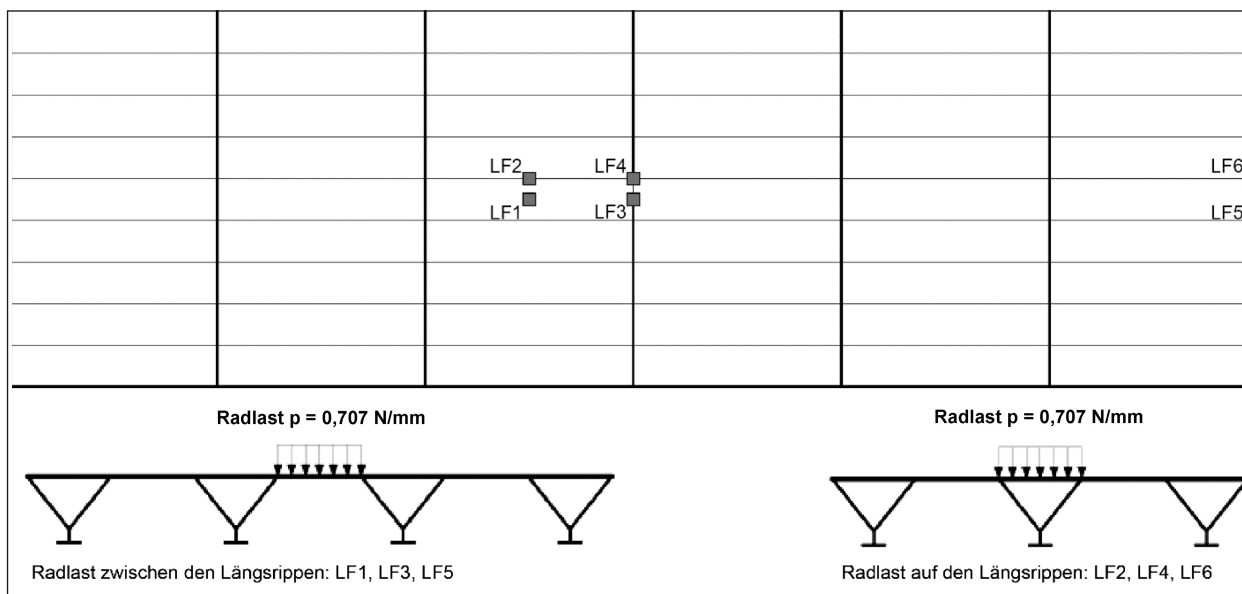
Die Querdehnzahl  $\nu$  der einzelnen Schichten hat einen geringen Einfluss auf die mit der Mehrschichtentheorie berechneten Beanspruchungsgrößen und kann konstant gewählt werden, siehe [HUE 1982]. Die Querdehnzahl der Asphalt-schichten und der ungebundenen Schichten beträgt üblicherweise  $\nu = 0,35$ . Die Querdehnzahl von Stahl wird mit  $\nu = 0,30$  angesetzt. Für die im Dichtungssystem (Bauart 1) verwendeten Reaktionsharze sind keine Querdehnzahlen bekannt. Da die Epoxidharze zu den Reaktionsharzen gehören, wurde die Querdehnzahl des Epoxidharzes der des Reaktionsharzes mit  $\nu = 0,40$  gleichgesetzt. Die gewählten Eingangparameter für die Mehrschichtenrechnungen sind in Tabelle B.1 zusammengestellt.

## B.2 Bestimmung eines äquivalenten E-Moduls zur Abbildung der Brückendetails im Rahmen der Mehrschichtenrechnungen anhand von 3D-Finite-Elemente-Berechnungen

Zur Bestimmung eines äquivalenten E-Moduls zur Berücksichtigung der Brückendetails bei den Mehrschichtenrechnungen wurden vergleichende Berechnungen am 3D-Finite-Elemente-Modell sowie am Mehrschichtenmodell durchgeführt. Hierfür wurden beide Modelle mit einer Flächenpressung von 0,707 N/mm<sup>2</sup> in Form einer kreisrunden Einzellast mit einem Radius von 150 mm beansprucht. Infolge der Belastung wurden die Verschiebungen an der Unterkante des Deckbleches des Finite-Elemente-Modells berechnet. Anschließend wurde der E-Modul der Brückendetails im Mehrschichtenmodell so lange angepasst, bis sich ausreichend gute Übereinstimmungen der Verschiebungen im Finite-Elemente-Modell und im Mehrschichtenmodell ergaben.

