

Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbahnplatte

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 8

bast

Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbahnplatte

von

Jürgen Krieger

mit Beiträgen von
Edmund Rath

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau

Heft B 8

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht Ergebnisse aus ihrer Arbeit, vor allem Forschungsvorhaben, 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, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Am Alten Hafen 113–115, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 4 60 93–95, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 90210:
Untersuchungen am Brückenbelag einer
orthotropen Fahrbahnplatte**

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon (0 22 04) 43-0
Telefax (0 22 04) 43-8 32

Redaktion:

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 4 60 93–95
Telefax (04 71) 4 27 65

ISSN 0943-9293

ISBN 3-89429-586-4

Bergisch Gladbach, April 1995

Kurzfassung · Abstract · Résumé

Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbahnplatte

Brückenbeläge auf orthotropen Fahrbahnplatten unterliegen infolge des Trag- und Temperaturverhaltens der Konstruktionen hohen Beanspruchungen. Zur Erfassung des Einflusses von Verkehrsbelastungen und Temperatureinwirkungen auf das Verhalten orthotroper Fahrbahnplatten einschließlich Brückenbelag und auf die Haftung zwischen Brückenbelag und Stahlblech dient die Dauerschwellbiegeprüfung, die heute einen wesentlichen Bestandteil der Grundprüfung für Brückenbeläge auf Stahl darstellt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Untersuchung am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbahnplatte“ wurden durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Messungen an zwei Brückenbauwerken durchgeführt. Weiterhin wurden zwei Probekörper mit in den einzelnen Belagschichten applizierten Dehnungsmeßstreifen hergestellt und einer Prüfung gemäß TP-BEL-ST unterzogen. Um die Ergebnisse dieser Laborversuche direkt mit den Bauwerksmessungen vergleichen zu können, weisen Probekörper und Brückenbauwerke einen identischen Belagsaufbau auf. Zur Klärung des Einflusses von Temperatur und Art der Lasteinleitung auf das Last-Verformungsverhalten des Verbundkörpers wurden zusätzlich numerische Berechnungen nach der Methode der Endlichen Elemente (FEM) durchgeführt.

Das Ziel dieser Untersuchungen bestand einerseits in der Überprüfung der Vorgaben für die Dauerschwellbiegeprüfung am Bauwerk selbst. Andererseits wurden anhand der Meßergebnisse Last- bzw. Verformungskollektive aufgestellt, welche die wirkliche Beanspruchung aus Verkehr so beschreiben, daß hieraus verbesserte Annahmen für die zukünftige Durchführung der Dauerschwellbiegeprüfung abgeleitet werden können.

Aus einer Gegenüberstellung der Dehnungen zwischen Dauerschwellbiegeprüfung und Bauwerk läßt sich ableiten, daß die Vorgaben der Dauerschwellbiegeprüfung im Hinblick auf das statische System und die Lasteinleitung modifiziert werden sollten. Weiterhin zeigen die aus den Bauwerksmessungen abgeleiteten Pfeilhöhenkollektive, daß die Dauerschwellbiegeprüfung auch hier den Verhältnissen in situ nicht in allen Punkten gerecht wird.

Studies on bridge surfacings on orthotropic plates

Due to the deformation and temperature behaviour of structures, bridge surfacings of orthotropic plates are highly stressed. The influence of live loads and temperature stress on the behaviour of orthotropic plates and surfacings and on the bond between surfacing and steel plate is assessed by the fatigue bending test. Today, this procedure is an essential part of the qualification test for bridge surfacings on steel plates.

In the framework of the research project “Studies on bridge surfacings of orthotropics plates”, the Federal Highway Research Institute (BASt) conducted in situ measurements on two bridges. Furthermore, two test specimen with wire strain gauges embedded in the individual surfacing layers were subjected to a test in accordance with TP-BEL-ST (Technical specifications for the testing of surfacings on steel). In order to facilitate an immediate comparison between the results of the laboratory measurements and the in situ readings, the structure of the surfacings tested had to be identical. Additionally, calculations on the basis of the method of finite elements (FEM) were carried out so as to evaluate in how far the load deflection response of the composite structures was influenced by the temperature and the type of load application.

The aim of this study was, in a first step, to verify the appropriateness of the fatigue bending test requirements in measurements taken in situ. Furthermore, deformation range histograms were drawn up on the basis of the readings, allowing the actual live loads to be described more realistically. The assumptions to be derived for future fatigue bending tests can thus be more appropriate.

As a result of the comparison between the strains measured in the laboratory test and those given by the in situ readings, it appears to be necessary to modify the fatigue bending test requirements regarding the static system and the load application. Furthermore, the deformation range histograms derived from the in situ readings demonstrate that the fatigue bending test does not fully meet the real site conditions.

Etudes sur les revêtements de pont sur dalles orthotropes

Dû au comportement de déformation et de tempé-

rature de l'ouvrage d'art, les revêtements de pont sur dalles orthotropes sont sujets à des efforts élevés. L'influence des charges mobiles et de la température sur le comportement des dalles orthotropes et du revêtement ainsi que sur l'adhérence entre le revêtement et la tôle d'acier est évaluée à l'aide de l'essai de fatigue par flexion. Cet essai constitue aujourd'hui un élément essentiel des essais de qualité des revêtements de pont sur acier.

Dans le cadre du programme de recherche «Etudes sur les revêtements de pont sur dalles orthotropes», l'Institut Fédéral de Recherches Routières (BASt) a effectué des mesures in situ sur deux ouvrages d'art. En plus, deux éprouvettes contenant des jauges extensométriques dans les différentes couches de revêtement ont été sujettes à un essai selon TP-BEL-ST (spécifications techniques pour l'essai des revêtements sur acier). La structure de revêtement des éprouvettes et des ponts devait être identique afin de faciliter la comparaison immédiate des résultats issus des essais en laboratoire et de ceux obtenus in situ. En plus, l'influence de la température et du type d'application de la charge sur le comportement de déformation en charge de la structure mixte a été évaluée à l'aide de calculs selon la méthode des éléments finis (FEM).

Le but de ces études était d'abord de vérifier, par des essais in situ, dans quelle mesure les spécifications de l'essai de fatigue par flexion étaient appropriées à la réalité. Ensuite, des histogrammes de variation des déformations ont été établis sur la base des mesures in situ, permettant une description plus réaliste des charges mobiles. Il est ainsi possible de déduire, pour l'avenir, des suppositions plus appropriées pour des essais de fatigue par flexion.

Une comparaison entre les résultats obtenus en laboratoire et in situ révèle que les spécifications de l'essai de fatigue par flexion devraient être modifiées en ce qui concerne le système statique et l'application de la charge. En outre, les histogrammes de variation des déformations déduits des mesures in situ démontrent que l'essai de fatigue par flexion ne correspond pas toujours aux conditions trouvées en réalité.

Inhalt

1	Einleitung	7	7	Temperaturmessungen	19
			7.1	Messungen an der	
2	Dauerschwellbiegeprüfung	7	7.2	Rheinbrücke der A42	19
	nach TP-BEL-ST			Jahrestemperaturganglinie der	
3	Bauwerk und Fahrbahnbelag	8		orthotropen Platte	19
3.1	Allgemeines	8	8	Ableitung eines Beanspru-	
3.2	Rheinbrücke im Zuge der A42	8	8.1	chungskollektivs	20
3.3	Brücke über den Petersdorfer		8.2	Allgemeines	20
	See im Zuge der A19	9	8.3	Hochrechnung der Messungen	
			8.4	zu Tageswerten	20
4	Durchbiegungsmessungen	9	8.5	Ableitung eines	
4.1	Rheinbrücke im Zuge der A42	9		Pfeilhöhenkollektivs	22
4.1.1	Meßanordnung, Geräte	9	9.1	Extremwerte der klassierten	
4.1.2	Auswertung der		9.2	Pfeilhöhen	23
	Durchbiegungsmessungen	10	9.2.1	Temperaturunabhängiges	
4.1.3	Meßzeitpunkte,		9.2.2	Pfeilhöhenkollektiv	24
	Stichprobenraster	11	9.2.3	Laboruntersuchungen	25
4.1.4	Ergebnisse der		9.2.4	E-Moduli	25
	Durchbiegungsmessungen	11	9.2.5	Dauerschwellbiegeprüfungen	26
4.2	Brücke über den Petersdorfer		9.2.6	Allgemeines	26
	See im Zuge der A19	12	9.2.7	Versuchsprobekörper und	
4.2.1	Meßanordnung	12	9.2.8	Versuchseinrichtung	26
4.2.2	Belastungsfahrzeug,			Meßeinrichtung, Meßgeräte	26
	Temperaturen	13	9.2.9	Belastungseinrichtung	27
4.2.3	Ergebnisse der		9.2.10	Meßwerterfassung	27
	Durchbiegungsmessungen	13	9.2.11	Herstellen der	
4.3	Gegenüberstellung der		9.2.12	Versuchsprobekörper	27
	Bauwerksmessungen	14	9.2.13	Versuchsdurchführung	28
5	Dehnungsmessungen	15	9.2.14	Auswertung der Versuche	28
5.1	Rheinbrücke im Zuge der A42	15	10	FEM-Analysen zur Dauer-	
5.1.1	Meßanordnung, Geräte	15	10.1	schwellbiegeprüfung	29
5.1.2	Ergebnisse der		10.2	Allgemeines	29
	Dehnungsmessungen	16	10.3	Berechnungsannahmen	29
5.2	Brücke über den Petersdorfer		10.4	FEM-Netz und	
	See im Zuge der A19	17	10.5	Randbedingungen	30
5.2.1	Meßanordnung, Geräte	17	10.6	Berechnungsergebnisse	31
5.2.2	Ergebnisse der			Einfluß der Lasteinleitung	32
	Dehnungsmessungen	17		Einfluß der Temperatur	32
5.3	Gegenüberstellung der		11	Modifizierung der Dauer-	
	Bauwerksmessungen	17	11.1	schwellbiegeprüfung	33
6	LKW-Verkehrsstärken	18	11.2	Allgemeines	33
6.1	Verkehrszählungen an der		11.3	Probekörperabmessungen und	
	A 42	18	11.4	Auflagerbedingungen	33
6.2	Normierte Tagesganglinie	18	11.5	Art der Beanspruchung	34
6.3	Jahresganglinie für den LKW-			Beanspruchungskollektiv	35
	Verkehr	18		Belagstemperatur	36

12	Zusammenfassung und Ausblick	36
13	Literatur	38
	Anhang 1: Tabellen	41
	Anhang 2: Abbildungen	79

1 Einleitung

Brückenbeläge auf orthotropen Fahrbahnplatten unterliegen infolge des Trag- und Temperaturverhaltens der Konstruktion hohen Beanspruchungen. Zur Klärung des Einflusses von Verkehrsbelastungen und Temperatureinwirkungen auf die Verformung von orthotropen Fahrbahnplatten einschließlich Brückenbelag und auf die Haftung zwischen Brückenbelag und Stahlblech hat das Otto-Graf-Institut (FMPA Baden-Württemberg in Stuttgart) in den Jahren 1968 bis 1971 umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Daraus wurde die Dauerschwellbiegeprüfung entwickelt, die heute einen wesentlichen Bestandteil der Grundprüfung für Brückenbeläge auf Stahl darstellt.

Gemäß [12] "Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Herstellung von Brückenbelägen auf Stahl" (ZTV-BEL-ST) müssen Abdichtungssysteme einer solchen Grundprüfung unterzogen werden. Die Durchführung der Dauerschwellbiegeprüfung ist in "Technische Prüfvorschriften für die Prüfung der Dichtungsschichten und der Abdichtungssysteme für Brückenbeläge auf Stahl" (TP-BEL-ST) [14] geregelt, die Anforderungen sind in "Technische Lieferbedingungen für Baustoffe der Dichtungsschichten für Brückenbeläge auf Stahl" (TL-BEL-ST) [13] festgelegt.

Auf Anregung des Arbeitskreises 7.6.2 "Brückenbeläge auf Stahl" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) wurden Messungen an zwei Bauwerken durchgeführt, mit denen die Vorgaben für die Dauerschwellbiegeprüfung unter praxisgerechten Bedingungen am Bauwerk selbst überprüft werden sollen. Ziel dieser Überprüfung ist die Entwicklung eines Last- bzw. Verformungskollektivs, welches die wirkliche Beanspruchung aus Verkehr so beschreibt, daß hieraus ggf. ein Simulationsmodell zur Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung entwickelt werden kann.

Im 1. Zwischenbericht [6] wurden erste Meßergebnisse vorgestellt, die an der orthotropen Fahrbahnplatte der Rheinbrücke im Zuge der BAB A 42 (Emscherschnellweg) gewonnen wurden. Es werden die Durchführung einzelner Testmessungen unter definierten Lasten sowie Messungen unter eingeschränktem Verkehr und deren Ergebnisse beschrieben. Die Vorgaben für die Durchführung der Langzeitmessungen unter vollem Verkehr wurden festgelegt.

Er geht des weiteren auf Laboruntersuchungen ein, die der Bestimmung des Elastizitätsmoduls (E-Moduls) der Gußasphaltschichten (Schutz- und Deckschicht) dienen. Mittels dynamischer Werkstoffprüfungen wurden für verschiedene Tempera-

turen und Fahrgeschwindigkeiten Werte dieses E-Moduls aus Untersuchungen an Rückstellproben des Gußasphaltes ermittelt.

Im vorliegenden Schlußbericht wird aus den Ergebnissen der durchgeführten Messungen an der Rheinbrücke der A42 ein Beanspruchungs- bzw. Verschiebungskollektiv für signifikante Meßstellen abgeleitet. Um den Einfluß verschiedener Konstruktionsformen orthotroper Platten zu untersuchen, werden den Ergebnissen der Messungen an der Rheinbrücke der A42 die Ergebnisse von Messungen an der Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19 gegenübergestellt.

Des weiteren werden die Ergebnisse der in der BASt durchgeführten Versuche und numerischen Berechnungen der Dauerschwellbiegeprüfung [7] detailliert beschrieben und interpretiert.

Abschließend werden unter Verwendung der aus den Bauwerksmessungen abgeleiteten Beanspruchungskollektive sowie der Versuche und numerischen Berechnungen erste Hinweise zur Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung abgeleitet.

2 Dauerschwellbiegeprüfung nach TP-BEL-ST

Mit der Dauerschwellbiegeprüfung wird der Brückenbelag - meist Gußasphalt - in Verbindung mit einem 12 mm dicken Fahrbahnblech unter dynamischer Belastung als Verbundkörper geprüft, wobei insbesondere die kraftschlüssige Verbindung zwischen Blech und Belag im Vordergrund steht. Der Prüfablauf bei der Dauerschwellbiegeprüfung ist in den TP-BEL-ST festgelegt; die Anforderungen an die Baustoffe und Systeme für die Grundprüfung (einschl. der Dauerschwellbiegeprüfung) ergeben sich aus den TL-BEL-ST. Sie besagen, daß nach 1 Mio. Lastspielen keine Ablösung bzw. Schichtentrennung im Verbundkörper auftreten darf.

Bei der Überfahrt eines Schwerfahrzeuges über eine orthotrope Platte werden Verformungen im Verbundkörper Stahlblech/Oktaphaltdichtungsschicht/Gußasphalt erzeugt. Dabei ist die Oktaphaltdichtungsschicht aufgrund ihrer vom Stahl und vom Gußasphalt abweichenden mechanischen Eigenschaften Beanspruchungen unterworfen, die die Haftung an den beiden anderen genannten Schichten beeinträchtigen und sogar ganz aufheben können. Als Schadenskriterien werden vermutlich Ablösungen an Grenzschichten maßgebend sein und nicht Ermüdungen, d.h. Strukturveränderungen innerhalb der Oktaphaltdichtungsschicht. Bei der Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung wird

der Identifizierung dieses Schadenskriteriums daher verstärkte Aufmerksamkeit zu widmen sein.

Zur Beschreibung der Prüfanordnung und des Prüfablaufs bei der Dauerschwellbiegeprüfung wird auszugsweise aus den TP-BEL-ST [14] zitiert:

Die Probeplatten bestehen aus Stahl St 37. Ihre Abmessungen betragen 700 mm x 200 mm x 12 mm. Auf die Probeplatten wird der Brückenbelag, bestehend aus Dichtungsschicht, Schutz- und Deckschicht, über die gesamte Länge von 700 mm und über die Breite von 150 mm aufgebracht. Die Schutz- und Deckschicht ist jeweils in 35 mm Dicke aufzubringen, zusammen 70 mm \pm 2 mm. Als Mischgut wird in der Regel für die Schutz- und Deckschicht ein Gußasphalt 0/11 gemäß ZTVbit eingesetzt, der im Prüfinstitut vorgehalten wird.

Im Versuch sind die Probekörper auf 3 Stahlwalzen mit 50 mm Durchmesser im Abstand von $l = 300$ mm zu lagern. Die Last wird über einen vierbeinigen Belastungsbock direkt in die Stahlplatte eingeleitet, die für diesen Zweck an der unbeschichteten Plattenunterseite in jedem Feld jeweils eine Versteifungsrippe hat.

Die Belastung der Probekörper erfolgt mit Hilfe eines Einzelprüfzylinders, der mit dem wechselnden Öldruck eines hydraulischen Pulsators beaufschlagt wird oder mit einem servohydraulisch gesteuerten Einzelprüfzylinder. Die Belastungsfunktion entspricht einer Sinusfunktion, die mit konstanter Last-Amplitude zwischen der Grundlast (F_G) und der Oberlast (F_O) schwingt. Die Frequenz der Belastungsfunktion beträgt $f = 2$ Hz.

Die Oberlast F_O wird so gewählt, daß sich an der Probeplatte ohne Belag in den Lastangriffspunkten eine Durchbiegung von $l/600 = 0.50$ mm einstellt. Mit der Oberlast wird dann der mit Belag versehene Probekörper zunächst statisch belastet und die Durchbiegung festgestellt. Die Grundlast F_G wird mit ca. $0.15 F_O$ festgelegt.

Während der anschließenden dynamischen Belastung bei Raumtemperatur ($20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ K}$) werden die auftretenden Durchbiegungen bzw. möglicherweise auftretende Durchbiegungsänderungen infolge sich einstellender Belagsschäden gemessen. Der Belag wird dabei jeweils auf evtl. Risse und Ablösungen von der Probeplatte oder sonstige Schäden untersucht.

Abbildung 2.1 zeigt die Prüfanordnung bei der Dauerschwellbiegeprüfung.

3 Bauwerk und Fahrbahnbelag

3.1 Allgemeines

Für die Durchführung der Messungen wurden die beiden Bauwerke Rheinbrücke im Zuge der A42 (Emscherschnellweg) sowie die Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19 ausgewählt.

Bei beiden Bauwerken handelt es sich um Stahlkonstruktionen, bei denen die Fahrbahn als orthotrope Platte ausgeführt ist. Bei der Rheinbrücke der A42 beträgt die Dicke des Fahrbahnbleches im Bereich des Meßprofils 12 mm; bei der Brücke über den Petersdorfer See wurde ein 10 mm starkes Blech verwendet. Die beiden Bauwerke unterscheiden sich außerdem im Hinblick auf die Abstände der Querträger. Während bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 der Querträgerabstand bei 4,19 m liegt, sind die Querträger bei der Brücke über den Petersdorfer See in einem Abstand von 2,75 m angeordnet. Auch die konstruktive Ausbildung der Steifen ist bei beiden Bauwerken unterschiedlich. Der Aufbau des Belages ist bei beiden Bauwerken identisch.

3.2 Rheinbrücke im Zuge der A42

Die Rheinbrücke im Zuge der A42 (Emscherschnellweg) besteht aus einer 310 m langen Strombrücke aus Stahl, einer 300 m langen Spannbetonvorlandbrücke (6 Felder mit je 50 m Stützweite) linksrheinisch und einer 420 m langen Spannbetonvorlandbrücke (8 Felder mit je 52.5 m Stützweite) rechtsrheinisch. Als Haupttragwerk wurde eine Schrägeilbrücke mit 4 x 3 parallelen Seilgruppen ausgeführt, wobei die Rückverspannung der Stromöffnung in den Spannbetonvorlandbrücken erfolgte. Im Bereich der beiden Pylone auf den Strompfeilern ist die Stahlbrücke druckfest und biegesteif mit den Betonüberbauten der Vorlandbrücken verbunden.

Der Querschnitt der stählernen Strombrücke ist als torsionssteifer Mittelträgerkasten mit einer mittig liegenden Seilebene ausgebildet, an den die äußeren Fahrbahnbereiche mit Druckstreben angeschlossen sind. Die Dicke des Fahrbahnbleches variiert zwischen 12 mm und 20 mm (im Bereich des Meßprofils: Blechdicke = 12 mm). Der Querträgerabstand beträgt 4190 mm, die Längssteifen sind als Trapezprofile mit einer Höhe von 300 mm und einer Blechdicke von 6 mm ausgebildet. Der Abstand der Längssteifenstege

beträgt 300 mm. Die Abbildung 3.1 zeigt eine Bauwerksübersicht.

Der Fahrbahnbelag wurde wie folgt ausgeführt:

- Grundierungs- und Haftschiicht (Oktahaftmasse, ca. 600 μm)
- splittverfestigte Asphaltmastixschicht (Oktaphalt 0/5, 10 mm)
- Schutzschicht (Gußasphalt 0/11, 35 mm)
- Deckschicht (Gußasphalt 0/11, 35 mm)

Die genaue Zusammensetzung des Mischgutes ist aus den Ergebnissen der Eignungsprüfungen (Abb. 3.2 und 3.3) zu ersehen.

3.3 Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

Bei der Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19 handelt es sich um eine 264 m lange Stahlkonstruktion mit zwei ca. 16 m langen Vorlandbrücken aus Stahlbeton. Die Stützweiten der Stahlbrücke betragen bei den beiden Außenfeldern 77 m und 110 m beim Mittelfeld (vgl. Abb. 3.4).