Zur Berechnung der Verschiebungen wurden am Finite-Elemente-Modell die folgenden sechs Laststellungen berechnet, siehe auch Bild B.2:

- LF 1: Einzellast in Feldmitte in Brückenlängsrichtung und in Querrichtung in der Mitte des Querschnitts zwischen zwei Längsrippen,
- LF 2: Einzellast in Feldmitte in Brückenlängsrichtung und in Querrichtung in der Mitte des Querschnitts genau auf einer Längsrippe,
- LF 3: Einzellast in der Mitte in Brückenlängsrichtung und in Querrichtung in der Mitte des Querschnitts zwischen zwei Längsrippen,
- LF 4: Einzellast in der Mitte in Brückenlängsrichtung und in Querrichtung in der Mitte des Querschnitts genau auf einer Längsrippe,

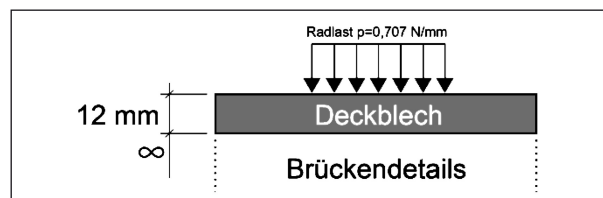


**Bild B.2:** Positionierung der Radlast bei den Lastfällen 1-6 zur Bestimmung des äquivalenten E-Moduls

| Lastfall          | LF 1  | LF 2  | LF 3 | LF 4  | LF 5  | LF 6  |
|-------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Verschiebung [mm] | 2,468 | 2,803 | 1,14 | 1,087 | 2,245 | 2,297 |

**Tab. B.2:** Verschiebungen am Finite-Elemente-Modell zur Kalibrierung des Mehrschichtenmodells

- LF 5: Einzellast in Auflagernähe in Längsrichtung und in Querrichtung in der Mitte des Querschnitts zwischen zwei Längsrippen,
- LF 6: Einzellast in Auflagernähe in Längsrichtung und in Querrichtung in der Mitte des Querschnitts zwischen genau auf einer Längsrippe.



**Bild B.3:** Zweischichtensystem

Die infolge der Einzellasten am Finite-Elemente-Modell berechneten maximalen Verschiebungen unterhalb der Last sind in Tabelle B.2 zusammengestellt. Die geringsten Verschiebungen ergaben sich erwartungsgemäß für die Lastfälle LF 3 und LF 4, bei denen die Last in der Mitte in Brückenlängsrichtung auf dem Querträger positioniert wurde. Die größten Verschiebungen ergaben sich wiederum erwartungsgemäß in den Lastfällen LF 1 und LF2, bei denen die Einzellast in Feldmitte in einem der beiden mittleren Felder in Brückenlängsrichtung positioniert wurde. Die größte Verschiebung ergab sich für den Lastfall LF 2 mit  $u = 2,803$  mm.

Zur Bestimmung des äquivalenten E-Moduls der Schicht 5 im Mehrschichtenmodell wurde das zuvor dargestellte Mehrschichtensystem auf ein Zwei-

schichtensystem, bestehend aus Deckblech und der unteren Schicht (Schicht 5) zur Simulation der Brückendetails vereinfacht, siehe Bild B.3. Das Mehrschichtensystem wurde mit derselben Flächenpressung wie das Finite-Elemente-Modell belastet. Durch eine iterative Anpassung des E-Moduls der Brückendetails wurden die im Mehrschichtenmodell berechneten Verschiebungen den Verschiebungen, die am Finite-Elemente-Modell berechnet wurden, angepasst. Die Ergebnisse sind in Form von äquivalenten E-Moduln in Tabelle B.3 zusammengestellt. Die iterativ bestimmten E-Moduln liegen zwischen  $40 \text{ N/mm}^2$  und  $128 \text{ N/mm}^2$ . Für den maßgebenden Lastfall LF 2 ergibt sich aufgrund der größten Verschiebungen der kleinste äquivalente E-Modul von  $E = 40 \text{ N/mm}^2$ . Für alle weiteren Mehrschichtenrechnungen wurde dieser

| Lastfall | Äquivalenter E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] | Verschiebung im Lastzentrum [mm] |           | Prozentuale Abweichung [%] |
|----------|---|----------------------------------|-----------|----------------------------|
|          |   | Mehrschichtensystem              | FE-Modell |                            |
| LF 1     | 47  | 2,466                            | 2,468     | 0,08                       |
| LF 2     | 40  | 2,799                            | 2,803     | 0,14                       |
| LF 3     | 121                                       | 1,143                            | 1,140     | 0,26                       |
| LF 4     | 128                                       | 1,091                            | 1,087     | 0,37                       |
| LF 5     | 53  | 2,243                            | 2,245     | 0,09                       |
| LF 6     | 51  | 2,312                            | 2,297     | 0,65                       |

Tab. B.3: Äquivalente E-Moduln zur Simulation der Brückendetails bei der Mehrschichtenrechnung

äquivalente E-Modul zur Simulation der Brückendetails verwendet. Eine Übersicht über die bei der Mehrschichtenrechnung wendeten Eingabeparameter sind in Bild B.1 und Tabelle B.1 dargestellt. Die mit „variabel“ gekennzeichneten Felder wurden zur Berücksichtigung unterschiedlicher Schichtdicken, Schichtarten und Einsatztemperaturen variiert.

### B.3 Anwendbarkeit des Mehrschichtensystems

Das gewählte und am Finite-Elemente-Modell kalibrierte Mehrschichtenmodell wurde zunächst anhand von exemplarischen Mehrschichtenrechnungen auf seine Anwendbarkeit zur Bestimmung der mittragenden Wirkung des Fahrbahnbelags hin untersucht. Hierzu wurde der Einfluss unterschiedlicher E-Moduln und Schichtdicken auf die Beanspruchungsgrößen Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen untersucht. Die Eingangsgrößen wurden hierbei wie folgt gewählt: Die E-Moduln der Asphaltsschichten (Schicht 1 und Schicht 2) wurde nach [HUE 1982] für einen Modellasphalt bei 25 °C mit  $E = 5.000 \text{ N/mm}^2$  angenommen. Das E-Modul für Epoxidharz wurde nach Bild B.4 mit  $E = 3.100 \text{ N/mm}^2$  gewählt.

### B.4 Einfluss des E-Moduls der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss des E-Moduls der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen untersucht. Hierfür wurde das E-Modul der Dichtungsschicht einmal um  $400 \text{ N/mm}^2$  auf  $3.500 \text{ N/mm}^2$  erhöht und einmal auf  $2.800 \text{ N/mm}^2$  reduziert. Der Einfluss des E-Moduls der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungs-

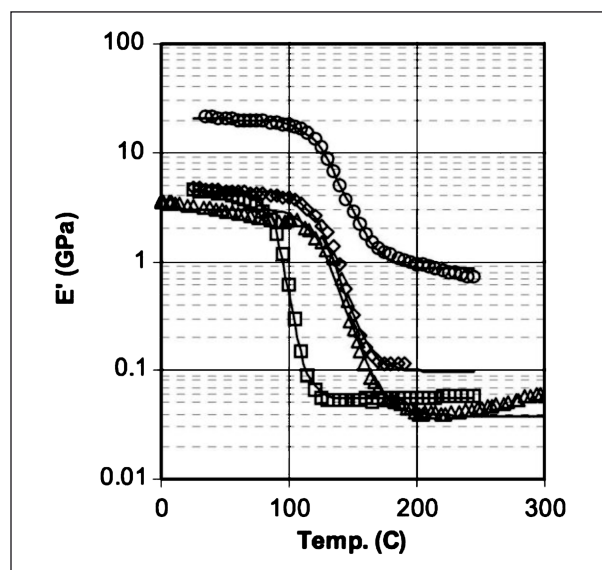


Bild B.4: E-Modul des Epoxidharzes in Abhängigkeit von der Temperatur

|                               |           |           |           |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]  | 3.500     | 3.100     | 2.800     |
| Spannung [N/mm <sup>2</sup> ] | -2,94     | -3,15     | -3,33     |
| Dehnung [mm]                  | -9,59E-06 | -1,03E-05 | -1,09E-05 |
| Verschiebung [mm]             | 1,113     | 1,115     | 1,117     |

Tab. B.4: Einfluss des E-Moduls der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen

größen ist in Tabelle B.4 zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der E-Modul nur einen geringen Einfluss auf die Beanspruchungsgrößen an der Unterkante des Deckblechs hat. Eine mögliche Steigerung des E-Moduls der Dichtungsschicht wird aus diesem Grund nicht weiter untersucht.