Ein Querschnitt des Bauwerks ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Die Längsträger weisen eine Bauhöhe von 2,66 m auf. Die Querträger sind 0,73 m hoch und liegen in einem Abstand von 2,75 m. Der Aufbau des Fahrbahnbelages entspricht dem der Rheinbrücke der A42 (Oktahaftmasse 600 μm ; Oktaphalt 0/5 mm, 10 mm; zwei Gußasphaltschichten je 35 mm). Die Dicke des Fahrbahnbleches beträgt im Bereich des Meßquerschnittes 10 mm. Die Verformungsmessungen an diesem Bauwerk wurden durch das Referat N 5 der Außenstelle Berlin durchgeführt.

4 Durchbiegungsmessungen

4.1 Rheinbrücke im Zuge der A42

4.1.1 Meßanordnung, Geräte

Am Hauptfahrestreifen 'Unterstrom' wurde im Bereich der Seileinleitung der Seilgruppe 4 mittig zur rechten Radspur ein Meßprofil in Feldmitte zwischen zwei Querträgern eingerichtet. Die Dicke des Fahrbahnbleches beträgt hier 12 mm, die der Längssteifen 6 mm.

Zur Erfassung der Blechverformung wurden in diesem Meßprofil an der Unterseite der orthotropen Fahrbahnplatte neun induktive Wegaufnehmer (Typ HBM W2) installiert, mit denen relative Verformungen gegen ein praktisch starres Meßträger-

system in vertikaler Richtung gemessen werden (Biegelinienänderungen). Die mittlere Meßstelle (Meßstelle 5) liegt in der Mitte der theoretischen rechten Rad-Rollspur. Die Anordnung der Meßstellen ist in den Abbildungen 4.1 und 4.2 dargestellt.

Als Meßgerät für die Verformungsmessungen dient ein 'Digitaler Meßverstärker DMC 9012 A' mit DMV 50) der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik (HBM). Die Steuerung des Meßablaufs erfolgt mit 'Dago-PC', einer Software der 'Gesellschaft für Strukturanalyse' (GfS), Aachen. Die Meßgeräte sind im Hohlkasten der Brücke in einem geschützten Meßraum installiert.

Alle Meßeinrichtungen wurden nach Betriebsbereitschaft einer Reihe von Funktionstests unterzogen. Probemessungen unter definierten Verkehrslasten wurden vor Inbetriebnahme des Bauwerks durchgeführt und für Parameterabschätzungen hinsichtlich der automatischen Ablaufsteuerung (Meßbereiche, Abtastfrequenz, Meßdauer, Speicherbedarf) ausgewertet [6].

Zur Abgrenzung "hochfrequenter" Meßwertanteile ($f > 2$ [Hz]) wurden auch dynamische Ereignisse unter dem Einfluß definierter Verkehrslasten untersucht. Hierbei ging es weniger um die Größenordnung der erfaßten Gesamtdurchbiegungen als vielmehr um die Ermittlung überlagerter, kurzweiliger Durchbiegungsanteile. Dabei war zu unterscheiden zwischen wirklichen mechanischen Schwingungen am Bauwerk, die bei der Beschreibung der Verformung unter Verkehr nicht unterdrückt werden dürfen und solchen, die lediglich die Meßeinrichtung beeinflussen und vor weiteren Auswertungen eliminiert werden müssen.

Als Lastfahrzeuge dienten zwei Meßfahrzeuge mit Radlasten zwischen 8 kN und 60 kN. Untersucht wurde der Verformungsverlauf einzelner Bauwerksteile unter rollendem Verkehr sowie fahrzeuginduzierte Schwingungen bei stehendem Fahrzeug. Die Abtastfrequenz betrug bei diesen wie auch bei den folgenden Messungen 150 Hz.

Die Ergebnisse der Frequenzanalyse bei stehendem Fahrzeug mit laufendem Motor (Gesamtgewicht: 4100 kg) zeigten keine nachweisbaren Auswirkungen der Meßträgerschwingungen auf die Meßwerte.

Demgegenüber treten bei fließendem Verkehr mit höheren Lasten Schwingungen im Bereich um 10 Hz auf, die mit Amplituden um 50 μm die langweiligen Meßsignale deutlich überlagern. Sie treten beim Anrollen schwerer Fahrzeuge auf. Für die durchgeführte statistische Auswertung der Meßergebnisse sind diese Schwingungen jedoch ohne Bedeutung, da die Platte in allen Querprofilpunkten

phasengleich schwingt und sich somit dieser Einfluß auf die rechnerische Bestimmung der Pfeilhöhen (als Maß für die Krümmung) nicht auswirkt.

Eine Überprüfung der Abtastfrequenz bei den Probemessungen ergab ausreichende Auflösung bei 150 Hz. Die Auflösung des Verstärkers wurde mit 0.1 µm/digit festgestellt.

4.1.2 Auswertung der Durchbiegungsmessungen

Zur Entwicklung eines Auswerteschemas wurden zunächst zwei Testmessungen unter eingeschränktem Verkehr durchgeführt (6.8.91 und 20.3.92).

Am 6.8.91 erfolgte die erste Meßserie unter Verkehrsbelastung. Der Verkehr war zur Zeit dieser Messung durch Sperrung der Überholstreifen wegen Beschichtungsarbeiten an den Brückenseilen beeinflusst. Es wurden 9 Einzelmessungen über einen Zeitraum von je 66.7 sec durchgeführt. Eine Einzelmessung wurde immer dann gestartet, wenn mindestens ein LKW erwartet wurde. Die Ergebnisse sind also selbst für den eingeschränkten Verkehr nicht repräsentativ; sie dienen lediglich dazu, ein Auswerteschema zu entwickeln, mit dem die Meßergebnisse statistisch aufbereitet werden können.

Unter bis auf die Temperatur gleichen äußeren Bedingungen wie bei der ersten Meßserie wurden am 20.3.92 zwei ½-Stunden-Messungen durchgeführt. Hiermit wurde der endgültige Meßmodus für die Langzeitmessungen abschließend geprüft. Als Ergebnis der beiden Probemessungen kann festgehalten werden:

- Für die statistische Beschreibung der ermittelten Krümmungen (Pfeilhöhen) werden je 10 Klassen zu 0,05 mm bzw. 0,1 mm Klassenbreite positiv und negativ sowie zusätzlich je eine Randklasse gewählt. In aus den Klassierungen gewonnenen Histogrammen werden die Maxima der positiven Pfeilhöhen und die Minima der negativen Pfeilhöhen dargestellt. Positive Krümmungen entsprechen gemessenen Pfeilhöhen nach oben. Belegungen des Wertes "Null" (Krümmung = 0) werden entsprechend der Aufgabenstellung in der Statistik nicht dargestellt. Die Meßstellenhistogramme werden in 3D-Grafiken (positiv und negativ) zusammengefaßt. Die Extremwerte sind aus einem Spanndiagramm ersichtlich (Spanne zwischen Maximum und Minimum).
- Die weiteren Auswertungen erfolgen auf der Grundlage der ermittelten Krümmungen. Als

Schätzwert für die Krümmung kann die Pfeilhöhe über einer 30-cm-Basis angenommen werden.

- Bei der Auswertung der Durchbiegungsmessungen wird auch die Spurverteilung der Überfahrten ermittelt. Alle klassierten Pfeilhöhen werden den im Feld angeordneten Meßstellen (MS2, MS4, MS6, MS8) zugeordnet. Eine Zuordnung der Überfahrten zu den über den Steifen angeordneten Meßstellen ist nicht möglich.
- Aufgrund des stark temperaturabhängigen Verhaltens der orthotropen Platte ist zur Ausschaltung von PKW-Einflüssen für die Klassierung der Pfeilhöhen ein temperaturabhängiger Schwellwert für die Felddurchbiegung festzulegen. Die Hysterese kann mit 20 % des Schwellwertes für die Felddurchbiegung festgelegt werden und ist somit ebenfalls temperaturabhängig.

Für die Durchführung der eigentlichen Durchbiegungsmessungen ergeben sich anhand der durchgeführten Probemessungen folgende Ausgangswerte und Vorgaben [6]:

- Größe der Stichproben: 30-min-Messungen
- Abtastfrequenz: 150 [Hz]
- Meßkanäle: 1 bis 9
- Schwellwert für die Felddurchbiegung: temperaturabhängig
- Schwellwert für die Pfeilhöhe zur Unterdrückung von Streuungen um Null: 0.001 [mm]
- Hysterese für die Extremwertbestimmung: 20 % des Schwellwertes der Felddurchbiegung [mm]
- Klassenbreite: 0.05 und 0.1 [mm]
- Anzahl der Klassen: je 10 pos. und neg. und je 1 Randklasse

Aus den Ergebnissen der beiden Probemessungen wurde deutlich, daß für die statistische Auswertung der Meßergebnisse aufgrund der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit des Last-Verformungsverhaltens der orthotropen Platte ein temperaturabhängiger Schwellwert für die Felddurchbiegung festzulegen ist.

Zur Ermittlung eines Zusammenhanges zwischen Schwellwert der Felddurchbiegung und Temperatur wurden zusätzlich zu der Probemessung am 6.8.1991 zwei weitere Durchbiegungsmessungen herangezogen (1.3.93, 18.3.1993). Bei der Messung

am 1.3.93 betrug die mittlere Belagstemperatur 0,47 °C; bei der Messung am 18.3.93 lag die mittlere Belagstemperatur bei $T = 9,9$ °C. Für den Temperaturbereich von $T > 20$ °C werden die Ergebnisse der Probemessung herangezogen.

Zur Abgrenzung von PKW-Überfahrten wurde das gesamte Datenmaterial der drei genannten Messungen analysiert. Die Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen die Durchbiegungsverläufe für zwei typische LKW-Überfahrten. Aus der Analyse der drei Messungen lassen sich folgende temperaturabhängige Schwellwerte für die Felddurchbiegung ableiten:

Datum	Temperatur	Schwellwert
[-]	[°C]	[mm]
6.8.1991	>20	-0,25
1.3.1993	0,47	-0,04
18.3.1993	9,9	-0,10

In Abbildung 4.5 sind die ermittelten Schwellwerte als Funktion der Temperatur dargestellt. Man erkennt, daß sich eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen Temperatur und Schwellwert der Felddurchbiegung ergibt.

Um auch allen anderen Messungen einen Schwellwert zuordnen zu können, wird zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Schwellwert der Felddurchbiegung und Temperatur folgender Ansatz gewählt:

$$f(x) = a + b * x^c$$

Eine gute Anpassung kann für die Messungen am 6.8.91, 1.3.93 und 18.3.93 durch die Wahl folgender Parameter erreicht werden:

$$a = -0,045$$

$$b = -0,00062$$

$$c = 1,85$$

Für die statistischen Auswertungen der Durchbiegungsmessungen bzw. für die Klassierung der Pfeilhöhen wird der Schwellwert der Felddurchbiegung also wie folgt vorgegeben:

$$S_{DB} [mm] = -0,045 - 0,00062 * T^{1,85} [°C]$$

In Abbildung 4.5 ist diese Funktion ebenfalls dargestellt. Man erkennt, daß eine gute Anpassung an die ermittelten Schwellwerte der drei Einzel-

messungen erreicht wird. Für Temperaturen unterhalb von 0 °C wird der Schwellwert für $T = 0$ °C in Höhe von -0,045 mm verwendet.

4.1.3 Meßzeitpunkte, Stichprobenraster

Im Zeitraum von September 92 bis Juli 93 wurden insgesamt 33 Messungen durchgeführt. Die Meßdauer betrug bei allen Messungen jeweils eine halbe Stunde. Von September 92 bis Oktober 92 fanden die Messungen jeweils von 5.00 - 5.30 Uhr statt (11 Messungen, vgl. Tabelle 4.1).

Wie erste Auswertungen dieser Messungen gezeigt haben, lassen sich die Ergebnisse dieser Messungen aufgrund der relativ geringen Verkehrsbelastung zu dieser Uhrzeit nur bedingt zur Hochrechnung auf Tages- bzw. Wochen- und Jahreswerte verwenden. Diese Messungen sind nur eingeschränkt verwendbar und können für die Ableitung eines Last- bzw. Durchbiegungskollektivs nicht verwendet werden.

Die übrigen 22 Messungen im Zeitraum von Dezember 1992 bis Juli 1993 wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten jeweils vormittags (8⁰⁰ Uhr bis 12³⁰ Uhr) durchgeführt (Tabelle 4.2).

4.1.4 Ergebnisse der Durchbiegungsmessungen

Die Messungen an der orthotropen Platte liefern die Durchbiegungen für insgesamt 9 Meßstellen. Aus diesen Durchbiegungen werden - um eine Vergleichbarkeit mit den Randbedingungen der Dauerschwellbiegeprüfung zu ermöglichen - Pfeilhöhen ermittelt. Die Ermittlung der Pfeilhöhen aus den gemessenen Durchbiegungen ist aus Abbildung 4.6 zu ersehen.

Die aus den Durchbiegungen berechneten Pfeilhöhen werden statistisch ausgewertet. Es wird eine Klassierung der Rohdaten durchgeführt. Als Verfahren wird das Spitzenwertverfahren III gemäß DIN 45667 verwendet.

In den Anlagen 3 und 4 sind die Ergebnisse der Klassierungen der Durchbiegungsmessungen für den Zeitraum Dezember 1992 bis Juli 1993 dargestellt. Die Klassierungen wurden für Klassenbreiten von 0,05 mm (Anlage 3) und 0,10 mm (Anlage 4) durchgeführt.

Die zur Identifizierung von LKW-Überfahrten festgelegten temperaturabhängigen Schwellwerte für die Felddurchbiegung wurden anhand der weiter oben beschriebenen Festlegungen bestimmt (vgl. Abschnitt 4.2.2). Auch die Größe der Hysterese

und der Schwellwert für die Pfeilhöhe wurden, wie weiter oben angegeben, festgelegt.

Die Auswertungen beinhalten für jede der insgesamt 22 Einzelmessungen die Klassenbelegungen (Anzahlen der klassierten Pfeilhöhen) getrennt für negative und positive Pfeilhöhen. Für jede Meßstelle sind in den Tabellen zusätzlich die Extremwerte der klassierten Pfeilhöhen sowie die Gesamtzahlen der klassierten Pfeilhöhen angegeben.

Zusätzlich zu den klassierten Pfeilhöhen ist die Verteilung auf die einzelnen in den Feldern angeordneten Meßstellen (MS2, MS4, MS6, MS8) angegeben. Die Ergebnisse der Klassierungen sind weiterhin für alle Messungen in Form von Diagrammen, aus denen die Klassenbelegungen (getrennt für positive und negative Pfeilhöhen), die Extremwertspannen sowie die Radspurverteilungen entnommen werden können, dargestellt.

In Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse der durchgeführten Klassierungen zusammenfassend dargestellt. Die Zusammenstellung beschränkt sich auf die Meßstellen MS2 bis MS4, da diese am stärksten beansprucht sind. Im Mittel erfolgen ca. 45 % der Überfahrten an der Meßstelle 2; die Meßstelle MS4 wird im Mittel zu ca. 34 % überfahren.

Die Werte zeigen große Schwankungsbreiten. Ein direkter Vergleich der Messungen untereinander ist jedoch ohne weiteres nicht möglich, da für jede Messung unterschiedliche Temperaturen, Meßzeitpunkte, Spurverteilungswerte und Verkehrsbelastungen vorliegen.

Abbildung 4.7 zeigt die Ergebnisse der Klassierungen in grafischer Form. Hier wird deutlich, daß die über einer Steife angeordnete Meßstelle MS3 im Vergleich zu den in den Feldern angeordneten Meßstellen MS2 und MS4 relativ geringe Pfeilhöhenanzahlen aufweist. Die Meßstellen MS2 und MS4 zeigen bis auf wenige Ausnahmen einen gleichartigen Verlauf.

In den Spalten 7 bis 9 der Tabelle 4.3 sind die Extremwerte der Pfeilhöhen für die einzelnen Messungen angegeben. Abbildung 4.8 zeigt diese Werte in grafischer Form. Man erkennt, daß die Maximalwerte der Pfeilhöhen bis auf wenige Ausnahmen (Messungen am 23.4.1993, 5.7.1993 und am 23.7.1993) oberhalb von -0,5 mm (Vorgabe der Dauerschwellbiegeprüfung, System ohne Belagsschichten, 1/600) liegen. Die größte Pfeilhöhe ergibt sich für die Meßstelle MS2 mit einem Wert von ca. 1,60 mm am 23.7.1993. Auch hier ist jedoch aus den oben genannten Gründen ein direkter Vergleich der einzelnen Messungen untereinander nicht möglich.

In den Spalten 10 und 11 der Tabelle 4.3 sind die Prozentwerte der Spurverteilung der Meßstellen MS2 und MS4 angegeben. Zur Ermittlung dieser Werte wird jedes Ereignis einer der in den Feldern angeordneten Meßstellen zugeordnet. Aus dieser Zusammenstellung wird deutlich, daß die Überfahrten zum überwiegenden Teil in den Feldern 2 und 4 (Meßstellen MS2 und MS4) stattfinden. Für die Meßstelle MS2 ergeben sich im Mittel 45,2 %, für die Meßstelle MS4 im Mittel 34,1 % der Überfahrten. In Abbildung 4.9 sind die ermittelten Spurverteilungswerte in grafischer Form dargestellt.

Es kann festgestellt werden, daß im Mittel insgesamt ca. 79 % der Überfahrten an den Meßstellen MS2 und MS4 erfolgen. Für die weiteren Überlegungen zur Ableitung eines Beanspruchungskollektivs werden daher lediglich die Feld-Meßstellen MS2 und MS4 sowie die zwischen diesen beiden angeordnete Meßstelle MS3 (Steife) betrachtet.

4.2 Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

4.2.1 Meßanordnung

An der Richtungsfahrbahn Berlin wurde in einem Abstand von ca. 15 m zum Widerlager ein Meßquerschnitt mittig zwischen zwei Querträgern eingerichtet (vgl. Abb. 3.4 und 3.5). Die Dicke des Fahrbahnbleches beträgt hier 10 mm, die der Längssteifen 6 mm.

Zur Erfassung der Verformungen des Fahrbahnbleches wurden im Bereich der linken Radspur des Meßquerschnittes neun induktive Wegaufnehmer installiert, mit denen relative Verschiebungen gegenüber einem praktisch starren Meßträgersystem gemessen werden. Es wurden zwei Meßreihen durchgeführt, bei denen die Abstände der Weggeber variiert wurden.

Alle Meßeinrichtungen wurden nach Betriebsbereitschaft einer Reihe von Funktionstests unterzogen. Die Parameter der Messungen (Meßbereiche, Abtastfrequenz) entsprechen den Vorgaben bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 (vgl. Abschnitt 4.1).

Die Messungen an der Brücke über den Petersdorfer See wurden am 12.4.1994 durchgeführt. Bei der Meßreihe 1 waren die Wegaufnehmer in einem Abstand von 0,15 m (entsprechend der Meßanordnung an der Rheinbrücke der A42) angeordnet. Für die Meßreihe 2 wurde der Abstand der Weggeber auf 0,075 m verringert. Die Meßgeberanordnung für beide Meßreihen ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

4.2.2 Belastungsfahrzeug, Temperaturen

Als Belastungsfahrzeug diente ein LKW (Typ Mercedes 2628), dessen Achsabstände und Achslasten aus Abbildung 4.11 zu ersehen sind. Mit diesem Belastungsfahrzeug wurden am 12.4.1994 insgesamt 24 Überfahrten (16 Überfahrten Meßreihe 1, 8 Überfahrten Meßreihe 2) bei Geschwindigkeiten von 5, 10, 30 und 50 km/h durchgeführt und aufgezeichnet. Die Tabelle 4.4 zeigt eine Zusammenstellung der durchgeführten Überfahrten mit Angaben zu Geschwindigkeiten und zur Spurlage. Die Spalte Spurlage gibt den Abstand des rechten Vorderrades vom Sperrstreifen (Abgrenzung Standspur-Fahrspur) in cm an. In Abbildung 4.12 ist die Lage der Radaufstandsflächen für einen Wert der Spurlage von $\Delta = 10$ cm dargestellt. Für diesen Fall befindet sich das linke Vorderrad des Belastungsfahrzeuges im Bereich der Meßstellen 3 - 5. Die Aufstandsflächen der hinteren Doppelreifen liegen im Bereich der Meßstellen 3-5 und 5-7 (vgl. Abb. 4.12).

Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf der mittleren Belagtemperatur für den 12.4.1994 zwischen 8⁰⁰ Uhr und ca. 13⁰⁰ Uhr. Es wurden Temperaturen im Bereich von 7 °C (8⁰⁰ Uhr) bis ca. 21 °C (12³⁰ Uhr) gemessen. Die Überfahrten der Meßreihe 1 fanden zwischen 10⁵⁰ Uhr und 11²⁸ Uhr statt, so daß hier von einer konstanten Temperatur in Höhe von ca. 14 °C ausgegangen werden kann. Die Überfahrten der Meßreihe 2 fanden zwischen 12³⁸ Uhr und 12⁵⁶ Uhr statt. Obwohl in diesem Zeitraum die mittlere Belagtemperatur nicht mehr gemessen wurde, kann aufgrund der Temperaturmessungen bis zu diesem Zeitpunkt angenommen werden, daß sie oberhalb von 20 °C lag.

4.2.3 Ergebnisse der Durchbiegungsmessungen

Wie aus Tabelle 4.4 zu entnehmen ist, wurden insgesamt 16 Überfahrten in der Meßreihe 1 und 8 Überfahrten in der Meßreihe 2 durchgeführt. Für die nachfolgend dargestellte Auswertung werden die Überfahrten 4, 8, 12 und 16 der Meßreihe 1 herangezogen. Diese Überfahrten wurden ausgewählt, da hier sowohl die Spurlage (ca. $\Delta = +10$ cm, vgl. Tab. 4.4) als auch die Meßgeberanordnung vergleichbar mit den entsprechenden Überfahrten an der Rheinbrücke im Zuge der A42 sind. Die ausgewählten Überfahrten decken Geschwindigkeiten im Bereich von 5 bis 50 km/h ab.

In den Abbildungen 4.14 bis 4.17 sind die gemessenen Durchbiegungen aller neun Meßstellen des Meßquerschnittes als Funktion der Zeit dargestellt. Alle Meßwerte wurden "zentriert", d.h. die für $t = 0$

gemessenen Verschiebungsgrößen (kein Belastungsfahrzeug auf der Brücke) werden als Nullwerte betrachtet und von allen übrigen Meßwerten subtrahiert. Somit sind alle gemessenen Durchbiegungen direkt miteinander vergleichbar. Die Darstellungen machen deutlich, daß die größten Verschiebungen für alle Überfahrten an der Meßstelle MP4 gemessen werden. Weiterhin zeigt sich, daß die Überfahrten der Vorderachse und der hinteren Doppelachse auch bei $v = 50$ km/h (Überfahrt 16) noch deutlich zu identifizieren sind. Die Identifizierung der beiden hinteren Achsen (Doppelachse) ist nicht eindeutig möglich, da sich diese aufgrund des geringen Abstandes zueinander (1,35 m) gegenseitig stark beeinflussen.

In Abbildung 4.18 sind die infolge der Überfahrt der hinteren Doppelachse gemessenen Verschiebungsmaxima über den Meßquerschnitt aufgetragen. Auch hier wird deutlich, daß die größten Verschiebungen im Bereich des Meßpunktes MP4 auftreten. Die Verschiebungen betragen hier 0,50 bis 0,54 mm. Zu den Rändern hin nehmen die Verschiebungen ab. Am linken Rand des Meßquerschnittes (MP1) werden Durchbiegungen im Bereich von 0,30 bis 0,32 mm gemessen; am rechten Rand (MP9) ergeben sich Werte im Bereich von 0,19 bis 0,22 mm.

In Abbildung 4.19 sind die sich aus den Überfahrten 4, 8, 12 und 16 ergebenden Biegelinien für die Überfahrt der Vorderachse des Belastungsfahrzeuges dargestellt. Im Vergleich zur Überfahrt der hinteren Doppelachse ergeben sich hier größere Streuungen bei den einzelnen Überfahrten. Die größten Verschiebungen ergeben sich jedoch auch hier am Meßpunkt MP4. Zu den Rändern hin nehmen die Verschiebungen jedoch stärker ab, als dies bei der Überfahrt der hinteren Achsen der Fall ist. Dieses Verhalten ergibt sich aus der Tatsache, daß die hinteren Achsen jeweils mit Doppelbereifung ausgerüstet sind und sich somit auch die doppelte Lastaufstandsfläche ergibt.

In Abbildung 4.20 sind die Durchbiegungen (Maximalwerte) infolge der Überfahrten der hinteren Achsen als Funktion der Geschwindigkeit für alle neun Meßpunkte dargestellt. Vergleicht man die für $v = 10$ und für $v = 50$ km/h gemessenen Durchbiegungen miteinander, so wird deutlich, daß die Durchbiegungen mit steigender Geschwindigkeit eine abfallende Tendenz aufweisen. Für $v = 5$ km/h zeigen sich uneinheitliche Durchbiegungsverläufe der einzelnen Meßstellen. Dies hängt wahrscheinlich damit zusammen, daß für Geschwindigkeiten in diesem Bereich das mechanische Verhalten der Asphalt-schichten als viskos zu betrachten ist. Für höhere Geschwindigkeiten (kleiner werdende

Impulsdauer) sind die viskosen Anteile von untergeordneter Bedeutung. Gleichzeitig nimmt die Steifigkeit der bituminösen Schichten mit steigender Geschwindigkeit zu, was wiederum kleiner werdende Verschiebungen bewirkt (vgl. hierzu auch Abschnitt 9.1, Abb. 9.1 bis 9.4).

In Abbildung 4.21 sind die aus den Durchbiegungen (Überfahrt Vorderachse) ermittelten Pfeilhöhen für die Meßpunkte MP2 bis MP6 dargestellt. Auch hier ergeben sich die größten Werte für den Meßpunkt MP4. Zu den Rändern des Meßquerschnittes hin (MP2, MP6) nehmen die Pfeilhöhen sehr stark ab. Für die Meßstelle MP6 ergeben sich zum Teil positive Werte, während an den übrigen Meßpunkten durchweg Pfeilhöhen kleiner Null ermittelt werden.

4.3 Gegenüberstellung der Bauwerksmessungen

An der Rheinbrücke im Zuge der A42 wurden am 5.6.91 ebenfalls Überfahrten mit einem Belastungsfahrzeug bei Geschwindigkeiten im Bereich von 5 bis 50 km/h durchgeführt. Die Spurlage dieser Überfahrten ist mit der Spurlage der Überfahrten bei der Brücke über den Petersdorfer See (Überfahrten 4, 8, 12, 16, vgl. Tab. 4.4) vergleichbar. Die mittleren Belagstemperaturen der Überfahrten am 5.6.91 liegen im Bereich von ca. 11 bis 14 °C und sind somit ebenfalls mit den mittleren Belagstemperaturen bei den Messungen Petersdorf vergleichbar.

Bei einem Vergleich der Messungen an den beiden Bauwerken muß jedoch die unterschiedliche Anordnung der Meßquerschnitte berücksichtigt werden. Bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 handelt es sich um einen Hohlkastenquerschnitt. Der eigentliche Meßquerschnitt ist im Bereich des Kragarmes angeordnet (vgl. Abb. 4.1, 4.2). Bei der Brücke über den Petersdorfer See ist der Meßquerschnitt hingegen zwischen den beiden Längsträgern angeordnet (vgl. Abb. 3.5). Die Meßträger wurden jedoch in beiden Fällen so montiert, daß Bewegungen der Querträger die Meßergebnisse nicht beeinflussen. Insofern kann für den Vergleich der Meßergebnisse Petersdorf und Emscherschnellweg davon ausgegangen werden, daß Unterschiede infolge unterschiedlicher Anordnung der Meßträger von untergeordneter Bedeutung sind.

Vergleichbar sind jedoch nur die infolge der Überfahrten der jeweiligen Vorderachsen gemessenen Durchbiegungen bzw. die hieraus abgeleiteten Pfeilhöhen, da, wie weiter oben schon erwähnt, aufgrund des geringen Achsabstandes der beiden

hinteren Achsen des Belastungsfahrzeuges in Petersdorf eine gegenseitige Beeinflussung der Achsen gegeben ist.

Da auch die verwendeten Belastungsfahrzeuge unterschiedlich sind, ist es erforderlich, die gemessenen Verschiebungen für einen Vergleich zu normieren. Hierzu werden unter der Voraussetzung eines linearen Zusammenhanges zwischen Durchbiegung und Radlast alle gemessenen Verschiebungen auf eine Radlast von 10 kN bezogen.

In Abbildung 4.22 sind die auf 10 kN bezogenen Durchbiegungen der orthotropen Platte an der Rheinbrücke im Zuge der A42 über den Meßquerschnitt (MP1 bis MP8, MP9 war zu diesem Zeitpunkt noch nicht installiert) aufgetragen. Abbildung 4.23 zeigt die normierten Durchbiegungen für die orthotrope Platte der Brücke über den Petersdorfer See. Vom Verlauf her ergeben sich bei beiden Bauwerken ähnliche Biegelinien. Aus den beiden Abbildungen wird deutlich, daß sich beim Bauwerk Petersdorf im Bereich der mittleren Meßstellen (MP3 bis MP6) im Vergleich zur Rheinbrücke sehr viel kleinere Durchbiegungen ergeben. Dies hängt damit zusammen, daß der Abstand der Querträger bei der Brücke Petersdorfer See nur 2,75 m beträgt, während bei der Rheinbrücke der A42 die Querträger in einem Abstand von 4,19 m angeordnet sind.

In Abbildung 4.24 sind die Mittelwerte der auf 10 kN normierten Durchbiegungen für die beiden Bauwerke dargestellt. Im Vergleich zu den Durchbiegungen an der Petersdorfer Brücke ergeben sich bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 im mittleren Bereich des Meßquerschnittes zwei- (MP2) bis viermal (MP6) so große Werte. Hierzu ist anzumerken, daß trotz geringerer Blechstärke das Trägheitsmoment der orthotropen Platte der Petersdorfer Brücke mit $I = 14.114 \text{ cm}^4$ im Vergleich zur Rheinbrücke der A42 ($I = 12.364 \text{ cm}^4$) etwas größer ist. Dies hängt mit der unterschiedlichen Rippengeometrie zusammen.

Aus einer Überschlagsrechnung an einem Einfeldträger (Stützweite 2,75 m bzw. 4,19 m) ergibt sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Trägheitsmomente ein Verhältnis der Durchbiegungen $f_{\text{ESW}}/f_{\text{PET}} = 4,04/1$. In Wirklichkeit handelt es sich bei den orthotropen Fahrbahnplatten jedoch um Flächentragwerke, so daß die Betrachtung eines Einfeldträgers eine sehr starke Vereinfachung darstellt. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache erscheinen die ermittelten Durchbiegungen und insbesondere deren Verhältnis zueinander jedoch plausibel.

Die beiden Abbildungen 4.25 und 4.26 zeigen für beide Bauwerke die aus den auf eine Radlast von 10 kN bezogenen Durchbiegungen ermittelten Pfeilhöhenverläufe über den Meßquerschnitt. Vom Verlauf her ergeben sich zwischen den beiden Bauwerken keine grundsätzlichen Unterschiede. Bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 kommt es jedoch bei zwei Überfahrten (ESW-10 und ESW-50) zu einem Vorzeichenwechsel im Bereich der Steifen (MP3, MP5). Es ergeben sich bei der Brücke über den Petersdorfer See im Vergleich zur Rheinbrücke der A42 sehr viel kleinere Werte an den mittleren Meßstellen des Meßquerschnittes (MP3 bis MP5).

In Abbildung 4.27 sind die Mittelwerte der normierten Pfeilhöhen beider Bauwerke dargestellt. Es wird deutlich, daß im Randbereich des Meßquerschnittes (mit Ausnahme von MP6) keine großen Unterschiede in den Pfeilhöhen zu verzeichnen sind. Für die mittleren Feldmeßstellen (MP4 und MP6) ergeben sich jedoch bei der Rheinbrücke der A42 sehr viel größere Pfeilhöhen als bei der Brücke über den Petersdorfer See (MP4: $Pf_{ESW} \cong -0,034$ mm, $Pf_{PET} \cong -0,010$ mm; MP6: $Pf_{ESW} \cong -0,021$ mm, $Pf_{PET} \cong +0,001$ mm). Für dieses zunächst unerwartete Ergebnis können folgende Begründungen angeführt werden:

- Die Stützweite zwischen den Querträgern ist bei den beiden Bauwerken stark unterschiedlich.
- Bei orthotropen Platten ist neben der Dicke des eigentlichen Fahrbahnbleches offensichtlich auch die Steifigkeit der u.a. auf Torsion beanspruchten Rippen ein für die lokalen Verformungen maßgeblicher Faktor. Die Rippengeometrie weist in Bezug auf eine Torsionsbeanspruchung beim Bauwerk Petersdorf gegenüber der Rheinbrücke im Zuge der A42 eine höhere Steifigkeit auf.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß die Blechstärke orthotroper Platten nicht als alleiniges Kriterium für die Größe der Beanspruchung aus Verkehr herangezogen werden kann (vgl. hierzu auch [8]). Neben der Blechstärke des Fahrbahnbleches sind auch die Rippengeometrie sowie der Abstand der Querträger von Bedeutung. Anhand der hier gezeigten Meßergebnisse an zwei Bauwerken lassen sich diese Einflüsse jedoch nicht quantifizieren. Hierzu könnten mittels numerischer Berechnungen, z.B. nach der Methode der Endlichen Elemente, Aussagen zum Einfluß einzelner Parameter (Querträgerabstand, Stärke des Fahrbahnbleches, Steifengeometrie ...) abgeleitet werden.

5 Dehnungsmessungen

5.1 Rheinbrücke im Zuge der A42

5.1.1 Meßanordnung, Geräte

Eine wichtige Randbedingung bei der Durchführung von Dehnungsmessungen in bituminösen Schichten stellen die hohen Einbautemperaturen dar. Temperaturmessungen, die während des Aufbringens von Gußasphaltschichten bei einer Betonbrücke durchgeführt wurden [9], ergaben Temperaturspitzen, die in der Mitte des Gußasphalts bei ca. 265 °C, an der Oberfläche der Schweißbahn bei ca. 218 °C lagen. Diese Temperaturspitzen stehen ca. 2-3 Minuten an und fallen dann innerhalb von 10 Minuten in der Mitte der Gußasphaltschicht auf 220 °C und an der Oberkante der Schweißbahn auf 200 °C ab. Nach einer Stunde beträgt die Temperatur in beiden Schichten nur noch ca. 120 °C.

Da eine Fahrbahnkonstruktion aus Stahl ein besserer Wärmeleiter ist als eine Brückenbetonplatte, liegt man mit der Annahme der oben gemessenen Temperatur als Einbautemperatur für die Dehnungsmeßstreifen (DMS) und die Asphalt-Dehnungsaufnehmer auf der sicheren Seite. Alle zur Messung der Dehnungen der orthotropen Platte verwendeten Materialien müssen auf diese Temperaturen abgestimmt sein. Die hierzu durchgeführten Vorversuche sind in [6] beschrieben.

Die Lage der Dehnungsmeßstellen ist aus den Abbildungen 5.1 und 5.2 ersichtlich. Die Meßstellen sind in der Fahrspur angeordnet; die Fahrzeuge rollen mit ihren rechten Reifen über die Meßpunkte. Es wurden 2 Meßprofile parallel zur Meßachse verlegt. Die DMS liegen in Abständen von jeweils 15 cm auseinander und 10 cm von der Meßachse entfernt.

Die H-Dehnungsaufnehmer liegen 20 cm bzw. 30 cm jeweils versetzt von der Meßachse entfernt. Diese Anordnung mußte gewählt werden, um im Bereich der Aufnehmer eine homogene Gußasphaltschicht zu gewährleisten. Bei einer Länge der Aufnehmer von 13,5 cm und einem Abstand der Meßpunkte von 15 cm ist der Zwischenraum zwischen zwei Aufnehmern zu klein, um die H-Dehnungsaufnehmer in einer Reihe anzuordnen. Die Meßachse ist auch gleichzeitig die Meßlinie für die induktiven Wegaufnehmer.

Zur Verstärkung der Aufnehmersignale wurden TF-Meßverstärker eingesetzt. Ein digitales Meßwertfassungssystem erfaßt die Meßwerte und speichert diese auf eine Festplatte. Damit stehen die Meßwerte für weitere Auswertungen zur Verfügung.

5.1.2 Ergebnisse der Dehnungsmessungen

Die Abbildungen 5.3 und 5.4 zeigen die bei zwei LKW-Überfahrten gemessenen Dehnungen als Funktion der Zeit für die Meßstellen 114o und 114u (Feldmitte zwischen zwei Steifen, Oberkante und Unterkante des Fahrbahnbleches). Es handelt sich hierbei um zwei Ereignisse, die aus einer am 16. Juli 1993 durchgeführten 1/2-Stunden-Messung ausgewählt wurden.

Bei beiden Messungen können die einzelnen Achsen der LKW's eindeutig identifiziert werden. Bei beiden dargestellten Überfahrten handelt es sich um 5achsige Fahrzeuge. Weiterhin wird deutlich, daß eine gegenseitige Beeinflussung der Achsen gegeben ist. Zwischen den Überfahrten der Achsen 2 und 3 (Abb. 5.3) tritt keine vollständige Entlastung ein. Die Dehnungen erreichen nicht den Nullwert. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei Achsen mit geringem Abstand (Achsen 2 und 3 in Abb 5.3, Achsen 3 bis 5 in Abb 5.4).

Aus den Darstellungen der Dehnungen als Funktion der Zeit lassen sich neben der Größe der auftretenden Dehnungen auch mittlere Impulsdauern, die hier im Bereich von 55-70 ms liegen, ableiten. Diese Werte sind geschwindigkeitsabhängig. Durch die Auswertung weiterer LKW-Überfahrten konnte jedoch eine Impulsdauer im Bereich von 55-70 ms für LKW-Geschwindigkeiten im Bereich von 60-80 km/h bestätigt werden.

In den beiden Abbildungen 5.5 und 5.6 sind die aus den gemessenen Dehnungen an den Meßstellen 114o und 114u abgeleiteten Dehnungsverläufe im Fahrbahnblech dargestellt (Annahme eines linearen Dehnungsverlaufes). Gezeigt sind hier die infolge der Überfahrt der jeweils 1. LKW-Achse gemessenen Dehnungen, da hier die Beeinflussung durch andere Achsen vernachlässigbar ist (vgl. Abbildungen 5.3 und 5.4). Die Dehnungen an der Unterkante des Fahrbahnbleches sind betragsmäßig etwas größer als die an der Oberkante des Fahrbahnbleches. Es ergeben sich Werte, die im Bereich von - 0,09 mm/m (Stauchung) an der Oberkante des Fahrbahnbleches und im Bereich von + 0,12 mm/m Dehnung an der Unterkante des Fahrbahnbleches liegen.

Die neutrale Faser liegt bei ca. 7 mm, gemessen von der Unterkante des 12 mm starken Fahrbahnbleches. Die Lage der neutralen Faser oberhalb von 6 mm (halbe Dicke des Fahrbahnbleches) ergibt sich aus der mittragenden Wirkung der bituminösen Schichten.

Abbildung 5.7 zeigt den Einfluß der Geschwindigkeit auf die Größe der Dehnungen des Fahrbahnbleches. Dargestellt sind die an den Meßstellen

113, 114 und 115 (vgl. hierzu auch Abbildungen 5.1 und 5.2) gemessenen Beträge der Dehnungen als Funktion der Geschwindigkeit. Die dargestellten Überfahrten wurden am 5.6.1991 vor Verkehrsfreigabe mit einem Belastungsfahrzeug der BAST durchgeführt.

Die Beträge der gemessenen Dehnungen nehmen für alle drei Meßstellen mit ansteigender Geschwindigkeit ab. Besonders auffällig ist ein starker Abfall der gemessenen Dehnungen von $v = 30$ bis $v = 10$ km/h. Dieser Sprung ist wahrscheinlich auf das viskose Verhalten der bituminösen Schichten bei niedrigen Geschwindigkeiten (große Impulsdauer) zurückzuführen.

Im Bereich von $v = 10$ bis $v = 50$ km/h nehmen die Beträge der gemessenen Dehnungen nur noch leicht ab. Dieser Effekt resultiert aus der mit steigender Geschwindigkeit (kleiner werdende Impulsdauer) zunehmenden Steifigkeit der bituminösen Schichten (vgl. hierzu auch Abschnitt 9.1).

Abbildung 5.8 zeigt die an den Meßstellen 114, 124 und 134 (vgl. Abb. 5.1 und 5.2) gemessenen Dehnungen (Absolutwerte) für Geschwindigkeiten des Belastungsfahrzeuges im Bereich von 3 bis 50 km/h. Auch diese Messungen wurden am 5.6.91 vor Verkehrsübergabe mit einem Belastungsfahrzeug der BAST durchgeführt. Die drei Meßstellen befinden sich auf der Oberkante des Fahrbahnbleches (DMS114), der Oberkante der Mastixschicht (H-Dehnungsaufnehmer 124) und auf der Oberkante der Deckschicht (DMS134).

Die Dehnungen des Fahrbahnbleches (Oberkante, DMS114) liegen - wie schon weiter oben anhand von zwei LKW-Überfahrten gezeigt wurde - im Bereich von 0,08 bis 0,15 mm/m. Bis zur Oberkante der Mastixschicht (H-Dehnungsaufnehmer 124) nehmen die Dehnungen leicht zu. Hier ergeben sich Werte, die im Bereich von 0,17 bis 0,22 mm/m liegen. Bis zur Oberkante der Deckschicht (DMS134) ist dann eine starke Zunahme der Dehnungen zu verzeichnen. Hier werden Dehnungen im Bereich von 0,55 bis 0,78 mm/m gemessen. Auch bei dieser Darstellung wird die Abhängigkeit der Dehnungen des Verbundkörpers von der Fahrgeschwindigkeit des Belastungsfahrzeuges deutlich. Für die Oberkante des Fahrbahnbleches ist die Abhängigkeit der Dehnungen von der Geschwindigkeit vergleichsweise gering ausgeprägt. Für die bituminösen Schichten - insbesondere für die Deckschicht (DMS134 - zeigen die gemessenen Dehnungen jedoch eine stark ausgeprägte Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

Wie bereits aus der Auswertung und Interpretation der Durchbiegungsmessungen deutlich wurde (vgl.

Abschnitt 4.3), wird das Verhalten der orthotropen Platte maßgeblich von der Belagstemperatur bestimmt. In Abbildung 5.9 sind für die Meßstellen DMS114 und DMS115 die Beträge der Dehnungen in Abhängigkeit der mittleren Belagstemperaturen (Temperaturbereich von +1 bis +34 °C) dargestellt. Hierzu wurden LKW-Überfahrten im Meßzeitraum vom 2.9.92 bis zum 5.11.93 ausgewertet. Aus der Abbildung wird deutlich, daß die Dehnungen der orthotropen Fahrbahnplatte stark temperaturabhängig sind. Für +1 °C ergeben sich Dehnungsbeträge im Bereich von 0,01 bis 0,05 mm/m. Für +34 °C liegen die Beträge der gemessenen Dehnung bei 0,25 bis 0,27 mm/m. Dies bedeutet eine Dehnungszunahme um einen Faktor von 8,7 bei einem Temperaturanstieg um $\Delta T = 33$ °C. Bedenkt man, daß am Bauwerk Extremwerte im Bereich von -15 °C bis +50 °C (Belagstemperatur) durchaus realistisch sind, wird der Einfluß der Belagstemperatur auf das Verhalten der orthotropen Fahrbahnplatte noch deutlicher.