### B.5 Einfluss der Dicke der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen

In einem nächsten Schritt wurde der E-Modul der Dichtungsschicht konstant bei  $3.100 \text{ N/mm}^2$  gehalten und die Dicke der Dichtungsschicht variiert. Hierbei wurden die drei Schichtdicken 3 mm, 6 mm und 10 mm untersucht. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle B.5 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schichtdicke der Dichtungsschicht einen größeren Einfluss auf die Beanspruchungsgrößen hat als der E-Modul. Da in der Praxis die Schichtdicke des Dichtungssystems nach ZTV-ING Teil 7, Abschnitt 4 vorgegeben ist, ist eine Variation der Schichtdicke des Dichtungssystems nicht sinnvoll und wird aus diesem Grund auch nicht weiter untersucht.

### B.6 Einfluss des E-Moduls der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen

Nach den ersten Berechnungen zum Einfluss von Schichtdicke und E-Modul der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech wurden E-Moduln und Schichtdicken der beiden Asphalt-schichten variiert, um den Einfluss auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech zu untersuchen. Hierfür wurde zunächst der Einfluss des E-Moduls der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspru-

| Schichtdicke [mm]            | 3         | 6         | 10        |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Spannung [ $\text{N/mm}^2$ ] | -4,45     | -3,85     | -3,15     |
| Dehnung [mm]                 | -1,46E-05 | -1,26E-05 | -1,03E-05 |
| Verschiebung [mm]            | 1,190     | 1,157     | 1,115     |

**Tab. B.5:** Einfluss der Schichtdicke der Dichtungsschicht auf die Beanspruchungsgrößen

| E-Modul [ $\text{N/mm}^2$ ]  | 2.000     | 5.000     | 10.000    |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Spannung [ $\text{N/mm}^2$ ] | -7,73     | -3,15     | -0,29     |
| Dehnung [mm]                 | -2,55E-05 | -1,03E-05 | -7,41E-07 |
| Verschiebung [mm]            | 1,188     | 1,115     | 1,060     |

**Tab. B.6:** Einfluss des E-Moduls der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen

chungsgrößen untersucht, indem die Beanspruchungsgrößen für die drei E-Moduln  $2.000 \text{ N/mm}^2$ ,  $5.000 \text{ N/mm}^2$  und  $10.000 \text{ N/mm}^2$  berechnet wurden. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle B.6 zusammengestellt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass der E-Modul der Schicht 2 einen großen Einfluss auf die Beanspruchungsgrößen an der Unterkante des Deckblechs hat. So wird bei einer Erhöhung des E-Moduls von  $2.000 \text{ N/mm}^2$  auf  $10.000 \text{ N/mm}^2$  die Spannung im Deckblech von  $-7,73 \text{ N/mm}^2$  auf  $-0,29 \text{ N/mm}^2$  reduziert, was einer prozentualen Reduzierung von nahezu 100 % (96 %) entspricht. Durch eine Erhöhung der Steifigkeit des Asphalt-fahrbahnbelags lassen sich die Spannungen im Deckblech somit deutlich reduzieren.

### B.7 Einfluss der Schichtdicke der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen

Nachdem eine deutliche Spannungsreduktion im Deckblech infolge einer erhöhten Belagssteifigkeit der Schutzschicht (Schicht 2) nachgewiesen werden konnte, wurde der Einfluss der Schichtdicke der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen untersucht. Hierfür wurde bei konstantem E-Modul die Schichtdicke einmal um 10 mm auf 25 mm reduziert und einmal um 5 mm auf 40 mm erhöht. Die Ergebnisse der Berechnungen mit variabler Schichtdicke der Schutzschicht (Schicht 2) sind in Tabelle B.7 zusammengestellt.