5.2 Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

5.2.1 Meßanordnung, Geräte

Wie bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 wurden auch an der Brücke über den Petersdorfer See Dehnungsmessungen durchgeführt. Hierzu wurden insgesamt 9 DMS auf dem 10 mm starken Fahrbahnblech appliziert. Es wurden die gleichen Materialien wie bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 verwendet. Hierdurch konnte sichergestellt werden, daß durch den Einbau der bituminösen Schichten keine Schäden an den DMS verursacht wurden. Trotz dieser Vorsichtsmaßnahmen fiel der im Feldbereich angeordnete DMS6 aus (vgl. Abb. 4.10).

Die Lage der DMS ist aus Abb. 4.10 zu ersehen. Abbildung 5.10 zeigt ein Foto des Meßquerschnittes. Die Dehnungsmessungen wurden jeweils parallel zu den Verschiebungsmessungen für insgesamt 24 Überfahrten durchgeführt (vgl. hierzu Abschnitt 4.2.2). Auch hier entspricht die Meßachse der Dehnungsmessungen der der Verschiebungsmessungen.

Zur Verstärkung der Aufnehmersignale werden TF-Meßverstärker eingesetzt. Ein digitales Meßwert-erfassungssystem erfaßt die Meßwerte und speichert sie auf einer Festplatte. Die Meßwerte stehen damit zur weiteren Auswertung zur Verfügung.

5.2.2 Ergebnisse der Dehnungsmessungen

In Abbildung 5.11 sind die an den Meßstellen

DMS1, DMS2 und DMS8 gemessenen Dehnungen des Fahrbahnbleches für die Überfahrt 4 ($v = 5$ km/h) dargestellt. Die einzelnen Achsen des Belastungsfahrzeuges sind eindeutig identifizierbar. Für die im Feld angeordneten Meßstellen DMS2, DMS8 ergibt sich eine starke gegenseitige Beeinflussung der Achsen 2 und 3, während nach Überfahrt der Vorderachse die Dehnungen nahezu auf Null abklingen.

In den Abbildungen 5.12 bis 5.15 sind die Dehnungsverteilungen im 10 mm starken Fahrbahnblech (Meßstellen DMS2, DMS8) unter der Annahme eines linearen Dehnungsverlaufes im Fahrbahnblech für die Geschwindigkeiten $v = 5, 10, 30$ und 50 km/h dargestellt. Aus den Darstellungen wird deutlich, daß sich die Lage der neutralen Faser der mit steigender Geschwindigkeit verbundenen Steifigkeitszunahme der bituminösen Schichten nach oben verschiebt. Während für $v = 5$ km/h (Überfahrt 4, Abb. 5.12) die neutrale Faser 5,8 mm entfernt der Unterkante des Fahrbahnbleches liegt, ergibt sich für $v = 50$ km/h (Überfahrt 19, Abb. 5.15) ein Wert von 6,8 mm. Eine Ausnahme bildet lediglich die Überfahrt 8 ($v = 10$ km/h, Abbildung 5.13). Hier liegt die neutrale Faser bei 5,3 mm.

Die an der Unterkante des Fahrbahnbleches für unterschiedliche Geschwindigkeiten des Belastungsfahrzeuges gemessenen Dehnungen (DMS8) zeigen keine eindeutige Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Es werden Beträge im Bereich von 0,029 bis 0,045 mm/m gemessen. An der Oberkante des Fahrbahnbleches ergeben sich Dehnungsbeträge, die im Bereich von 0,019 bis 0,033 mm/m liegen und mit steigender Geschwindigkeit abnehmen.

In der Abbildung 5.16 sind die Beträge der gemessenen Dehnungen (Meßstellen DMS1, DMS2 und DMS8) als Funktion der Geschwindigkeit dargestellt. Auch hier zeigt sich - wie schon bei der orthotropen Platte der Rheinbrücke im Zuge der A 42 - ein Neigungswechsel im Bereich von $v = 5$ bis $v = 10$ km/h, während im Geschwindigkeitsbereich von $v = 10$ bis $v = 50$ km/h keine wesentlichen Dehnungsänderungen beobachtet werden.

5.3 Gegenüberstellung der Bauwerksmessungen

Die Abbildungen 5.17 und 5.18 zeigen für die beiden Bauwerke Rheinbrücke im Zuge der A42 und Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19 die Beträge der gemessenen Dehnungen als Funktion der Geschwindigkeit. Um die gemessenen

nen Dehnungen miteinander vergleichen zu können, werden alle Dehnungswerte auf eine Radlast von 10 kN normiert. Diese Umrechnung ist erforderlich, da die beiden Belastungsfahrzeuge unterschiedliche Radlasten aufweisen und aus diesem Grunde ein direkter Vergleich der gemessenen Dehnungen nicht möglich ist.

Die im Bereich der Steifen angeordneten Meßstellen DMS114 und DMS115 (Rheinbrücke Duisburg, vgl. Abb. 5.17) sind nun direkt mit der Meßstelle DMS1 (Brücke über den Petersdorfer See, vgl. Abb. 5.18) vergleichbar. Das gleiche gilt für die in der Mitte zwischen zwei Steifen auf der Oberkante des Fahrbahnbleches angeordneten Meßstellen DMS114 und DMS2.

Bei der Brücke über den Petersdorfer See (Abbildung 5.18) sind zusätzlich die gemessenen Dehnungsbeträge der Meßstelle DMS8, die in Feldmitte zwischen zwei Steifen an der Unterkante des Fahrbahnbleches angeordnet ist, dargestellt. Eine vergleichbare Meßstelle war zum Zeitpunkt der Überfahrten mittels eines Belastungsfahrzeuges (5.6.91) an der Rheinbrücke im Zuge der A42 noch nicht vorhanden.

Die mittleren Belagstemperaturen lagen bei den Messungen in Duisburg bei ca. 13 °C, bei der Brücke über den Petersdorfer See bei ca. 14 °C und sind somit vergleichbar. Die Überfahrten fanden jeweils im Bereich des Feldes statt, so daß auch von der Lastanordnung her vergleichbare Verhältnisse vorliegen.

Es kann festgestellt werden, daß trotz eines stärkeren Fahrbahnbleches (12 mm) die an der Rheinbrücke gemessenen Dehnungsbeträge um den Faktor 2,7 bis 3,5 oberhalb der entsprechenden Werte bei der Brücke über den Petersdorfer See liegen (Stärke des Fahrbahnbleches 10 mm).

Dieses zunächst unerwartete Ergebnis wurde auch schon bei der Auswertung der Durchbiegungsmessungen festgestellt. Als Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten kommen unterschiedliche Querträgerabstände sowie Unterschiede in der konstruktiven Ausbildung der Steifen in Betracht (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.3).

6 LKW-Verkehrsstärken

6.1 Verkehrszählungen an der A 42

Für die Ableitung eines Belastungskollektivs der orthotropen Platte ist die Verkehrsbelastung eine der maßgeblichen Eingangsgrößen. Aus diesem Grund wurden zur Abschätzung der Größenordnung der LKW-Verkehrsstärken an der Rheinbrücke der A42

vier Verkehrszählungen über 24 Stunden, bei denen neben der Anzahl der LKW's auch die Anzahl der Achsen je LKW ermittelt wurde, durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Zählungen sind in den Tabellen 6.1 bis 6.4 zusammengestellt. Die ermittelten Werte schwanken zwischen 2.734 und 3.659 LKW/24h (entsprechend 11.020 und 14.993 Achsen/24h). Zusätzlich zu den Zählergebnissen sind in den Tabellen die Prozentwerte (LKW und Achsen) für die 1/2-Stunden-Intervalle aufgeführt. Diese Anteile werden zur Hochrechnung von Durchbiegungen bzw. Pfeilhöhen von 1/2-Stunden-Intervallen auf Tageswerte benötigt. Diese Tagesganglinien für LKW-Anzahl und Anzahl der Achsen sind in den Abbildungen 6.1 und 6.2 grafisch dargestellt.

Aus den beiden Abbildungen wird deutlich, daß die vier Einzelzählungen grundsätzlich gleich verlaufende Tagesganglinien ergeben haben. Kleinere Abweichungen sind vor allem für den Zeitraum von 7.00 bis 16.00 Uhr zu verzeichnen. Während der übrigen Zeiten (0.00 bis 6.30 Uhr und 16.30 bis 23.30 Uhr) liegen die Ergebnisse der vier Zählungen dicht beieinander.

6.2 Normierte Tagesganglinie

Zur Hochrechnung der jeweils 1/2-stündigen Durchbiegungsmessungen bzw. der aus diesen Meßergebnissen berechneten Pfeilhöhen auf Tageswerte kann aus den Ergebnissen der vier durchgeführten 24h-Zählungen eine normierte Tagesganglinie abgeleitet werden. Hierzu werden die 1/2-Stunden-Werte der vier Verkehrszählungen zunächst gemittelt (Tabelle 6.5).

In Abbildung 6.3 ist die gemittelte Tagesganglinie (Prozentanteile Achsen) dargestellt. Für die weiteren Auswertungen wurde diese mittlere Tagesganglinie zusätzlich einer Glättung unterzogen. Die geglättete Tagesganglinie ist ebenfalls in Abbildung 6.3 dargestellt. Die aus der Glättung resultierenden 1/2-Stunden-Prozentwerte für die Achsen sind auch in Tabelle 6.5 enthalten.

6.3 Jahresganglinie für den LKW-Verkehr

Zur Abschätzung der Verkehrsbelastung der A42 wird die Zählstelle AK-Moers herangezogen, da für diese Zählstelle die Wochenwerte der LKW-Belastung vorliegen [6]. Unter der Voraussetzung, daß die Wochen- und Jahresganglinien des LKW-Verkehrs für die Zählstelle AK-Moers und die der

Rheinbrücke im Zuge der A42 qualitativ den gleichen Verlauf aufweisen, läßt sich unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vier durchgeführten Zählungen an der A42 und der Wochen- und Jahresganglinien für das AK-Moers die Jahresganglinie für die Rheinbrücke der A42 abschätzen.

Die Hochrechnung der Ergebnisse der vier Zählungen auf einen Jahreswert (Annahme gleich verlaufender Wochen- und Jahresganglinien für die Rheinbrücke der A42 und das AK-Moers) ergibt für die A42 eine LKW-Belastung von ca. 922.000 LKW/a (Mittelwert der Hochrechnung der Ergebnisse der vier durchgeführten Verkehrszählungen). Entsprechend läßt sich anhand der aus den Zählergebnissen ermittelten mittleren Anzahl der Achsen pro LKW die Anzahl der Achsen zu ca. 3.910.000 Achsen/a abschätzen.

Diese beiden Werte lassen sich entsprechend dem Verlauf der Jahresganglinie für das AK-Moers (vgl. [6]) auf den Meßzeitraum (September 1992 bis Juli 1993) umlegen. Die so ermittelte Jahresganglinie ist in Abb. 6.4 dargestellt (Prozentanteile der Achsen). Die ermittelten Wochenwerte sind in Tabelle 6.6 wiedergegeben.

7 Temperaturmessungen

7.1 Messungen an der Rheinbrücke der A42

Gleichzeitig mit den Durchbiegungen wurden auch die Temperaturen der orthotropen Platte durch insgesamt 6 Thermoelemente gemessen. Es wurden je zwei Thermoelemente auf der Oberkante des Bleches, der Oberkante der Oktaphaltschicht und der Oberkante der Schutzschicht angeordnet. Die Lage der Meßstellen ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

In Tabelle 7.1 sind die Ergebnisse der parallel zu den Durchbiegungsmessungen durchgeführten Temperaturmessungen zusammengestellt. Pro 1/2-Stunden-Intervall sind für alle sechs Meßstellen die Ergebnisse von 3 Messungen (Beginn, Mitte, Ende des 1/2-Stunden-Intervalls) sowie die Mittelwerte jeder Meßstelle aufgeführt. Mit Ausnahme der Meßtermine 11.2.1993, 23.4.1993 und 23.6.1993 liegen somit für alle durchgeführten Durchbiegungs- und Dehnungsmessungen die Temperaturen der orthotropen Platte vor. Zu den drei Terminen 11.2.1993, 23.4.1993 und 23.6.1993 konnten aufgrund eines Defektes der Meßanlage keine Temperaturen gemessen werden.

In Abbildung 7.2 sind die Temperaturunterschiede über den Querschnitt der orthotropen Platte darge-

stellt. Hierzu wurden zunächst die Mittelwerte der Meßstellen 1 und 6 (Oberkante Schutzschicht), 2 und 5 (Oberkante Oktaphalt) sowie 3 und 4 (Oberkante Blech) gebildet. Von diesen Mittelwerten wurde dann jeweils der Mittelwert aller sechs Meßstellen subtrahiert. Die Abbildung macht deutlich, daß die Messungen im Zeitraum von September 92 bis Mai 1993 nur sehr geringe Temperaturunterschiede über den Querschnitt der orthotropen Platte aufweisen (max. 0,8 °C). Die größten Temperaturunterschiede zwischen Oberkante Blech und Oberkante Schutzschicht ergeben sich für die Messung am 5.7.1993 zu ca. 3,4 °C.

Da die gemessenen Temperaturunterschiede über den Querschnitt der orthotropen Platte für alle Messungen vergleichsweise gering sind, wird für die weiteren Auswertungen jeweils der Mittelwert aus allen sechs Meßstellen verwendet.

In Abbildung 7.3 sind die gemessenen Temperaturen (Mittelwert aus allen sechs Meßstellen) in grafischer Form dargestellt. Aus dieser Abbildung wird deutlich, daß die vorliegenden Durchbiegungsmessungen einen Temperaturbereich von ca. -5 °C bis +28 °C abdecken.

7.2 Jahrestemperaturganglinie der orthotropen Platte

Für die Ableitung eines Beanspruchungskollektivs der orthotropen Platte sind Angaben zum Jahresverlauf der Temperaturen erforderlich. Die Temperaturen der orthotropen Platte liegen lediglich für die 1/2-Stunden-Intervalle der Durchbiegungs- und Dehnungsmessungen vor. Auch die im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens ermittelten Seiltemperaturen am gleichen Bauwerk liegen für den untersuchten Meßzeitraum nicht lückenlos vor. Deshalb muß zur Ermittlung der Jahresganglinie der Temperaturen der orthotropen Platte eine andere Meßstelle außerhalb des Bauwerks herangezogen werden. Der Zusammenhang zwischen der Temperatur der orthotropen Platte und der verwendeten Meßstelle muß dann anhand statistischer Überlegungen erfolgen.

In [10] sind für eine Vielzahl von Orten die täglichen Temperaturen (Mittel-, Minimal- und Maximalwerte) enthalten. Zur Ermittlung der Jahresganglinie der Temperaturen der orthotropen Platte wird als Referenz die Meßstelle Essen-Bredeney verwendet, da diese die geringste Entfernung zur Rheinbrücke der A42 aufweist und auch aufgrund ähnlicher geografischer Verhältnisse als Referenzmeßstelle in Frage kommt.

Zur Ermittlung eines Zusammenhanges zwischen der Temperatur der orthotropen Platte und der der Meßstelle Essen-Bredeney wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Es zeigte sich, daß eine gute Prognose der Temperaturen der orthotropen Platte durch Verwendung der Tagesmaximaltemperatur Essen-Bredeney erreicht werden kann. Es ergibt sich folgende Regressionsgerade:

$$T_{\text{ESW}} [^{\circ}\text{C}] = 1,29 * T_{\text{Max,E-Br.}} [^{\circ}\text{C}] - 5,22$$

Abbildung 7.4 zeigt die Ergebnisse der Regressionsanalyse. Bereits aus der grafischen Darstellung wird deutlich, daß eine gute Anpassung der einzelnen Wertepaare durch die Regressionsgerade erreicht wird. Es ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,94$. Die Signifikanzwerte liegen sowohl für die Steigung als auch für den konstanten Anteil der Regressionsgeraden unterhalb von 0,05, was auf die Annahme der Hypothese eines linearen Zusammenhanges zwischen den maximalen Tagestemperaturen der Meßstelle Essen-Bredeney und den mittleren Temperaturen der orthotropen Platte und eine Übertragbarkeit der Stichproben auf die Grundgesamtheit schließen läßt.

Regressionsrechnungen, bei denen anstatt der maximalen Tagestemperatur der Meßstelle Essen-Bredeney die mittlere sowie die minimale Tagestemperatur verwendet wurden, zeigten weniger gute Bestimmtheitsmaße.

In den Tabellen 7.2 bis 7.13 sind für den gesamten Meßzeitraum die auf der Grundlage der Regressionsanalysen ermittelten mittleren Temperaturen der orthotropen Platte angegeben. Weiterhin enthalten die Tabellen auch die Temperaturen der Meßstelle Essen-Bredeney (Mittel-, Maximal- und Minimalwerte) sowie die aus den Tageswerten ermittelten Wochenmittelwerte für die orthotrope Platte. Die unter Verwendung der Ergebnisse der Regressionsanalyse ermittelten mittleren Wochenwerte der orthotropen Platte sind für den gesamten Meßzeitraum (Sept. 1992 bis Aug. 1993) in Abbildung 7.5 dargestellt.

8 Ableitung eines Beanspruchungskollektivs

8.1 Allgemeines

Die Messungen an der Rheinbrücke der A42 wurden durchgeführt, um Aussagen über die Bean-

spruchungen von orthotropen Platten abzuleiten. Diese Ergebnisse sollen im weiteren Eingang in Überlegungen zur Modifizierung der derzeit gültigen Dauerschwellbiegeprüfung finden.

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie aus den Ergebnissen der Durchbiegungsmessungen an der orthotropen Platte ein Beanspruchungskollektiv (Pfeilhöhenkollektiv) hergeleitet werden kann. Es werden die aus den 1/2-stündigen Durchbiegungsmessungen durch Klassierung nach dem Spitzenwertverfahren III ermittelten Pfeilhöhen zunächst auf Tageswerte hochgerechnet. Hierzu dienen die weiter oben abgeleiteten Tagesganglinien für den LKW-Verkehr (vgl. Abschnitt 6.2). Diese Tageswerte werden dann weiter zu Wochenwerten aggregiert. Aus diesen Wochenwerten läßt sich nun zusammen mit den Ergebnissen von Temperaturmessungen (vgl. Abschnitt 7) ein Jahrespfeilhöhenkollektiv für die orthotrope Platte aufstellen (Abschnitt 8.3). Dieses Beanspruchungskollektiv gilt zunächst nur für das untersuchte Bauwerk und die hier vorhandenen Randbedingungen wie Temperatur und Verkehr und läßt sich ohne weitere Überlegungen nicht zur Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung verwenden.

Um eine bessere Übertragbarkeit auf die Ergebnisse der Dauerschwellbiegeprüfung zu ermöglichen, wird zusätzlich ein temperaturunabhängiges Pfeilhöhenkollektiv abgeleitet (Abschnitt 8.4). Hierzu werden alle vorliegenden Durchbiegungsmessungen auf eine einheitliche Referenztemperatur von $T = 20^{\circ}\text{C}$ umgerechnet. Hierdurch können die Ergebnisse der einzelnen Messungen unter Berücksichtigung des Einflusses aus Verkehr direkt miteinander verglichen und überlagert werden.

8.2 Hochrechnung der Messungen zu Tageswerten

In Abschnitt 6 wurde anhand der an der Rheinbrücke der A42 durchgeführten Verkehrszählungen eine mittlere Tagesganglinie für den LKW-Verkehr abgeleitet. Mittels dieser Tagesganglinie lassen sich nun die in 1/2-Stunden-Messungen ermittelten Durchbiegungen bzw. die aus den Durchbiegungen durch Klassierung bestimmten Pfeilhöhenverteilungen auf Tageswerte hochrechnen.

Anlage 5 enthält für alle im Zeitraum von Dezember 1992 bis Juli 1993 durchgeführten Durchbiegungsmessungen die Ergebnisse dieser Hochrechnungen (Klassenbreite von 0,05 mm). Anlage 6 enthält die gleichen Ergebnisse für eine Klassenbreite von 0,10 mm. Für die Hochrechnung auf

Tageswerte wurden nur die Messungen im Zeitraum Dezember 1992 bis Juli 1993, die jeweils vormittags zwischen 8⁰⁰ und 12³⁰ Uhr durchgeführt wurden, verwendet. Die im Zeitraum von September 1992 bis November 1992 jeweils um 5⁰⁰ Uhr durchgeführten Durchbiegungsmessungen können für diese Hochrechnungen nicht verwendet werden, da zu diesem Zeitpunkt die Verkehrsbelastung zu gering war und somit bei einer Hochrechnung ein zu großer Fehler entstehen würde.

Die Anlagen 5 und 6 enthalten neben den Ergebnissen der Hochrechnungen auf Tageswerte auch die Angaben zu den verwendeten Klassierparametern (Schwellwert für die Felddurchbiegung und Hysterese) sowie die mittleren Temperaturen der orthotropen Platte.

Zu den Hochrechnungen muß bemerkt werden, daß diese streng genommen nur für eine konstante Tagestemperatur gelten. Da die Messungen jedoch alle vormittags durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, daß die Meßtemperaturen in etwa den mittleren Tagestemperaturen entsprechen und die Hochrechnungen somit in bezug auf die Pfeilhöhenverteilungen eine gute Näherung darstellen.

In Tabelle 8.1 sind die Ergebnisse der Hochrechnungen zusammenfassend dargestellt. Spalte 4 der Tabelle zeigt die Gesamtanzahlen der Lastspiele (Summe der Pfeilhöhenanzahlen in den Klassen KL1 bis KL11). Es handelt sich hier um Mittelwerte der Pfeilhöhenanzahlen der Meßstellen MS2 und MS4 nach Division durch die entsprechenden Werte für die Spurverteilung.

Die auf diese Weise gewonnenen Lastspielanzahlen sind unabhängig von der Meßstelle bzw. der Spurverteilung und geben einen Anhalt über die Tagessummen der Verkehrsereignisse (Anzahl der Achsen) der orthotropen Platte. Aufgrund der Unsicherheiten der Hochrechnung stellen die ermittelten Lastspielanzahlen nur eine Abschätzung der Verkehrsbelastung dar. Dies wird deutlich, wenn man die für einen Tag berechneten Lastspielanzahlen aus mehreren Messungen betrachtet. So wurden z.B. am 18.3.1993 drei Messungen durchgeführt (8⁰⁰-8³⁰ Uhr; 10⁰⁰-10³⁰ Uhr; 11⁰⁰-11³⁰ Uhr). Die für diesen Tag ermittelte Lastspielanzahl bzw. Anzahl der Achsen schwankt zwischen 13.134 und 16.937 (vgl. Tabelle 8.1). Diese Abweichungen resultieren aus der zur Hochrechnung auf die Tageswerte verwendeten mittleren Tagesganglinie, die aufgrund der geringen Größe der Stichprobe (vier Einzelzählungen) keine genaueren Ergebnisse erwarten läßt.

In Abbildung 8.1 sind die Ergebnisse der ermit-

telten Lastspielanzahlen zusammen mit den Ergebnissen der vier Verkehrszählungen (Anzahl der Achsen) dargestellt. Bei mehreren Durchbiegungsmessungen an einem Tag (z.B. 18.3.94) wurde der Mittelwert aus den Einzelmessungen gebildet. Die Abbildung macht deutlich, daß die ermittelten Lastspielanzahlen sehr gut mit den Ergebnissen der Verkehrszählungen korrespondieren. Außerhalb der Ferienzeiten und des Jahreswechsels 92/93 ergeben sich Lastspielanzahlen, die im Bereich der bei den Verkehrszählungen ermittelten Achsanzahlen liegen. Weiterhin macht die Abbildung deutlich, daß im Bereich des Jahreswechsels 92/93 eine starke Abnahme der Verkehrsbelastung zu verzeichnen ist (Messungen am 30.12.1992 und 5.1.1993).

Auch im Bereich der Sommerferien zeigen die berechneten Lastspielanzahlen eine abnehmende Tendenz. Lediglich die Messung am 23.4.1993 ergibt Lastspielanzahlen, die etwas oberhalb der Ergebnisse der übrigen Messungen liegen. Ein Grund hierfür kann aus den Meßergebnissen nicht abgeleitet werden.

In den Tabellen 8.2 bis 8.4 sind für die Meßstellen MS2 bis MS4 die Wochenwerte der Pfeilhöhenverteilungen dargestellt. Zur Ermittlung dieser Werte wird die Wochenganglinie für den LKW-Verkehr der Zählstelle Moers herangezogen [6]. Für die im "Feld" angeordneten Meßstellen MS2 und MS4 sind die negativen Pfeilhöhen (Durchbiegung der orthotropen Platte nach unten); für die oberhalb einer Steife angeordnete Meßstelle MS3 sind die positiven Pfeilhöhen dargestellt.

Aus den Tabellen wird bereits deutlich, daß das Verhalten der orthotropen Platte stark temperaturabhängig ist. Es zeigt sich für die Wintermessungen (16.12.92 bis 1.3.93), daß vorwiegend die Klassen KL1 und KL2 (entsprechend Pfeilhöhen von 0 bis 0,10 mm) belegt werden, während zum Sommer hin (Messungen vom 18.3.1993 bis zum 23.7.1993) eine Verschiebung der Pfeilhöhen zu größeren Werten hin stattfindet.

In den Tabellen 8.5 bis 8.7 sind die in den Tabellen 8.2 bis 8.4 dargestellten absoluten Pfeilhöhenanzahlen in Prozentwerte umgerechnet worden.

Weiterhin sind die Prozentwerte der einzelnen Klassen sowie die Summenwerte angegeben. Aus diesen Zusammenstellungen wird noch einmal deutlich, daß bei den durchgeführten Messungen ein großer Teil der Pfeilhöhen in den Klassen KL1 bis KL3 (entsprechend 0,0 bis 0,15 mm) liegt (MS2: 76 %; MS3: 83 %; MS4: 94 %).

In Abbildung 8.2 sind die Prozentwerte der Pfeilhöhenanzahlen für die Meßstellen MS2 bis

MS4 in Form eines Histogramms dargestellt. Auch hier zeigt sich wiederum die Konzentration der Pfeilhöhen in den Klassen KL1 bis KL3. Lediglich für die Meßstelle MS3 ergeben sich in der Klasse KL7 (0,30 bis 0,35 mm) noch nennenswerte Prozentanteile (15,1 %, vgl. hierzu auch Tabelle 8.6). Für die Meßstellen MS2 und MS4 ergeben sich in den Klassen KL4 bis KL11 Werte, die unterhalb von 10 % liegen.

Abbildung 8.3 zeigt die Summenhäufigkeiten der Pfeilhöhenanzahlen für die Meßstellen MS2 bis MS4. Den stärksten Anstieg zeigt die Meßstelle MS4; hier liegen 99,9 % der klassierten Pfeilhöhen unterhalb von 0,30 mm (Klasse KL6). Die Meßstelle MS2 zeigt im Vergleich zur Meßstelle MS4 einen etwas flacheren Verlauf der Summenlinie. Aber auch hier kann festgestellt werden, daß 87,4 % der klassierten Pfeilhöhen unterhalb des bei der Dauerschwellbiegeprüfung für diesen Belagstyp erreichten Durchbiegungswertes von ca. 0,25 mm liegen (Klasse KL5).

8.3 Ableitung eines Pfeilhöhenkollektivs

Zur Ermittlung eines Jahreskollektivs für die Pfeilhöhen sind zusätzlich zu den gemessenen Durchbiegungen und den daraus gewonnenen Pfeilhöhenverteilungen Angaben über die Temperaturen der orthotropen Platte sowie über die Verkehrsbelastung erforderlich.

Die Verkehrsbelastung der Rheinbrücke der A42 wurde anhand der Ergebnisse von vier Zählungen sowie zusätzlichen Informationen über den jahreszeitlichen Verlauf der LKW-Belastungen anhand der Zählstelle AK-Moers ermittelt (vgl. Abschnitt 6.3). Aufgrund dieser Überlegungen ergeben sich außerhalb der Ferienzeiten Tageswerte, die im Bereich von 11.000 bis 15.000 Achsen/Tag liegen. Die in den Zählungen ermittelten Werte konnten anhand der Ermittlung der Anzahl der Lastspiele der Durchbiegungsmessungen bestätigt werden (vgl. Abschnitt 8.1). Insgesamt kann die Verkehrsbelastung der Rheinbrücke der A42 mit ca. 920.000 LKW/a bzw. mit ca. 3.910.000 Achsen/a abgeschätzt werden (vgl. Abschnitt 6).

Temperaturmessungen der orthotropen Platte liegen nur für die Meßzeitpunkte, an denen Durchbiegungen oder Dehnungen gemessen wurden, vor. Auch die am gleichen Bauwerk im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens gemessenen Temperaturen der Seile liegen nicht vollständig für den gesamten Meßzeitraum vor. Wie in Abschnitt 7.2 gezeigt wurde, lassen sich jedoch aus den an

der Meßstelle Essen-Bredene gemessenen Temperaturen mittels einer Regressionsrechnung die mittleren Temperaturen der orthotropen Platte ausreichend genau bestimmen. Die Ergebnisse der durchgeführten Regressionsberechnungen sind in Abschnitt 7.2 ausführlich dargestellt.

Somit liegen für den gesamten Meßzeitraum (September 1992 bis August 1993) sowohl LKW-Achszahlen als auch die mittleren Temperaturen der orthotropen Platte vor. Mittels dieser Angaben lassen sich nun die vorhandenen Ergebnisse der 22 Einzelmessungen auf den gesamten Meßzeitraum übertragen. Die Ermittlung des Jahrespfeilhöhenkollektivs für die orthotrope Platte erfolgt unter folgenden Annahmen:

- Aus den vorhandenen Meßergebnissen werden durch Interpolation Pfeilhöhenverteilungen ermittelt, die für je 5 °C große Temperaturbereiche als konstant angenommen werden.
- Vor der Bildung der 5 °C breiten Temperaturklassen müssen die Pfeilhöhenverteilungen der Einzelmessungen auf mittlere Spurverteilungswerte umgerechnet werden. Für die Meßstelle MS2 werden alle Pfeilhöhenverteilungen auf einen Mittelwert von 45 %; für die Meßstelle MS4 auf einen Mittelwert von 34 % umgerechnet. Für die Meßstelle MS3 kann diese Umrechnung nicht erfolgen, da für die oberhalb der Steifen angeordneten Meßstellen eine Zuordnung von Überfahrten nicht möglich ist.
- Um die unterschiedlichen Verkehrsbelastungen bei den Einzelmessungen zu berücksichtigen, werden die Pfeilhöhenverteilungen durch die weiter oben (Abschnitt 6.3) ermittelten Wochenanteile (Achsen) dividiert. Somit erhält man Pfeilhöhenverteilungen, die für einen Wochenanteil von 1 % des Jahreswertes gelten.
- Aus den auf mittlere Spurverteilungswerte und einen Wochenwert von 1 % umgerechneten Pfeilhöhenverteilungen werden nun Pfeilhöhenverteilungen für 7 je 5 °C breite Temperaturklassen ermittelt (< 5 °C, 5 bis 10 °C, 10 bis 15 °C, 15 bis 20 °C, 20 bis 25 °C, 25 bis 30 °C, > 30 °C). Die beschriebenen Berechnungen werden für die Meßstellen MS2 (nur negative Pfeilhöhen), MS3 (nur positive Pfeilhöhen) und MS4 (nur negative Pfeilhöhen) durchgeführt.
- Der nächste Schritt zur Ermittlung eines Jahrespfeilhöhenkollektivs besteht in der Zuordnung der Pfeilhöhenverteilungen (5 °C Klassen) zu den einzelnen Wochen des Meßzeitraumes. Diese Zuordnung erfolgt über die mittleren Temperaturen der orthotropen Platte (vgl. Abschnitt 7.2).

- Nach erfolgter Zuordnung der Pfeilhöhenverteilungen zu den einzelnen Wochen des Meßzeitraumes müssen die Pfeilhöhenverteilungen nur noch mit den jeweiligen Wochenanteilen der Verkehrsbelastung (Achszahlen) multipliziert werden, um die unterschiedlichen Verkehrsbelastungen in den einzelnen Wochen des Meßzeitraumes zu berücksichtigen.

In den Abbildungen 8.4 bis 8.6 sind die auf die oben beschriebene Weise ermittelten Pfeilhöhenkollektive für die Meßstellen MS2 bis MS4 dargestellt. Hieraus wird deutlich, daß sich für die im Feld angeordneten Meßstellen (MS2, MS4) vom Verlauf her sehr ähnliche Pfeilhöhenverteilungen ergeben, während sich für die oberhalb einer Steife angeordnete Meßstelle MS3 eine völlig unterschiedliche Pfeilhöhenverteilung zeigt.

Insgesamt ergibt sich für die Meßstelle MS2 mit ca. 2.000.000 Lastspielen pro Jahr der größte Wert; für die Meßstelle MS3 werden ca. 540.000 Lastspiele ermittelt; für die Meßstelle MS4 ergeben sich insgesamt ca. 1.600.000 Lastspiele pro Jahr.

Weiterhin wird - wie auch schon bei der Diskussion der Einzelergebnisse (Abschnitt 8.2) - deutlich, daß die Pfeilhöhenanzahlen mit ansteigender Pfeilhöhengröße eine sehr stark abfallende Tendenz aufweisen. Für die Meßstelle MS3 sind die beiden Klassen KL1 und KL2 (Pfeilhöhen von 0 bis 0,10 mm) nahezu gleich stark belegt (ca. 250.000 Lastspiele), während für die Feldmeßstellen (MS2, MS4) auch hier schon eine große Abnahme zu verzeichnen ist (MS2: KL1 ca. 1.000.000, KL2 ca. 500.000 Lastspiele; MS4: KL1 ca. 750.000, KL2 ca. 480.000 Lastspiele).

Um die Verteilung der Pfeilhöhen besser vergleichbar zu machen, wurden die in den einzelnen Klassen ermittelten Pfeilhöhenanzahlen in Prozentwerte (100 % = Summe aller Pfeilhöhen einer Meßstelle) umgerechnet. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in den Abbildungen 8.7 bis 8.9 dargestellt. Zusätzlich zu den Prozentwerten der einzelnen Klassen enthalten die Abbildungen auch die Linien für die Summenhäufigkeiten der Pfeilhöhenwerte.

Anhand dieser Abbildungen wird noch einmal bestätigt, daß sich für die beiden Meßstellen MS2 und MS4 nahezu gleich verlaufende Pfeilhöhenverteilungen ergeben. Die geringeren Absolutwerte der Meßstelle MS4 sind auf den geringeren Wert für die mittlere Spurverteilung der Meßstelle MS4 zurückzuführen (MS2: ca. 45 %; MS4: ca. 34 %).

Die Linie für die Summenhäufigkeit zeigt für die Meßstelle MS2 gegenüber der Meßstelle MS4 einen etwas flacheren Verlauf, was auf eine höhere

Belegung der oberen Pfeilhöhenklassen hindeutet. Es kann jedoch festgestellt werden, daß die Durchbiegungswerte des Verbundkörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung, die sich im Bereich von 0,25-0,26 mm bewegen [3], für die Meßstelle MS2 von 8,3 % aller Pfeilhöhen überschritten werden; für die Meßstelle MS4 wird dieser Grenzwert praktisch nicht überschritten. Auch für die Meßstelle MS3 ergeben sich vergleichsweise kleine Pfeilhöhenanteile in den oberen Klassen. Die beiden Klassen 1 und 2 sind mit je ca. 48,5 % der Pfeilhöhen in etwa gleich belegt; in Klasse 3 liegen die restlichen 3 % der Pfeilhöhen, so daß hier ein Wert von 0,15 mm praktisch nicht überschritten wird.

8.4 Extremwerte der klassierten Pfeilhöhen

Neben den in den Abschnitten 8.2 und 8.3 dargestellten Verteilungen der Pfeilhöhen in den einzelnen Klassen sind für die Formulierung eines Beanspruchungskollektivs auch die Extremwerte und die zugehörigen Spannen der Pfeilhöhen von Interesse.

In den Abbildungen 8.10 bis 8.12 sind die Pfeilhöhenspannen für alle Einzelmessungen für die Meßstellen MS2 bis MS4 dargestellt. Man erkennt, daß Werte im Bereich von -0,25 mm (entsprechend den Durchbiegungen des Verbundkörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung) lediglich bei einigen Messungen erreicht bzw. überschritten werden. An der Meßstelle MS2 wurden bei insgesamt 5 Messungen (23.4.93, 27.5.93, 23.6.93, 5.7.93, 23.7.93) Pfeilhöhenmaxima gemessen, die kleiner als -0,25 mm sind (vgl. Abb. 8.10). An der Meßstelle MS3 wurden lediglich bei den beiden Messungen am 23.4.93 und 23.7.93 Pfeilhöhenmaxima oberhalb von +0,25 mm gemessen (Abb. 8.11). Hier ist jedoch ein direkter Vergleich mit den Durchbiegungen der Dauerschwellbiegeprüfung nicht möglich, da der Probekörper hier in vertikaler Richtung unverschiebbar gelagert ist (Rollenlager). An der Meßstelle MS4 wurden bei den beiden Messungen am 5.7.93 und 23.7.93 Werte kleiner als -0,26 mm gemessen (vgl. Abb. 8.12). Der Minimalwert wurde hier mit -0,39 mm am 23.7.1993 ermittelt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Überschreitung des Betrages 0,26 mm und der Meßtemperatur kann nicht festgestellt werden. Die Temperaturen der beiden Messungen am 23.4.1993 und 23.7.1993 liegen zwar jeweils oberhalb von 20 °C, aber andere Messungen, bei denen sogar noch höhere Temperaturen der ortho-

tropen Platte gemessen wurden (z.B. 23.6.1993 $T = 23,3 \text{ }^\circ\text{C}$, 5.7.1993 $T = 28,3 \text{ }^\circ\text{C}$), zeigen bei weitem nicht so große Pfeilhöhen wie die Messungen am 23.4.1993 und 23.7.1993. Offensichtlich wurde die orthotrope Platte zu diesen beiden Meßterminen mit besonders großen Achslasten beansprucht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Analyse der klassierten Pfeilhöhen im Hinblick auf die Maximalwerte der klassierten Pfeilhöhen und die Überschreitung der Durchbiegungen des Verbundkörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung aufgrund der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit keine Hinweise auf die Erforderlichkeit einer getrennten Behandlung von Extremwerten bei der Formulierung eines Beanspruchungskollektivs liefert.

8.5 Temperaturunabhängiges Pfeilhöhenkollektiv

Wie bereits ausführlich in Abschnitt 8.3 erläutert wurde, weist das Durchbiegungsverhalten der orthotropen Platte eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit auf. Das in Abschnitt 8.3 abgeleitete Jahresbeanspruchungskollektiv ist somit lediglich für das untersuchte Bauwerk bzw. für die zugrundeliegende Jahrestemperaturganglinie gültig.

Um die Meßergebnisse zu verallgemeinern und eine Übertragbarkeit auf andere Bauwerke bzw. auf die Dauerschwellbiegeprüfung, die bei $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ durchzuführen ist, zu ermöglichen, wird im folgenden versucht, aus den vorliegenden Meßergebnissen ein temperaturunabhängiges Pfeilhöhenkollektiv für $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ abzuleiten.

Da nur 3 der insgesamt 22 Einzelmessungen im Temperaturbereich von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ liegen, ist eine Hochrechnung alleine aus den Ergebnissen dieser drei Messungen aufgrund zu geringen Stichprobenumfangs nicht möglich bzw. mit zu großen Unsicherheiten behaftet. Um dennoch ein temperaturunabhängiges Beanspruchungskollektiv formulieren zu können, werden alle vorhandenen Messungen (Zeitraum Dezember 1992 bis Juli 1993) auf eine Referenztemperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ umgerechnet. Dies setzt jedoch voraus, daß ein Zusammenhang zwischen der Größe der Pfeilhöhen und der Temperatur angegeben werden kann. Zur Herleitung eines solchen Zusammenhangs werden Regressionsanalysen durchgeführt.

Grundsätzlich würde man für eine statistische Betrachtung der Temperaturabhängigkeit der klas-

sierten Pfeilhöhen die entsprechenden Mittelwerte der Einzelmessungen heranziehen. Aufgrund der bei einigen Messungen sehr geringen Besetzungsdichte in den einzelnen Klassen ist der Mittelwert zum Teil nur eingeschränkt aussagefähig. Es wird deshalb zur Ableitung eines Zusammenhangs zwischen Temperatur und Pfeilhöhengröße auf die gemessenen Extremwerte der klassierten Pfeilhöhen zurückgegriffen.

Vor der Durchführung der eigentlichen Regressionsanalyse wird das vorhandene Datenmaterial zunächst im Hinblick auf "Ausreißer" überprüft. Abbildung 8.13 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse in Form eines Stem and Leaf Plots für die Meßstellen MS2 bis MS4, getrennt für positive und negative Pfeilhöhen (die Variable MS2POS entspricht den positiven Pfeilhöhen der Meßstelle MS2). Aus der Abbildung wird deutlich, daß die Fälle 19, 20 und 22 im statistischen Sinne Ausreißer darstellen. Es handelt sich hierbei um die Messungen am 23.4.1993, 5.7.1993 und 23.7.1993. Bereits bei der Analyse der Extremwerte der klassierten Pfeilhöhen (vgl. Abschnitt 8.4) wurde dargestellt, daß die bei diesen Messungen relativ großen Pfeilhöhenwerte nicht offensichtlich temperaturbedingt sind.

In Tabelle 8.8 sind die Ergebnisse der durchgeführten Regressionsanalysen zusammenfassend dargestellt. Für die sechs Regressionsgeraden (MS2 bis MS4 jeweils positive und negative Pfeilhöhen) ergeben sich Bestimmtheitsmaße, die zwischen 0,79 (MS2, positiv) und 0,90 (MS2 negativ) liegen. Die Signifikanz (SigF) liegt für alle Regressionsgeraden unterhalb von 0,05, was auf die Annahme der Hypothese eines linearen Zusammenhangs zwischen Pfeilhöhe und Temperatur und eine Übertragbarkeit der Stichprobe auf die Grundgesamtheit schließen läßt. In Tabelle 8.8 sind die Parameter der berechneten Regressionsgeraden angegeben. Die Abbildungen 8.14 bis 8.16 zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Regressionsanalysen in grafischer Form. Es zeigt sich für alle Meßstellen eine gute Anpassung der berechneten Regressionsgeraden an die einzelnen Wertepaare der Messungen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Regressionsanalysen lassen sich nun alle 22 Einzelmessungen auf eine Temperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ umrechnen. Hierzu werden alle klassierten Pfeilhöhen einer Messung mit einem Faktor, der sich aus dem Verhältnis des Wertes der entsprechenden Regressionsgeraden für $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ zum Wert der Geradengleichung für die mittlere Belagstemperatur der jeweiligen Messung ergibt, multipliziert. Hierbei wird zwischen den einzelnen Meßstellen

und zusätzlich nach dem Vorzeichen der Pfeilhöhe unterschieden. Da im Hinblick auf die Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung vor allem die Felddurchbiegungen von Interesse sind, erfolgt die Ermittlung der Jahrespfeilhöhenkollektive für $T = 20\text{ °C}$ für die beiden am stärksten durch die Überfahrten beanspruchten Meßstellen MS2 und MS4.