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Schichtdicke der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech. Der Vergleich der Spannungen bei Schichtdicken von 25 mm und 40 mm zeigt, dass sich die Spannungen mit zunehmender Schichtdicke deutlich reduzieren lassen. So wird die Spannung von  $-5,99 \text{ N/mm}^2$  auf

| Schichtdicke [ $\text{N/mm}^2$ ] | 25        | 35        | 40        |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Spannung [ $\text{N/mm}^2$ ]     | -5,99     | -3,15     | -2,09     |
| Dehnung [mm]                     | -1,97E-05 | -1,03E-05 | -6,76E-06 |
| Verschiebung [mm]                | 1,235     | 1,115     | 1,063     |

**Tab. B.7:** Einfluss der Schichtdicke der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen



-2,09 N/mm<sup>2</sup> reduziert, was einer Spannungsreduktion von 65 % entspricht. Da neben dem E-Modul auch die Schichtdicke einen deutlichen Einfluss auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech hat, werden beide Parameter bei den nachfolgenden Betrachtungen mit berücksichtigt.

### B.8 Einfluss des E-Moduls der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen

Abschließend wurde der Einfluss der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen untersucht. Zunächst wurde der E-Modul der Deckschicht (Schicht 1) analog zur Variation des E-Moduls der Schutzschicht (Schicht 2) variiert. Die Berechnungsergebnisse für die drei unterschiedlichen E-Moduln sind in Tabelle B.8 zusammengestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch der E-Modul der Deckschicht (Schicht 1) einen deutlichen Einfluss auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech hat. Die Spannungen werden bei einer Erhöhung des E-Moduls von 2.000 N/mm<sup>2</sup> auf 10.000 N/mm<sup>2</sup> von -8,61 N/mm<sup>2</sup> auf 0,41 N/mm<sup>2</sup> reduziert, was wiederum einer prozentualen Spannungsreduktion von nahezu 100 % entspricht. Die Spannungsreduktion infolge des erhöhten E-Moduls der Deckschicht (Schicht 1) entspricht in etwa der Spannungsreduktion infolge eines erhöhten E-Moduls der Schutzschicht (Schicht 2). Somit lässt sich sagen, dass die Steifigkeiten beider Schichten den gleichen Einfluss auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech haben. Das heißt, dass für eine Erhöhung der mittragenden Wirkung des Asphaltfahrbahnbelags beide Schichten zusammen, aber auch jede Schicht einzeln betrachtet werden kann.

| E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]  | 2.000     | 5.000     | 10.000   |
|-------------------------------|-----------|-----------|----------|
| Spannung [N/mm <sup>2</sup> ] | -8,61     | -3,15     | 0,41     |
| Dehnung [mm]                  | -2,84E-05 | -1,03E-05 | 1,56E-06 |
| Verschiebung [mm]             | 1,314     | 1,115     | 0,963    |

**Tab. B.8:** Einfluss des E-Moduls der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen

### B.9 Einfluss der Schichtdicke der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen

Abschließend wurde der Einfluss der Schichtdicke der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech untersucht. Die Variation der Schichtdicke erfolgte analog zur Variation der Schichtdicke der Schutzschicht (Schicht 2). Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle B.9 zusammengestellt.

Die Berechnungsergebnisse sind identisch zu den Berechnungen mit variierender Schichtdicke von der Schutzschicht (Schicht 2). Der Einfluss der Schichtdicken der Deckschicht (Schicht 1) und der Schutzschicht (Schicht 2) auf die Beanspruchungsgrößen im Deckblech ist somit identisch.

| Schichtdicke [mm]             | 25        | 35        | 40        |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Spannung [N/mm <sup>2</sup> ] | -5,99     | -3,15     | -2,09     |
| Dehnung [mm]                  | -1,97E-05 | -1,03E-05 | -6,76E-06 |
| Verschiebung [mm]             | 1,235     | 1,115     | 1,063     |

**Tab. B.9:** Einfluss der Schichtdicke der Deckschicht (Schicht 1) auf die Beanspruchungsgrößen

## C Ergebnisse der Bauteilversuche HANV-Bioharz

### C.1 Allgemeines

Da die Prüfkörper der Belagsvariante HANV-Bioharz mit anderen Abmessungen als die übrigen Prüfkörper hergestellt wurden, konnten die Ergebnisse der Bauteilversuche nicht miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse der statischen und dynamischen Bauteilversuche sind im Folgenden dargestellt.