Die Ermittlung des auf eine Temperatur von $T = 20\text{ °C}$ bezogenen Jahrespfeilhöhenkollektivs für die orthotrope Platte erfolgt unter folgenden Annahmen:

- Die Pfeilhöhenverteilungen der Einzelmessungen müssen zunächst auf mittlere Spurverteilungswerte umgerechnet werden. Für die Meßstelle MS2 werden alle Pfeilhöhenverteilungen auf einen Mittelwert von 45 %; für die Meßstelle MS4 auf einen Mittelwert von 34 % umgerechnet.
- Um die unterschiedlichen Verkehrsbelastungen bei den Einzelmessungen zu berücksichtigen, werden die Pfeilhöhenverteilungen durch die weiter oben (Abschnitt 6.3) ermittelten Wochenanteile (%-Werte der Achsen) dividiert. Somit erhält man zunächst Pfeilhöhenverteilungen, die für einen Wochenanteil von 1 % des Jahreswertes gelten.
- Die auf mittlere Spurverteilungswerte und einen Verkehrsanteil von 1 % (Wochenwert) umgerechneten Pfeilhöhenverteilungen werden gemittelt. Diese mittlere Pfeilhöhenverteilung wird nun den einzelnen Wochen des Meßzeitraumes zugeordnet.
- Nach erfolgter Zuordnung der Pfeilhöhenverteilungen zu den einzelnen Wochen des Meßzeitraumes müssen die Pfeilhöhenverteilungen nur noch mit den jeweiligen Wochenanteilen der Verkehrsbelastung (%-Werte der Achsen) multipliziert werden, um die unterschiedlichen Verkehrsbelastungen in den einzelnen Wochen des Meßzeitraumes zu berücksichtigen.

In den Abbildungen 8.17 und 8.18 sind die auf die oben beschriebene Weise ermittelten Pfeilhöhenkollektive als Prozentwerte für die Meßstellen MS2 und MS4 dargestellt (nur negative Pfeilhöhen entsprechend einer Durchbiegung nach unten). Es wird deutlich, daß für beide Meßstellen die größten Lastspielanzahlen innerhalb der Klasse 2 (Pfeilhöhen im Bereich von 0,05 bis 0,10 mm) liegen. Für die Meßstelle MS2 sind dies ca. 35 % aller klassierten Pfeilhöhen; für die Meßstelle MS4 liegt dieser Wert bei ca. 53 %. In der Klasse 1 (Pfeilhöhen von 0 bis 0,05 mm) ergeben sich

weitaus geringere Werte (MS2: ca. 13 %; MS4: ca. 25 %). Zu den höheren Klassen hin nehmen die relativen Pfeilhöhenhäufigkeiten sehr stark ab, wobei die Abnahme bei der Meßstelle MS2 im Vergleich zur Meßstelle MS4 nicht so stark ausgeprägt ist. In der Randklasse (Klasse 11, Pfeilhöhen $> 0,5\text{ mm}$) ergeben sich für die Meßstelle MS2 ca. 1 % aller Pfeilhöhen; für die Meßstelle MS4 werden keine Pfeilhöhen in der Randklasse ermittelt.

In den beiden Abbildungen 8.19 und 8.20 sind die relativen Pfeilhöhenhäufigkeiten für eine Referenztemperatur von $T = 20\text{ °C}$ den Häufigkeiten aus der Hochrechnung der Einzelmessungen unter Berücksichtigung der Jahrestemperaturganglinie gegenübergestellt (vgl. Abschnitt 8.3). Es wird deutlich, daß durch die Umrechnung der Messungen auf $T = 20\text{ °C}$ eine Verschiebung hin zu höheren Pfeilhöhenwerten verursacht wird.

Die unterschiedlichen Verteilungen werden auch anhand der ebenfalls in den Abbildungen eingezeichneten Summenhäufigkeitslinien deutlich. Für die Meßstelle MS2 (Abb. 8.19) verläuft die Summenlinie für $T = 20\text{ °C}$ über alle Klassen unterhalb der Summenlinie ohne Temperaturkorrektur. Für die Meßstelle MS4 verlaufen die beiden Summenlinien bereits ab der Klasse 2 nahezu deckungsleich.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Ableitung eines auf eine Temperatur von $T = 20\text{ °C}$ bezogenen Beanspruchungskollektivs im Vergleich zu den in Abschnitt 8.3 unter Berücksichtigung der Jahrestemperaturganglinie ermittelten Pfeilhöhenverteilungen höhere Beanspruchungen der orthotropen Platte liefert. Es ergeben sich höhere Belegungen in den oberen Klassen.

Bei der Übertragung dieser Ergebnisse auf die Dauerschwellbiegeprüfung sind jedoch materialtechnologische Fragestellungen zu klären. Zur Ermittlung der Lebensdauer von Fahrbahnbelägen orthotroper Platten sind hier vor allem auch die von der Temperatur und den Durchbiegungs- bzw. Pfeilhöhenspannen und -niveaus abhängigen Schädigungsinkremente von Interesse. Hierauf kann jedoch im Rahmen dieses Projektes nicht weiter eingegangen werden.

9 Laboruntersuchungen

9.1 E-Moduli

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Durchbiegungs- und Dehnungsmessungen geht hervor, daß das Last-Verformungsverhalten des Verbund-

körpers sehr stark temperaturabhängig ist. Dies beruht auf dem Einfluß des temperaturabhängigen Elastizitätsmoduls der bituminösen Schichten. Zur Quantifizierung der Größe des Einflusses der Temperatur auf die Verformung der orthotropen Platte, ebenso wie später auf die rechnerische Simulation der Dauerschwellbiegeprüfung, ist die Kenntnis des E-Moduls und seiner Temperatur- und Verformungsgeschwindigkeitsabhängigkeit erforderlich [2, 5]. Hierzu wurden in der BAST dynamische Werkstoffprüfungen für die bituminösen Schichten (Gußasphalt, Oktaphalt) durchgeführt [1]. Die Werte für den Modul $|E|$ wurden für 7 verschiedene Temperaturen (-20 °C bis +40 °C) und Frequenzen von 2 bis 120 Hz durch Zweipunktbiegeversuche ermittelt [6].

In Tabelle 9.1 sind die Ergebnisse der dynamischen Werkstoffprüfungen für die Gußasphaltschichten zusammengestellt; Abbildung 9.1 zeigt die Ergebnisse in grafischer Form. Anhand der Abbildung wird deutlich, daß die Temperatur einen erheblichen Einfluß auf die Größe des Moduls $|E|$ hat.

Es ergeben sich beispielsweise für 2 Hz Werte im Bereich von ca. 29.500 ($T = -20$ °C) bis zu 408 MN/m². Die E-Moduli nehmen mit ansteigender Frequenz zu, wobei der Einfluß der Frequenz bei niedrigen Temperaturen schwächer ausgeprägt ist als bei höheren Temperaturen (vgl. Abb. 9.1, $T = 20$ °C und $T = -20$ °C).

In Tabelle 9.2 sind die anhand der Moduli $|E|$ berechneten Werte des Moduls E_{eff} für den Gußasphalt dargestellt; Abbildung 9.2 zeigt die Werte des Moduls E_{eff} in grafischer Form. Der Modul E_{eff} kann aus den Werten des Moduls $|E|$ unter der Annahme, daß der E-Modul bei Anwendung eines Spannungsstoßes (E_{eff}) mit der Impulsbreite d gleich dem absoluten Modul $|E|$ bei einer Frequenz von $f = 1/(3 \cdot d)$ ist, berechnet werden [11]. Hierbei kann davon ausgegangen werden, daß der absolute Modul $|E|$ für 10 Hz einer Fahrgeschwindigkeit von $v = 60$ km/h entspricht.

Die Tabelle 9.3 zeigt die mittels der dynamischen Werkstoffprüfung für den Oktaphalt ermittelten absoluten Moduli ($|E|$). Im Vergleich zu den E-Moduli des Gußasphaltes ergeben sich hier weitaus kleinere Werte. Für $f = 2$ Hz liegen die E-Moduli des Oktaphalts im Bereich von 19.044 MN/m² ($T = -20$ °C). Für den Gußasphalt wurde hier ein Modul in Höhe von 29.422 MN/m² gemessen. Abb. 9.3 zeigt die Moduli $|E|$ für den Oktaphalt in grafischer Form. In Tabelle 9.4 sind die aus den Werten des absoluten E-Moduls ermittelten Werte des Moduls E_{eff} für den Okta-

phalt zusammengestellt. Abbildung 9.4 zeigt die Werte des Moduls E_{eff} in grafischer Form.

9.2 Dauerschwellbiegeprüfungen

9.2.1 Allgemeines

Da bislang keinerlei Erfahrungen über die bei der Dauerschwellbiegeprüfung im Verbundkörper auftretenden Dehnungen vorliegen, wurden in der BAST zwei Probekörper einer Prüfung, deren äußere Randbedingungen der Dauerschwellbiegeprüfung entsprechen, unterzogen. Diese Probekörper wurden mit DMS zur Erfassung von Dehnungen im Verbundkörper ausgestattet [7].

Ziel der Untersuchungen ist es, festzustellen, inwieweit die anhand der Messungen auf der Rheinbrücke der A42 bei Duisburg gewonnenen Meßergebnisse mit den Durchbiegungen/Dehnungen des Versuchsprobekörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung in Einklang stehen.

9.2.2 Versuchsprobekörper und Versuchseinrichtung

Der Aufbau der Belagsschichten der Probekörper entspricht dem Aufbau des Fahrbahnbelages auf der Rheinbrücke der A42. Detaillierte Angaben hierzu sind in Abschnitt 3 enthalten. Die Belagsschichten sind auf der gesamten Länge der Stahlplatte (700 mm) und auf einer Breite von 150 mm aufgebracht. Die Auflager der Probekörper bilden drei Stahlrollen in einem Abstand von 30 cm, welche je in einem Gestell in der Mitte gelagert sind.

Die Belastung wird über einen vierbeinigen Belastungsbock (Abbildung 2.1) über zwei Belastungsstege in die Stahlplatte eingeleitet (Abbildung 9.5). Bei den in der BAST durchgeführten Versuchen sind die Stahlplatten durch das Anschweißen der Belastungsstege verzogen. Diese Unebenheiten werden jedoch durch die in der Mitte gelagerten Rollenlager zum Teil wieder ausgeglichen.

9.2.3 Meßeinrichtung, Meßgeräte.

Zur Erfassung der Dehnungen des Verbundkörpers wurden insgesamt 24 Dehnungsmeßstreifen (DMS) auf den Oberkanten von Deckschicht, Schutzschicht, Oktaphaltschicht und Stahlplatte appliziert [7]. Die DMS wurden über den beiden Belastungsstegen sowie über den drei Rollenlagern angeordnet. Die genaue Lage der DMS ist aus Abbildung 9.6 zu ersehen.

Es wurden DMS vom Typ 10/350LY11 verwendet, deren technische Daten aus Abbildung 9.7 entnommen werden können. Grundsätzlich sollte bei DMS-Messungen an bituminösen Materialien die aktive Meßlänge der DMS etwa das Fünffache des verwendeten Größtkorns betragen [4]. Bei einem Größtkorn von 11 mm (Schutzschicht, Deckschicht) ergibt sich somit eine aktive Meßlänge von ca. 50 bis 60 mm. Da mittels DMS, die eine aktive Meßlänge von 50 bis 60 mm besitzen, die Dehnungen des Probekörpers an den Rollenlagern und im Bereich der Lasteinleitungspunkte nicht punktförmig erfaßt werden können, wurden DMS mit einer aktiven Meßlänge von 10 mm verwendet.

Es wurde Wert darauf gelegt, daß die Applizierung der DMS an einer möglichst homogenen Stelle des Materials erfolgte. Somit kann davon ausgegangen werden, daß das Verhalten des Probekörpers im Hinblick auf die Größe der auftretenden Dehnungen ausreichend genau erfaßt werden kann. Weiterhin sind bei der Auswahl der DMS natürlich die Temperaturen zu berücksichtigen, die beim Einbau der bituminösen Schichten auftreten. Besonderheiten, die sich für das Applizieren von DMS für diesen Temperaturbereich ergeben, sind bereits weiter oben beschrieben (vgl. Abschnitt 5.1).

An den vier äußeren seitlichen Enden der Belastungsstege sind vier induktive Wegaufnehmer mit Tastspitze (Typ W2ATK) angebracht (Abb. 9.5 und 9.8). So ist es möglich, die bei der Belastung auftretenden Verschiebungen an den Lasteinleitungspunkten statisch und dynamisch zu messen. Weiterhin läßt sich anhand dieser Meßergebnisse überprüfen, inwieweit die Belastung symmetrisch in die Stahlplatte eingeleitet wird.

9.2.4 Belastungseinrichtung

Für die Durchführung der Versuche steht in der BAST eine Hydropulsanlage der Firma Schenck zur Verfügung, die mit einem hängenden Zylinder für Zug und Druck mit einer maximalen Kraft von 400 kN ausgerüstet ist. Ein Aufspannbock mit eingelassenen T-Nuten garantiert eine einwandfreie und waagerechte Montage der Probekörper. Im jetzigen Ausbau der Anlage können sinus-, dreieck- und rechteckförmige Belastungen aufgebracht werden. Durch den zusätzlichen Anschluß eines Steuerrechners wären jedoch auch Belastungssteuerungen mit allen nur denkbaren Signalformen möglich. Somit ließen sich auch die aus den Messungen an der Rheinbrücke der A42 abgeleiteten Beanspruchungskollektive als Beanspruchung vorgeben.

9.2.5 Meßwerterfassung

Zur Verstärkung der Dehnungs- und Durchbiegesignale werden Trägerfrequenzverstärker eingesetzt. Die Kalibrierung der Durchbiegesignalverstärker erfolgt mit einer Mikrometerschraube, wobei die Länge der Anschlußkabel berücksichtigt wurde. Die Kalibrierung der Dehnungssignalverstärker geschieht mit einem Kalibrator. Die aufbereiteten Meßsignale werden durch einen Meßwerterfassungscomputer erfaßt, digitalisiert und auf Festplatte abgelegt (vgl. Abb. 9.8 und 9.9). Von hier aus erfolgt dann die weitere Verarbeitung und Auswertung. Die Abtastrate des Meßwerterfassungssystems beträgt 200 Hz. Die Praxis hat gezeigt, daß zur Vermeidung von Fehlabtastungen eine 20fache Abtastung für die größte auftretende Signalfrequenz erforderlich ist. Da die Belastungsfrequenz bei den hier durchzuführenden Versuchen 2 Hz (Sinus) beträgt, ergibt sich mit 200 Hz Abtastrate eine 100fache Abtastung der höchsten Signalfrequenz.

9.2.6 Herstellen der Versuchsprobekörper

Die Arbeiten zur Herstellung der Probekörper wurden nach Absprache mit der "Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg - Otto-Graf-Institut -" (FMPA) Stuttgart, bei der Teerbau in Essen unter Aufsicht eines Mitarbeiters der FMPA durchgeführt (siehe Prüfbericht). Die DMS wurden von einem Mitarbeiter der BAST, Bergisch Gladbach, appliziert. Hierbei wurde folgendermaßen vorgegangen:

Stahlplatte

Die Stahlplatte wurde sandgestrahlt, die DMS mit "Z70" appliziert und mit Silikon SG 250 abgedeckt.

Oktahaftmasse

Die Stahlplatte wurde auf 100 °C erhitzt. Nach Aufbringen der Oktahaftmasse wurde diese mit einem Spachtel verteilt. Die Abkühlungszeit betrug 2 Stunden.

Oktaphaltschicht

Nach Aufbringen der Oktaphaltschicht und einer Aushärtezeit von 24 Stunden wurden die DMS auf die angeschliffene Oktaphaltschicht mit X60 appliziert und mit X60 leicht abgedeckt. Silikon haftet nicht auf der Oktaphaltschicht und kann deshalb nicht zum Abdecken der DMS verwendet werden.

Schutzschicht

Nach Aufbringen der Schutzschicht (Gußasphalt 0/11 mm) und einer Aushärtezeit von 24 Stunden wurden die DMS mit X60 appliziert und mit Silikon abgedeckt.

Deckschicht

Nach Aufbringen der Deckschicht (Gußasphalt 0/11 mm) und einer Aushärtezeit von 24 Stunden wurden die DMS mit X60 appliziert und mit Silikon abgedeckt.

Nach dem Anlöten der Zuleitungskabel (Teflon) wurden diese mit X60 fixiert. Beim Applizieren der DMS ist darauf zu achten, daß der Andruck nicht zu groß ist, damit sich die Klebermasse X60 nicht vollständig an den Rändern herausdrückt. So bleiben kleine Unebenheiten der Oberfläche mit X60 ausgefüllt, und es entstehen unter dem DMS keine Hohlräume. Auch könnten bei zu großem Andruck Materialspannungen auftreten, was dazu führen würde, daß sich bei zu frühem Wegnehmen des Druckes die DMS vom Material lösen könnten.

9.2.7 Versuchsdurchführung

Gemäß TP-BEL-ST erfolgt die Kalibrierung an der beim jeweiligen Versuch verwendeten Stahlplatte vor Aufbringung der Asphaltsschichten wie folgt:

- Zunächst wird die Oberlast so festgelegt, daß unter dieser die mittlere Durchbiegung an den Lastangriffspunkten $l/600 = 0,50$ mm beträgt.
- Die Grundlast F_G wird mit ca. 15 % dieses Wertes festgelegt.
- Mit den auf diese Weise festgelegten Lasten werden dann die mit Belag versehenen Probekörper zunächst statisch belastet und die Durchbiegungen festgestellt.

Für die hier durchgeführten Versuche diente als Grundlage zur Ermittlung von Grund- und Oberlast nicht eine Kalibrierung, sondern die im Prüfungsbericht II.1-14421/I vom 11.7.1984 der FMPA Stuttgart bestimmten Lastgrößen [3]. Die zur Durchführung der Versuche erforderlichen Parameter (Belastungsfrequenz, Grundlast, Oberlast) können direkt in den Steuerrechner der Hydro- pulsanlage eingegeben werden.

9.2.8 Auswertung der Versuche

Der Versuchsprobekörper 1 wurde mit einer statischen Belastung (Grundlast) von 4,15 kN beaufschlagt; die dynamische Belastung (Oberlast) beträgt 20,80 kN. Weitere Parameter dieses Versu-

ches sind in der Tabelle 9.5 zusammengefaßt.

Abbildung 9.10 zeigt einen Teilausschnitt (Zeitintervall von 1 s) der Last-Zeit-Linie für den Probekörper 1. Maximal wirken auf den Probekörper Lasten in Höhe von 24,95 kN (Grundlast + Oberlast). Die Belastungsfrequenz beträgt 2 Hz.

In Abbildung 9.11 sind die entsprechenden Durchbiegungsverläufe für ein Zeitintervall von 1 s dargestellt. Nach unten gerichtete Durchbiegungen sind mit einem negativen Vorzeichen versehen. Aus der Abbildung wird deutlich, daß die Last nicht gleichmäßig auf die vier Lasteinleitungspunkte verteilt wird. Für die Grundlast ($t \cong 0,33$ und $t \cong 0,83$ s) ergeben sich unterschiedliche Verschiebungen. Es zeigt sich jedoch, daß die an den Lasteinleitungspunkten L1.1, L2.2 und L1.3 gemessenen Verschiebungen parallele Verläufe aufweisen. Lediglich am Lasteinleitungspunkt L2.4 wird ein von den übrigen Punkten abweichendes Last-Verschiebungsverhalten gemessen. Dies ist auf die durch das Anschweißen der Belastungsplatte verursachte Verspannung der Stahlplatte sowie auf die nicht einwandfreie Konstruktion des Belastungsrahmens zurückzuführen. In Tabelle 9.6 sind die für die Grundlast und die Oberlast gemessenen Verschiebungen an den Lasteinleitungspunkten, L1.1 bis L2.4 angegeben.

In Abbildung 9.12 sind die Dehnungen über dem Belastungssteg 2 für die einzelnen Schichten des Verbundkörpers für ein Zeitintervall von 1 s dargestellt. Man erkennt, daß an der Oberkante der Deckschicht erwartungsgemäß die größten Dehnungen auftreten (CH07). Interessant ist auch, daß die Dehnungen der Oktaphaltschicht infolge des Aufbringens der Oberlast gegenüber den übrigen Dehnungen ein anderes Vorzeichen aufweisen. In Tabelle 9.7 sind die für die Grundlast und die Oberlast gemessenen Dehnungen der einzelnen Schichten über dem Belastungssteg 2 zusammengestellt.

Abbildung 9.13 zeigt den infolge einer Laststeigerung von F_G auf F_O im Querschnitt über dem Belastungssteg 2 auftretenden Dehnungsverlauf im Verbundkörper. Innerhalb der Gußasphaltschichten ($y = 12 - 20,6$ mm) ergibt sich ein linearer Dehnungsverlauf; der Vorzeichenwechsel findet im Bereich der Oktaphaltschicht statt.

Zur Untersuchung des Last-Dehnungsverhaltens des Probekörpers wurde die Last stufenweise gesteigert. Abbildung 9.14 zeigt die Zunahmen der mittleren Durchbiegung sowie die Dehnungen des Stahlbleches oberhalb des Belastungssteges. Sowohl die Dehnungen des Stahlbleches als auch die mittlere Verschiebung der Lastangriffspunkte stei-

gen linear mit der Last an.

Im weiteren Versuchsablauf wurde der Probekörper einer Dauerbelastung ausgesetzt. Die Belastungsamplitude betrug zunächst 20,80 kN. Dies entspricht in etwa der Belastungsvorgabe aus dem Prüfbericht der FMPA, Stuttgart. Ab der Lastspielzahl 162.577 - bis hier zeigten sich keine Veränderungen am Versuchsprobekörper - wurde die Belastungsamplitude auf 31,59 kN erhöht, um festzustellen, wie der Versuchsprobekörper sich bei einer höheren Belastung verhält. Bei 179.000 Belastungsspielen löste sich der Belag von der Stahlplatte. Weitere Veränderungen am Belag waren nicht festzustellen. Der Versuch konnte nicht fortgesetzt werden.

Der Versuchsprobekörper 2 wurde mit einer statischen Belastung (Grundlast) in Höhe von 3,66 kN und einer dynamischen Belastungsamplitude (Oberlast) in Höhe von 22,92 kN beaufschlagt. Weitere Parameter zum Versuch 2 können der Tabelle 9.8 entnommen werden.

Die gemessenen Verschiebungen an den Lasteinleitungspunkten sind in Abbildung 9.15 und Tabelle 9.9 dargestellt. Auch hier zeigt sich - wie schon beim Probekörper 1 - am Lasteinleitungspunkt L2.4 (CH03) ein von den Verschiebungen an den übrigen Lasteinleitungspunkten abweichendes Verhalten. Als Grund hierfür ist vor allem die nicht maßgenaue Konstruktion des Belastungsrahmens zu nennen. Die gemessenen Durchbiegeamplituden entsprechen - unter Berücksichtigung der mechanischen Toleranzen - in etwa denen des Versuchsprobekörpers 1. Sie sind auch vergleichbar mit den Größen aus dem Prüfungsbericht II.1-14421/I der FMPA, Stuttgart, vom 11. Juli 84.

In Abbildung 9.16 sind die Dehnungsverläufe für einen Schnitt oberhalb des Belastungssteges L2 für ein Zeitintervall von 1 s dargestellt. Es ergeben sich unter Berücksichtigung einer gegenüber dem Versuch 1 etwas höheren Last vergleichbare dynamische Dehnungsamplituden.

Abbildung 9.17 zeigt die in einem Querschnitt über dem mittleren Rollenlager (R2) gemessenen Dehnungsverläufe für ein Zeitintervall von 1 s. Gegenüber dem Dehnungsverlauf über dem Belastungssteg weisen die Dehnungen ein geändertes Vorzeichen auf. Vom Betrag her ergeben sich Dehnungen, die größer als die entsprechenden Werte über dem Belastungssteg sind (vgl. Abb. 9.16). Die gemessenen Dehnungen für die beiden Querschnitte Belastungssteg L2 und Rollenlager R2 sind in den Tabellen 9.10 und 9.11 angegeben.

Die Abbildung 9.18 zeigt die für die beiden Querschnitte Belastungssteg L2 und Rollenlager R2 gemessenen Dehnungsverteilungen infolge des Aufbringens der Oberlast. Auch hier ergeben sich - wie beim Probekörper 1 - lineare Dehnungsverläufe im Bereich der Gußasphaltschichten sowie ein Vorzeichenwechsel innerhalb der Oktaphaltschicht.

10 FEM-Analysen zur Dauerschwellbiegeprüfung

10.1 Allgemeines

Im Rahmen der bei der BASt durchgeführten Vorversuche zur Dauerschwellbiegeprüfung wurden zwei Versuchskörper entsprechend den Vorgaben der TP-BEL-ST untersucht. Um die Dehnungsverläufe über den Querschnitt des Verbundkörpers erfassen zu können, wurden in den verschiedenen Schichten der Probekörper DMS appliziert (vgl. Abschnitt 9.2). Diese Meßergebnisse sollen durch numerische Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente (FEM) ergänzt werden.

Weiterhin werden Parameterstudien zur Abschätzung des Einflusses der Temperatur auf das Last-Verformungsverhalten der Probekörper bei der Dauerschwellbiegeprüfung durchgeführt. Schließlich wird der Einfluß der im Vergleich zur orthotropen Platte bei der Dauerschwellbiegeprüfung unterschiedlichen Lasteinleitung durch FEM-Studien untersucht.

10.2 Berechnungsannahmen

Den nachfolgend dargestellten Ergebnissen der FEM-Rechnungen liegen folgende, stark vereinfachende Annahmen für das Spannungs-Dehnungsverhalten des Verbundkörpers zugrunde:

- Alle Materialien werden als elastisch isotrop angenommen. Das bedeutet, daß aus der Viskosität der Asphaltsschichten resultierende Dehnungsanteile unberücksichtigt bleiben.
- Alle Schichten des Verbundkörpers weisen ein lineares Spannungs-Dehnungsverhalten auf.
- Es wird voller Schubverbund zwischen den einzelnen Schichten angenommen. Das bedeutet, daß in der Trennfläche Stahl-Oktaphalt und Oktaphalt-Gußasphalt keine Relativverschiebungen zwischen den einzelnen Schichten zugelassen werden.

- Es wird ein ebener Spannungszustand vorausgesetzt.

Für den Vergleich zwischen Versuch und FEM-Analyse werden folgende Materialkennwerte verwendet:

Stahlblech

Für das 12 mm dicke Stahlblech wird ein E-Modul von $2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ und eine Querkontraktionszahl von $\nu = 0,30$ angenommen. Diese Kennwerte werden als temperaturunabhängige Größen betrachtet.

Gußasphaltschichten

Für die beiden je 35 mm dicken Gußasphaltschichten wird gemäß den Ergebnissen der für dieses Material durchgeführten dynamischen Werkstoffprüfung ein E-Modul von 4.500 N/mm^2 angenommen (vgl. Abschnitt 9.1, Tabelle 9.1). Dieser Wert für den Modul $|E|$ ergibt sich für eine Frequenz von 2 Hz und eine Temperatur von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Für die Parameterstudien zur Abschätzung des Temperatureinflusses (vgl. Abschnitt 10.6) auf das Spannungs-Dehnungsverhalten des Verbundkörpers werden E-Moduli verwendet, die ebenfalls im Rahmen der dynamischen Werkstoffprüfung ermittelt wurden. Für Temperaturen im Bereich von $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ werden folgende E-Moduli verwendet:

T [$^\circ\text{C}$]	E [N/mm^2]
-10	25.000
0	18.000
10	10.500
20	4.500
30	1.300
40	400

Für die Querkontraktionszahl wird temperaturunabhängig ein Wert von $\nu = 0,45$ angesetzt.

Oktaphalt

Für die 10 mm dicke Oktaphaltschicht liegen ebenfalls Ergebnisse aus der dynamischen Werkstoffprüfung vor. Es ergeben sich für den Oktaphalt E-Moduli, die ca. 40 - 50 % der entsprechenden Werte des Gußasphaltes betragen.

Aufgrund des stark vereinfachten Rechenmodells führt der Ansatz von Steifigkeiten für den Oktaphalt in dieser Größenordnung jedoch nicht zu einer zufriedenstellenden Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung. Offensichtlich spielen hier

nichtelastische Effekte bzw. nichtreversible Schubverformungen am Übergang Stahl-Oktaphalt bzw. Oktaphalt-Gußasphalt eine Rolle. Um das einfache Rechenmodell dennoch verwenden zu können, wird für den Oktaphalt ein abgeminderter E-Modul in Höhe von ca. 10 % der Werte des Gußasphaltes angenommen.

Der Wert von ca. 10 % des E-Moduls der Gußasphaltschichten wird für alle untersuchten Temperaturen beibehalten. Für die Querkontraktionszahl wird - wie beim Gußasphalt - ein Wert von $\nu = 0,45$ verwendet.

10.3 FEM-Netz und Randbedingungen

Abbildung 10.1 zeigt das zur numerischen Simulation der Vorversuche zur Dauerschwellbiegeprüfung verwendete FEM-Netz incl. der Lasten und Randbedingungen. Die Berechnungen werden mittels des bei der BAST installierten FEM-Programms ANSYS (Version 5.0A) durchgeführt.

Das Netz besteht aus insgesamt 1.804 Dreieckselementen und 3.777 Knotenpunkten (vgl. Abb. 10.1). Es kommen Dreieckselemente mit 6 Knoten, die einen quadratischen Verschiebungsansatz aufweisen, zum Einsatz. Dieser Elementtyp kann sowohl für den ebenen Dehnungszustand als auch für den ebenen Spannungszustand eingesetzt werden. Grundsätzlich kann dieser Elementtyp auch für plastische Berechnungen sowie für Analysen mit großen Verschiebungen verwendet werden.

Als Ergebnisgrößen werden u.a. Spannungen, Dehnungen, Hauptspannungen, Hauptdehnungen ausgegeben. Pro Knoten sind zwei Freiheitsgrade, die Verschiebungen in x- und y-Richtung, zugelassen. Das Problem weist insgesamt ca. 7.550 Freiheitsgrade auf. Das FEM-Modell wurde mittels der in ANSYS integrierten Routinen zur Netzerstellung erstellt; die Auswertungen erfolgen mittels der in ANSYS integrierten Auswerterroutinen.

Die in Wirklichkeit räumliche Problemstellung wird auf ein 2D-Modell zurückgeführt. Die unterschiedlichen Breiten der einzelnen Schichten (Stahlblech 200 mm, Asphaltschichten 150 mm) werden über die Eingabe von Dicken berücksichtigt (plane stress with thickness). Die gemäß TP-BEL-ST vorgesehenen Versteifungen des Bleches im Bereich der Lasteinleitungspunkte bleiben für die FEM-Analysen unberücksichtigt.

Die Lasten werden - wie im Versuch - an der Oberkante des Stahlblechs angreifend eingegeben (vgl. Abb. 10.1). Um die Ergebnisse von Vorversuch und

Rechnung ohne weitere Umrechnungen miteinander vergleichen zu können, werden die Lasten entsprechend der Größe der dynamischen Last des Vorversuchs 2 (20,9 kN) vorgegeben (vgl. Abschnitt 9.2).

Entsprechend den Auflagerbedingungen im Versuch ist das FEM-Modell an drei Punkten in y-Richtung unverschiebbar gelagert. Um das Berechnungsmodell numerisch zu stabilisieren, wird das mittlere Auflager zusätzlich in x-Richtung festgehalten.

10.4 Berechnungsergebnisse

Die in diesem Abschnitt erläuterten Berechnungsergebnisse gelten für eine Temperatur von $T = 20\text{ °C}$ und sind somit mit den Ergebnissen der durchgeführten Versuche an den beiden Probekörpern vergleichbar.

Es wurden folgende Materialkennwerte verwendet:

Schicht	E [N/mm ²]	ν [-]
Stahl	$2,1 \cdot 10^5$	0,30
Oktaphalt	400	0,45
Gußasphalt	4.500	0,45

In den Abbildungen 10.2 und 10.3 sind die aus den Ergebnissen der FEM-Analyse interpolierten Dehnungsverläufe den im Versuch gemessenen Dehnungen gegenübergestellt. Die Berechnungsergebnisse zeigen sowohl für den Vertikalschnitt im Bereich der Lasteinleitung "Feld" als auch für den Vertikalschnitt im Bereich des mittleren Rollenlagers "Lager" eine gute Übereinstimmung zwischen numerischer Berechnung und Versuch.

Durch eine weitere Variation der E-Moduli der bituminösen Schichten - insbesondere der Oktaphaltschicht - könnte wahrscheinlich eine noch bessere Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung erreicht werden. Die dargestellten Ergebnisse machen jedoch deutlich, daß die gemessenen Dehnungen sowohl qualitativ als auch quantitativ durch das einfache FEM-Modell relativ gut beschrieben werden.

Anhand der berechneten Dehnungsverläufe wird auch das Tragverhalten des Verbundkörpers deutlich. Vereinfacht kann gesagt werden, daß es sich hier um zwei tragende Schichten (Stahl, Gußasphalt) unterschiedlicher Steifigkeit handelt, die über eine Schicht geringerer Steifigkeit (Oktaphalt)

schubweich miteinander verbunden sind. Dieses einfache Modell erklärt auch den Vorzeichenwechsel der Dehnungen innerhalb der Oktaphaltschicht.

In den beiden Abbildungen 10.4 und 10.5 sind die Spannungsverteilungen (σ_x) für die beiden Schnitte Feld und Lager gezeigt. Die Abbildungen machen deutlich, daß die Lastabtragung in erster Linie über das Stahlblech erfolgt. An der Unterkante des Stahlbleches ergeben sich rechnerisch ca. 42 N/mm^2 (Zugspannung im Feld, Druckspannung am Lager). Im Gußasphalt betragen die Spannungen σ_x nur ca. $2 - 3\text{ N/mm}^2$.

Es sei an dieser Stelle noch einmal erwähnt, daß es sich hier um die Ergebnisse elastischer Rechnungen mit vollem Schubverbund zwischen den einzelnen Schichten handelt. Die für die Berechnungen angenommene Steifigkeit des Oktaphalts entspricht nicht der Realität. Hieraus ergibt sich, daß im Rechenmodell die relativ hohen Spannungen an der Oberkante des Stahlbleches erst im Bereich der Oktaphaltschicht abgebaut werden können. Ließe man Relativverschiebungen zwischen Stahlblech und Oktaphalt bzw. zwischen Oktaphalt und Gußasphalt zu, würde dies wahrscheinlich zu Dehnungs- bzw. Spannungssprüngen im Bereich der Trennflächen Stahl-Oktaphalt bzw. Oktaphalt-Gußasphalt führen.

Ein solches Modell wäre voraussichtlich besser geeignet, die Spannungs- bzw. Dehnungsverteilung innerhalb der Oktaphaltschicht realitätsnah wiederzugeben. Hierzu müßten allerdings auch die entsprechenden Kennwerte der Trennflächen (Steifigkeiten, Festigkeiten) bekannt sein.

Die neutrale Faser liegt für das Blech im Feld bei $y = 9,0\text{ mm}$; am Lager bei einem Wert von $y = 8,6\text{ mm}$ (gemessen von der Unterkante Stahlblech), d.h. im oberen Drittel des 12 mm starken Stahlbleches.

In Abbildung 10.6 sind in einem Horizontalschnitt im Bereich der Oktaphaltschicht ($y = 17\text{ mm}$) die Vertikalspannungen σ_y sowie die Schubspannungen τ_{xy} aufgetragen. Die Schubspannungen betragen erwartungsgemäß Null an den beiden Lasteinleitungspunkten ($x = 175, 525\text{ mm}$) sowie am mittleren Rollenlager (Symmetrieachse). Die betragsmäßig größten Schubspannungen ergeben sich im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten und dem mittleren Rollenlager ($x = 100, 260\text{ mm}$). Weiterhin wird aus der Abbildung deutlich, daß es im Oktaphalt im Bereich der Lasteinleitungspunkte zu Zugspannungen in y-Richtung kommt ($x \cong 100\text{ bis }285\text{ mm}$, $x \cong 440\text{ bis }600\text{ mm}$). In den übrigen Bereichen ergeben sich Druckspannungen innerhalb der Oktaphaltschicht.

Abbildung 10.7 zeigt den Verlauf der Verschiebungen der Unterkante des Stahlblechs (Horizontalschnitt). Der Verlauf der Verschiebungen zeigt erwartungsgemäß maximale Werte an den Lasteinleitungspunkten ($x = 175, 525 \text{ mm}$). Die Werte betragen dort ca. $0,11 \text{ mm}$ und liegen damit etwas unterhalb der in den Versuchen gemessenen Werte. Aufgrund der stark unterschiedlichen Meßergebnisse für die vier Lasteinleitungspunkte (nicht maßgenaue Konstruktion des Belastungsbocks, vgl. Abschnitt 9.2) erscheint eine direkte Gegenüberstellung Versuch - Rechnung für diese Meßgröße nicht sinnvoll.

10.5 Einfluß der Lasteinleitung

Um den Einfluß der bei der Dauerschwellbiegeprüfung im Vergleich zum Bauwerk unterschiedlichen Lasteinleitung quantitativ beschreiben zu können, werden die Lasten für diesen Berechnungsfall auf die Oberkante der Gußasphaltschicht aufgebracht. Ansonsten bleiben alle in vorigen Abschnitt verwendeten Kennwerte unverändert.

In den Abbildungen 10.8 und 10.9 sind die berechneten Dehnungsverteilungen (ϵ_x) im Feld und im Bereich des mittleren Rollenlagers für diesen Lastfall dargestellt. Ein Vergleich mit den Abbildungen 10.2 und 10.3 macht deutlich, daß sich im Bereich des mittleren Rollenlagers keine wesentlich unterschiedliche Dehnungsverteilung ergibt, während sich für den Schnitt im Feld infolge der geänderten Lasteinleitung ein völlig anderer Dehnungsverlauf einstellt.

Die Dehnungen des Stahlbleches liegen für den Fall der Lasteinleitung auf der Gußasphaltschicht etwas unterhalb der Werte für eine Lasteinleitung gemäß TP-BEL-ST; die Dehnungen an der Oberkante der Gußasphaltschicht weisen hingegen etwas größere Werte auf. Im Bereich der Oktahaltschicht ergibt sich auch hier ein Vorzeichenwechsel der Dehnungen.

In den Abbildungen 10.10 und 10.11 sind die Spannungen σ_x für den Fall, daß die Lasten auf der oberen Gußasphaltschicht angreifen, dargestellt. Auch hier zeigt ein Vergleich mit den in Abschnitt 4 beschriebenen Spannungsverläufen eine Übereinstimmung für den Bereich des mittleren Rollenlagers, während sich für den Vertikalschnitt im Feld ein unterschiedlicher Spannungsverlauf ergibt. Auffällig ist dabei, daß im oberen Bereich des Gußasphaltes infolge der Querkontraktion relativ hohe Druckspannungen (bis zu ca. 9 N/mm^2) entstehen.

In Abbildung 10.12 sind für einen Horizontalschnitt im Bereich der Oktaphaltschicht ($y = 17 \text{ mm}$) die Vertikalspannungen σ_y und die Schubspannungen τ_{xy} dargestellt. Es wird deutlich, daß im Bereich des Oktaphalts über die gesamte Länge des Probekörpers Druckspannungen in y -Richtung mit einem Maximalwert am mittleren Rollenlager auftreten. Die Lage der Schubspannungsmaxima hat sich gegenüber der Lasteinleitung nach TP-BEL-ST nicht wesentlich verändert (vgl. Abb. 10.6).

Die für diesen Fall berechneten maximalen Verschiebungen (Feld) betragen ca. $0,09 \text{ mm}$ und sind somit gegenüber der Lasteinleitung an der Oberkante des Stahlbleches etwas kleiner (vgl. Abb. 10.7).

Die Berechnungen haben gezeigt, daß sich für den Fall der Lasteinleitung auf der Oberkante der Gußasphaltschicht (orthotrope Platte) im Vergleich zur Lasteinleitung an der Oberkante des Stahlbleches (Dauerschwellbiegeprüfung nach TP-BEL-ST) unterschiedliche Spannungs- und somit auch Dehnungsverteilungen im Bereich des Feldes ergeben. Da die orthotrope Platte in Wirklichkeit jedoch durch Flächenlasten und nicht, wie hier vereinfachend angenommen, durch Linienlasten beansprucht wird, ist eine quantitative Gegenüberstellung orthotrope Platte - Dauerschwellbiegeprüfung auf der Grundlage der hier gezeigten Berechnungsergebnisse nicht möglich. Die Ergebnisse der Berechnungen machen jedoch grundsätzliche Unterschiede in qualitativer Hinsicht deutlich.

10.6 Einfluß der Temperatur

Die TP-BEL-ST sieht die Durchführung der Dauerschwellbiegeprüfung bei Raumtemperatur ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) vor. Im Zusammenhang mit der vorgesehenen Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung steht u.a. auch die Durchführung der Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen zur Diskussion (vgl. hierzu auch Abschnitte 8.3 bis 8.5).

Im folgenden soll anhand des FEM-Modells der Einfluß der Temperatur auf das Spannungs-Dehnungsverhalten des Verbundkörpers gezeigt werden. Inwieweit diese Parameterstudien das tatsächliche Verhalten des Probekörpers realitätsnah beschreiben, sollte durch zusätzliche Versuche geklärt werden. Sicherlich ist das FEM-Modell jedoch geeignet, grundsätzliche Aussagen über den Einfluß der Temperatur auf das Verhalten des Verbundkörpers aufzuzeigen.

Zusätzlich zu den weiter oben dargestellten Berechnungsergebnissen für $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Abschnitt 10.4) werden die Temperaturen $-10, 0, 10, 30$ und

40 °C untersucht. Die jeweiligen E-Moduli für den Gußasphalt ergeben sich aus den Ergebnissen der dynamischen Werkstoffprüfungen (vgl. Abschnitt 10.2). Für die Oktaphaltschicht wird das bei den Berechnungen für $T = 20\text{ °C}$ angenommene Verhältnis von $E_{\text{Okt}}/E_{\text{GA}} = 0,1$ beibehalten. Für den Stahl wird von einer Temperaturunabhängigkeit des E-Moduls ausgegangen. Alle im folgenden dargestellten Berechnungsergebnisse werden auf den Referenzfall ($T = 20\text{ °C}$) bezogen.