### C.2 Ergebnisse der statischen Bauteilversuche

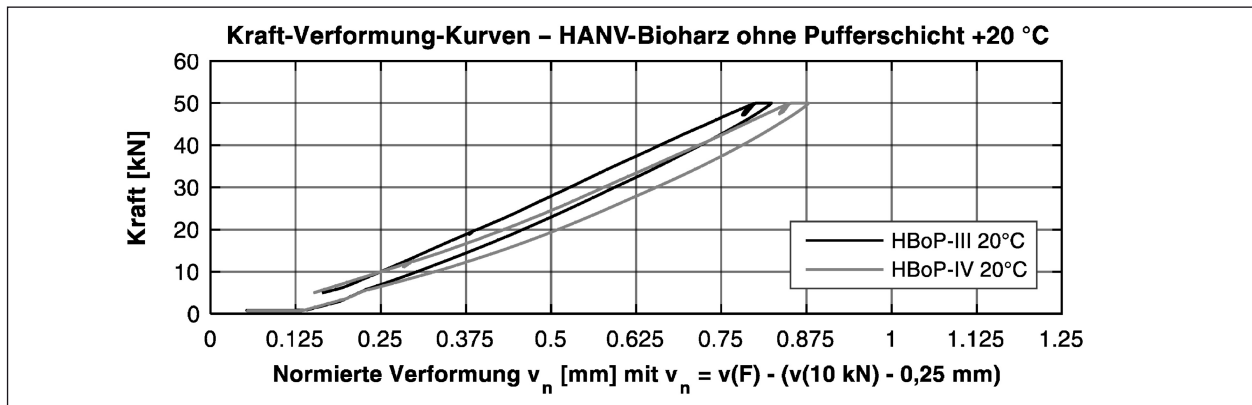


Bild C.1: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper HANV-Bioharz ohne Pufferschicht – statisch 20 °C

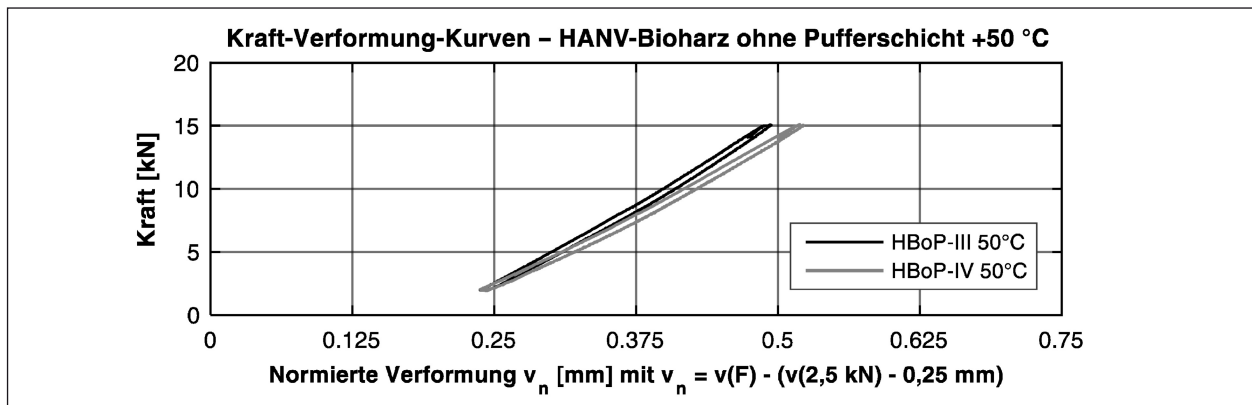
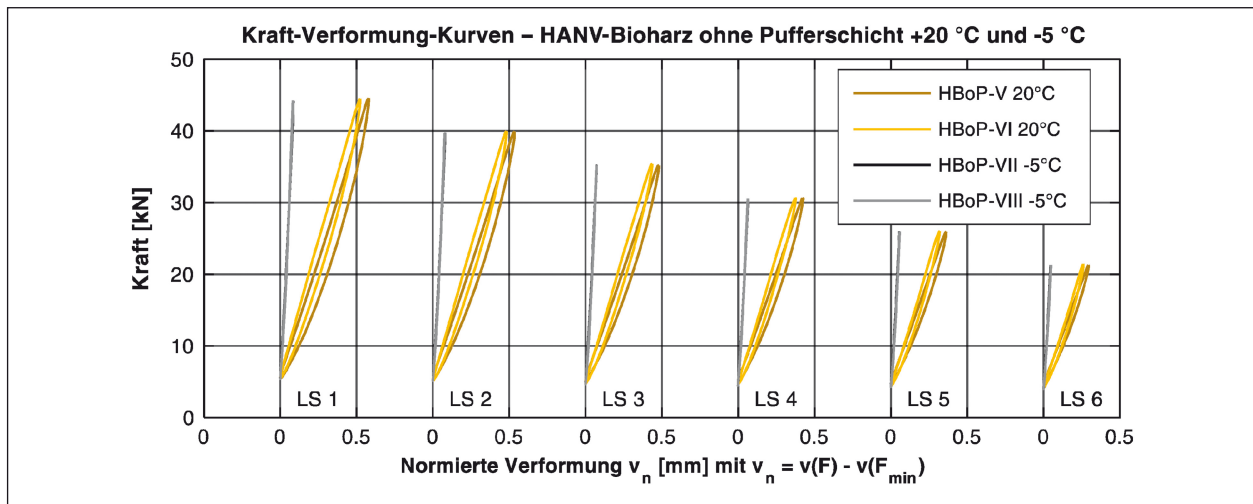


Bild C.2: Normierte Kraft-Verformung-Kurven der Prüfkörper HANV-Bioharz ohne Pufferschicht – statisch 50 °C

### C.3 Ergebnisse der dynamischen Bauteilversuche



**Bild C.3:** Normierte Kraft-Verformung-Kurven für die Laststufen 1 bis 6 der Prüfkörper HANV-Bioharz ohne Pufferschicht – dynamisch +20 °C (Lastwechsel 40.000-50.000) und -5 °C (Lastwechsel 990.000-1.000.000)

### C.4 Verformungsmoduln

| Prüf­temperatur                             | Prüfung    |         |        |           |          |           |
|---|------------|---------|--------|-----------|----------|-----------|
|   | Statisch   |         |        | Dynamisch |          |           |
|   | Prüfkörper |         |        |           |          |           |
|   | HBoP-III   | HBoP-IV | HBoP-V | HBoP-VI   | HBoP-VII | HBoP-VIII |
| <b>Ausgewertet zwischen 5 kN und 15 kN</b>  |            |         |        |           |          |           |
| 50 °C                                       | 0,019      | 0,020   | /      | /         | /        | /         |
| 20 °C                                       | 0,014      | 0,018   | /      | /         | /        | /         |
| <b>Ausgewertet zwischen 30 kN und 50 kN</b> |            |         |        |           |          |           |
| 20 °C                                       | 0,014      | 0,014   | 0,0094 | 0,0093    | /        | /         |
| -5 °C                                       | /          | /       | /      | /         | 0,0019   | 0,0016    |

**Tab. C.1:** Verformungsmoduln – Prüfkörper HANV-Bioharz ohne Pufferschicht, in [mm/kN]

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

## 2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie  
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen  
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke  
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard  
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

## 2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung  
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel  
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen  
Hegger, Reiß € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis  
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen  
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken  
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen  
Freundt, Böning € 15,00

## 2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen  
Friedrich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen  
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)  
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem  
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken  
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken  
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse  
Borrmann, Fischer, Dori, Wild  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke  
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken  
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel  
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken  
Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken  
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton  
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken  
Müller € 15,00

## 2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken  
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen  
Placzek, Pohl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln  
Mayer, Brennerberger, Großmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln**  
Mayer, Brenninger, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton**

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells**  
Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Stand- sicherheit und Gebrauchstauglichkeit**

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln**  
Schmidt, Simon, Guder, Juknat,

Hegemann, Dehn € 16,00

**B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger**

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 121: Zerstorungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse**

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staeck  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

**B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**

Geißler, Krohn € 15,50

**B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thró  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**

Mielecke, Graubner, Roth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**  
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

**B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**  
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

**B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**  
Schmellekamp

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken**

Gehrlein, Lingemann, Jungwirth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2017

**B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)