In den Abbildungen 10.13 und 10.14 sind die Dehnungen (bezogen auf die Dehnungen bei $T = 20\text{ °C}$) in Abhängigkeit von der Temperatur für die Schnitte Feld (Abb. 10.13) und mittleres Rollenlager (Abb. 10.14) dargestellt. Es sind jeweils getrennte Verläufe für UK-Stahlblech, OK-Stahlblech, OK-Oktaphalt und OK-Gußasphalt dargestellt. Es wird deutlich, daß die Temperatur einen sehr großen Einfluß auf die Dehnungen des Verbundkörpers hat. Die Dehnungen des Stahlbleches werden jedoch bei weitem nicht so stark durch die Temperatur beeinflusst, wie die Dehnungen der bituminösen Schichten. Die Dehnungen des Stahlbleches schwanken zwischen ca. 50 % ($T = 10\text{ °C}$) und 225 % ($T = 40\text{ °C}$), bezogen auf den Referenzfall ($T = 20\text{ °C}$).

Für den Oktaphalt betragen diese Werte 13 % bis 370 % (mittleres Rollenlager) und 17 % bis 347 % im Feld. Für die OK-Gußasphalt ergeben die Berechnungen Werte von 24 % bis 313 % (mittleres Rollenlager) bzw. 23 % bis 334 % im Feld.

Die Abbildungen 10.15 und 10.16 zeigen die temperaturabhängigen Spannungsverteilungen für die beiden Schnitte Feld (Abb. 10.15) und mittleres Rollenlager (Abb. 10.16). Die Spannungen sind ebenfalls auf den Referenzfall ($T = 20\text{ °C}$) bezogen. Anhand dieser Auswertungen wird die Auswirkung von Steifigkeitsänderungen einzelner Schichten des Verbundkörpers besonders deutlich. Die mit zunehmender Temperatur abnehmenden Steifigkeiten der Asphaltsschichten führen zu einer entsprechenden Abnahme der Spannungen in den bituminösen Schichten, während die Spannungen des Stahlbleches mit steigender Temperatur zunehmen.

Der Effekt der temperaturabhängigen Lastabtragung bzw. Spannungsverteilung im Verbundkörper wird auch durch die in Abbildung 10.17 dargestellte Lage der neutralen Faser innerhalb des Stahlbleches deutlich. Mit ansteigender Temperatur geht die Tragwirkung mehr und mehr von den Gußasphaltsschichten auf das Stahlblech über. Damit verbunden ist eine Verlagerung der neutralen Faser nach unten (y wird von der Unterkante des Stahlbleches gemessen). Die neutrale Faser verla-

gert sich im Feld von $y = 9,0\text{ mm}$ ($T = -10\text{ °C}$) nach $y = 8,2\text{ mm}$ ($T = 40\text{ °C}$); am mittleren Lager verändert sich die Lage der neutralen Faser von $y = 8,6\text{ mm}$ ($T = -10\text{ °C}$) nach $y = 8,2\text{ mm}$ ($T = 40\text{ °C}$).

In Abbildung 10.18 sind die Verschiebungen der Unterkante des Stahlbleches unterhalb der Lastangriffspunkte wiederum bezogen auf den Referenzfall ($T = 20\text{ °C}$) dargestellt. Es zeigt sich auch hier eine stark ausgeprägte Abhängigkeit von der Temperatur. Die berechneten Verschiebungen schwanken zwischen ca. 27 % ($T = -10\text{ °C}$) und ca. 312 % ($T = 40\text{ °C}$) bezogen auf die Verschiebung bei $T = 20\text{ °C}$.

11 Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung

11.1 Allgemeines

Die Messungen an zwei Bauwerken, die Laboruntersuchungen sowie die Ergebnisse der numerischen Berechnungen haben deutlich gemacht, daß bei einer Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung vor allem folgende Einflußgrößen Berücksichtigung finden müssen:

- Abmessungen und Auflagerbedingungen des Probekörpers
- Art der Beanspruchung
- Beanspruchungskollektiv
- Belagstemperaturen

Zu diesen Punkten wird nachfolgend Stellung genommen.

11.2 Probekörperabmessungen und Auflagerbedingungen

Bei der Dauerschwellbiegeprüfung wird zur Idealisierung der Verhältnisse in situ ein Probekörper verwendet, bei dem es sich um einen Zweifeldträger mit Kragarmen handelt. Bei der Dauerschwellbiegeprüfung wird also das in Wirklichkeit vorhandene Tragsystem stark vereinfacht.

In Abbildung 11.1 sind für die Rheinbrücke im Zuge der A42 die an der Oberkante des Fahrbahnbleches gemessenen Dehnungen (DMS113 bis DMS115) dargestellt. Die Messungen wurden am 05. Juni 1991 mit einem Belastungsfahrzeug der BAST durchgeführt. Die Überfahrten erfolgten im Bereich der Meßstelle DMS114 (Feld) mit

Geschwindigkeiten von 5 - 50 km/h. Dargestellt sind die Dehnungen infolge der Überfahrt der Vorderachse. Die Radlast beträgt bei diesem Belastungsfahrzeug 23,3 kN.

Man erkennt, daß mit Ausnahme der Überfahrt mit $v = 5$ km/h die gemessenen Dehnungen dicht beieinander liegen. Generell zeigen die Überfahrten eine mit steigender Geschwindigkeit abnehmende Tendenz (vgl. hierzu Abschnitt 5.1). Die gemessenen Dehnungen zeigen einen symmetrischen Verlauf mit Mittelwerten, die an den Steifen (DMS113, DMS115) bei ca. 0,075 mm/m und im Feld (DMS114) bei ca. -0,090 mm/m liegen (Mittelwertbildung ohne Überfahrt mit $v = 5$ km/h).

Abbildung 11.2 zeigt die am 12. April 1994 an der Brücke über den Petersdorfer See gemessenen Dehnungen an der Oberkante des Fahrbahnbleches (DMS1, DMS2, DMS4) infolge der Überfahrt eines Belastungsfahrzeuges. Alle Überfahrten fanden im Bereich der Meßstelle DMS1 und DMS2 mit Geschwindigkeiten von 5 - 50 km/h statt. Die Radlast des Belastungsfahrzeuges beträgt 35,5 kN.

Auch hier ergeben sich für die verschiedenen Geschwindigkeiten Dehnungsverläufe, deren Werte mit Ausnahme der Überfahrt mit $v = 5$ km/h dicht beieinander liegen (vgl. hierzu Abschnitt 5.2). Die mittleren Dehnungen betragen hier 0,05 mm/m an der Meßstelle DMS1 (Steife), 0,026 mm/m an der Meßstelle DMS4 (Steife) und -0,024 mm/m an der Meßstelle DMS2 (Feld). Die Dehnungen an der Meßstelle DMS1 sind größer als die an der Meßstelle DMS4, da die Überfahrten nicht genau in Feldmitte (DMS2) erfolgten.

In Abbildung 11.3 sind die an der Oberkante des Fahrbahnbleches gemessenen Dehnungen für beide Bauwerke den Dehnungen an der Blechoberkante des Versuchsprobekörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung gegenübergestellt. Hierzu wurden die aus den Bauwerksmessungen ermittelten Dehnungen auf eine Temperatur von $T = 20$ °C umgerechnet. Die Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 fanden bei $T = 12,5$ °C statt.

Aus vergleichenden Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen läßt sich ein Faktor von 1,22 zur Umrechnung auf $T = 20$ °C ableiten (vgl. Abb. 5.9). Die Messungen für die Brücke über den Petersdorfer See fanden bei $T = 14$ °C statt. Da hier vergleichende Messungen für andere Temperaturen nicht vorliegen, wird ein Faktor von 1,16 aus den Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 zur Umrechnung der Messungen auf $T = 20$ °C verwendet.

Aus der Abbildung 11.3 wird deutlich, daß die

Dehnungen an der Oberkante des Fahrbahnbleches im Bereich des Feldes durch die Dauerschwellbiegeprüfung relativ gut wiedergegeben werden, während die Dauerschwellbiegeprüfung im Bereich des Rollenlagers R2 zu hohe Dehnungen liefert. Am Rollenlager R3 ergeben sich bei der Dauerschwellbiegeprüfung aufgrund des freien Kragarmes keine Dehnungen, während die Bauwerksmessungen hier von Null verschiedene Dehnungen zeigen.

Bei den Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 wurde zusätzlich zu den Dehnungen an der Oberkante des Fahrbahnbleches auch ein DMS auf der Oberkante der Deckschicht angebracht (DMS134, Feldmitte, vgl. Abb. 5.1 und 5.2). Hier ergeben sich infolge der Überfahrt der Vorderachse des Belastungsfahrzeuges im Mittel Dehnungen von ca. -0,58 mm/m. Die Messungen am Versuchsprobekörper ergaben hier Werte von ca. -0,41 mm/m. An der Oberkante des Versuchsprobekörpers liegen also die bei der Dauerschwellbiegeprüfung auftretenden Dehnungen etwas unterhalb der entsprechenden Werte am Bauwerk.

Es kann also festgestellt werden, daß die Dehnungen des Fahrbahnbleches im Bereich der Steifen durch die Dauerschwellbiegeprüfung überschätzt werden, während sie an der Oberkante des Belages am Bauwerk oberhalb der Werte der Dauerschwellbiegeprüfung liegen. Die Messungen der Dehnungen der bituminösen Schichten an der Rheinbrücke im Zuge der A42 können jedoch nicht ohne weiteres verallgemeinert werden, da zum einen keine Vergleichsmessungen an anderen Bauwerken vorliegen und es sich andererseits hier um die Ergebnisse einer Einzelmessung handelt. Auch die Abhängigkeit der Dehnungen der bituminösen Schichten von der Temperatur ist nicht ausreichend bekannt.

Im Hinblick auf eine Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung kann aus den oben dargestellten Gegenüberstellungen von Dehnungsmessungen gefolgert werden, daß die Verhältnisse am Bauwerk durch einen Mehrfeldträger bzw. durch eine Einspannung des Kragarmes besser nachgebildet werden könnten.

11.3 Art der Beanspruchung

Mittels numerischer Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente wurde der Einfluß der Lasteinleitung auf das Last-Verformungsverhalten des bei der Dauerschwellbiegeprüfung verwendeten Versuchsprobekörpers untersucht (vgl. Abschnitt 10). Hierbei haben sich deutliche

Unterschiede zwischen der bei der Dauerschwellbiegeprüfung angewandten Lasteinleitung über 2 Belastungsstege und der mehr der Realität entsprechenden Lasteinleitung, bei der die Lasten auf der Oberkante der bituminösen Schichten angreifen, gezeigt.

Die numerischen Berechnungen ergeben für eine Lasteinleitung gemäß TP-BEL-ST Zugspannungen im Bereich der Oktaphaltschicht in vertikaler Richtung, während bei der Lasteinleitung auf der Oberkante des Verbundkörpers keine Zugspannungen in vertikaler Richtung beobachtet werden (vgl. Abb. 10.2, 10.8).

Da bei den numerischen Analysen jedoch ein stark vereinfachtes Modell verwendet wurde (Annahme linearer Elastizität, keine Relativverschiebungen an den Grenzflächen Stahl-Asphalt bzw. Asphalt-Asphalt, Beanspruchung als Einzellast angenommen), lassen die Berechnungen keine quantitative Bewertung des Einflusses der Lasteinleitung zu. Für das weitere Vorgehen wird empfohlen, den beschriebenen Sachverhalt mittels verfeinerter numerischer Berechnungen in Kombination mit Laborversuchen näher zu untersuchen.

11.4 Beanspruchungskollektiv

Aus den Durchbiegungsmessungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 konnten Beanspruchungskollektive (Pfeilhöhen) unter realistischen Beanspruchungen des Bauwerkes durch Verkehr abgeleitet werden. In Abschnitt 8.3 sind Histogramme für ein Jahrespfeilhöhenkollektiv der orthotropen Platte der Rheinbrücke im Zuge der A42 dargestellt.

Weiterhin konnte aus den Messungen ein temperaturabhängiges Pfeilhöhenkollektiv ermittelt werden (Abschnitt 8.5). Vergleicht man dieses Beanspruchungskollektiv mit den Vorgaben der Dauerschwellbiegeprüfung, so kann festgestellt werden, daß für die maßgebende Meßstelle (MS2, Feldmitte) ca. 92 % aller Pfeilhöhen unterhalb des bei der Dauerschwellbiegeprüfung verwendeten Durchbiegungswertes von ca. 0,25 mm (Durchbiegung des Versuchsprobekörpers im Bereich der Belastungsstege infolge Steigerung der Last von F_G nach F_O) liegen (vgl. Abb. 8.19). Für das in Abschnitt 8.3 abgeleitete Jahrespfeilhöhenkollektiv der orthotropen Platte (ohne Temperaturkorrektur) liegen ca. 98 % aller Pfeilhöhen unterhalb des Durchbiegungswertes im Bereich der Belastungsstege bei der Dauerschwellbiegeprüfung.

Es kann also festgestellt werden, daß der bei der

Dauerschwellbiegeprüfung vorgegebene Durchbiegungswert bei den Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 sehr selten erreicht bzw. überschritten wurde. Der Mittelwert der Pfeilhöhen liegt bei ca. 0,10 mm (MS2, Beanspruchungskollektiv für $T = 20^\circ\text{C}$, Abschnitt 8.5). Auch ergeben sich aus den Bauwerksmessungen keine Hinweise auf extreme Pfeilhöhen (vgl. Abschnitt 8.4).

Im Vergleich zu den bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 gemessenen Durchbiegungen und Dehnungen ergaben die Messungen an der Brücke über den Petersdorfer See sehr viel geringere Werte. Für die Beanspruchung der orthotropen Platte ist offensichtlich neben der Blechstärke auch der Querträgerabstand sowie die konstruktive Ausbildung der Steifen relevant.

Von daher können obige Aussagen zur Größe der Beanspruchung der orthotropen Platte nicht ohne weiteres verallgemeinert und auf andere Bauwerke übertragen werden.

Es empfiehlt sich, zum Einfluß der Stärke des Fahrbahnbleches, des Querträgerabstandes und der konstruktiven Ausbildung der Steifen, Parameterstudien (z. B. mittels eines FEM-Modells) durchzuführen. Anhand dieser Zusatzinformationen könnten dann allgemeingültige Beanspruchungskollektive bzw. Grenzwerte für Beanspruchungskollektive abgeleitet werden.

Neben der eigentlichen Größe der Durchbiegungen bzw. Pfeilhöhen ist aber auch die Impulsdauer eine für die Betriebsfestigkeit des Verbundkörpers maßgebende Kenngröße. Die Auswertung einzelner LKW-Überfahrten hat bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 eine mittlere Impulsdauer im Bereich von 40 - 70 ms (Geschwindigkeit ca. 50 - 70 km/h) ergeben [6]. Bei der Brücke über den Petersdorfer See lagen die mittleren Impulsdauern bei einer Geschwindigkeit des Belastungsfahrzeuges von $v = 50$ km/h ebenfalls im Bereich von 40 - 70 ms.

Zusammenfassend kann anhand der Beanspruchungskollektive, die aus den Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 abgeleitet wurden sowie aus den Ergebnissen von ergänzenden Messungen an der Brücke über den Petersdorfer See gefolgert werden, daß die Vorgaben der Dauerschwellbiegeprüfung (1 Mio. Lastwechsel bei 2 Hz) im Hinblick auf die Größe und die zeitliche Verteilung der Beanspruchungen überprüft werden sollten. Hierzu können die für die Rheinbrücke im Zuge der A42 abgeleiteten Beanspruchungskollektive, ergänzt um noch durchzuführende Studien zum Einfluß von Fahrbahnblechstärke, Querträgerabstand und konstruktiver Ausbildung der Steifen, herangezogen werden.

11.5 Belagstemperatur

Die weiter oben beschriebenen Auswertungen der Durchbiegungsmessungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 haben deutlich gemacht, daß das Verhalten von orthotropen Fahrbahnplatten in hohem Maße von der Temperatur der bituminösen Schichten beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 4). Auch die Dehnungsmessungen haben den Einfluß der Belagstemperatur auf das Dehnungsverhalten der orthotropen Platte verdeutlicht.

Um den Einfluß der Belagstemperatur auf das Last-Verformungsverhalten des Probekörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung abzuschätzen, wurden numerische Berechnungen durchgeführt. Die entsprechenden E-Moduli der bituminösen Schichten wurden den Ergebnissen dynamischer Werkstoffprüfungen entnommen (vgl. Abschnitt 9.1). Auch hier zeigte sich, daß Dehnungen und Verformungen des Probekörpers in hohem Maße durch die Belagstemperaturen bestimmt werden.

Es wird deutlich, daß der Einfluß der Temperaturen der bituminösen Schichten bei einer Modifizierung der Vorgaben für die Dauerschwellbiegeprüfung berücksichtigt werden sollte. Um hierzu Vorgaben festzulegen, sollten Laborversuche, ergänzt durch numerische Berechnungen, durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang sind auch Informationen zur temperaturabhängigen Betriebsfestigkeit bituminöser Materialien bzw. des Verbundkörpers von Bedeutung.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Ziel der Erarbeitung von Hinweisen zur Modifizierung der in der TP-BEL-ST festgelegten Vorgehensweise für die Dauerschwellbiegeprüfung wurden ab Mitte 1992 Messungen an der orthotropen Fahrbahnplatte der Rheinbrücke im Zuge der A42 durchgeführt. Zusätzliche Messungen wurden an der orthotropen Fahrbahnplatte der Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19 vorgenommen. Dieses Bauwerk weist Fahrbahnblechstärken von 10 mm auf; bei der Rheinbrücke im Zuge der A42 beträgt die Stärke des Fahrbahnblechs 12 mm.

Die Auswahl und Prüfung der Verfahren zur Durchführung und Auswertung der Messungen sowie Vorgaben zur Meßwerterfassung (Stichprobenfolge, Stichprobenlänge und -dichte) und zur Datenreduktion (Klassierverfahren, Klassierparameter) sind detailliert im ersten Zwischenbericht zu diesem Projekt [6] beschrieben.

Im vorliegenden Schlußbericht werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen an den beiden Bauwerken sowie die daraus abgeleiteten Hinweise für die Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung dargestellt. Die Ergebnisse der Durchbiegungsmessungen sind in Abschnitt 4 zusammengestellt; die Dehnungsmessungen werden in Abschnitt 5 beschrieben.

Aus den 1/2-Stunden-Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 konnten mit zusätzlichen Informationen zur Verkehrsbelastung und zu den Temperaturen Durchbiegungs- bzw. Pfeilhöhenkollektive für dieses Bauwerk abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 8).

Das Jahrespfeilhöhenkollektiv für die Rheinbrücke im Zuge der A42 zeigt, daß die Durchbiegungswerte des Verbundkörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung, die sich im Bereich von 0,25-0,26 mm bewegen [3], für die Meßstelle MS2 für ca. 92 % aller Pfeilhöhen unterschritten werden; für die Meßstelle MS4 wird dieser Wert praktisch nicht überschritten. Auch für die Meßstelle MS3 ergeben sich vergleichsweise kleine Pfeilhöhenanteile in den oberen Klassen. Die beiden Klassen 1 und 2 sind mit je ca. 48,5 % der Pfeilhöhen in etwa gleich belegt, in Klasse 3 liegen die restlichen 3 % der Pfeilhöhen, so daß hier ein Wert von 0,15 mm praktisch nicht überschritten wird (vgl. Abschnitt 8.3). Eine Analyse der klassierten Pfeilhöhen im Hinblick auf Maximalwerte hat keine Hinweise auf die Erforderlichkeit einer getrennten Behandlung von Extremwerten erkennen lassen (vgl. Abschnitt 8.4).

Das auf eine Temperatur von $T = 20\text{ °C}$ bezogene Beanspruchungskollektiv ergibt im Vergleich zu den in Abschnitt 8.3 unter Berücksichtigung der Jahrestemperaturganglinie ermittelten Pfeilhöhenverteilungen höhere Beanspruchungen der orthotropen Platte. Es ergeben sich höhere Belegungen in den oberen Klassen (vgl. Abschnitt 8.5).

Um Aufschluß über die Verformungen und Dehnungen bei der Dauerschwellbiegeprüfung zu erhalten, wurden 2 Versuchsprobekörper, die mit DMS ausgerüstet waren, einer Prüfprozedur gemäß TP-BEL-ST unterzogen. Diese Versuche lieferten detaillierte Ergebnisse über die bei der Dauerschwellbiegeprüfung auftretenden Verformungen und Dehnungen des Verbundkörpers (vgl. Abschnitt 9.2). Es zeigte sich, daß die Dehnungsverläufe innerhalb der beiden Gußasphaltschichten nahezu linear sind. Weiterhin ergab sich bei beiden Versuchen ein Vorzeichenwechsel innerhalb der Oktaphaltschicht.

Die gemessenen Dehnungen liegen für die Schnitte über dem Belastungssteg und über dem mittleren Rollenlager vom Betrag her in der gleichen Größenordnung. Für die bei der Dauerschwellbiegeprüfung auftretenden Lasten (Oberlast, $l/600$ Felddurchbiegung) ergeben sich an der Oberkante der Stahlplatte Dehnungen, deren Betrag im Bereich von 0,10 - 0,17 mm/m liegt. An der Oberkante der Oktaphaltschicht liegen die gemessenen Dehnungsbeträge bei ca. 0,30 mm/m. An der Oberkante der Deckschicht wird für einen Schnitt über dem Belastungssteg ein Dehnungsbetrag von 0,40 mm/m gemessen. Für das Rollenlager R2 ergibt sich an dieser Stelle ein Betrag von ca. 0,60 mm/m (vgl. Abb. 9.18).

Zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit und der Art der Lasteinleitung auf das Last-Verformungsverhalten des Probekörpers bei der Dauerschwellbiegeprüfung wurden zusätzlich zu den Laborversuchen numerische Berechnungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 10). Die Ermittlung der elastischen Kennwerte für die bituminösen Schichten erfolgte mittels dynamischer Werkstoffprüfungen an Gußasphalt- und Oktaphaltproben (Abschnitt 9.1).

Die numerischen Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch. Während die im Versuch gemessenen Verschiebungen der Lastangriffspunkte etwas oberhalb der berechneten Werte liegen, zeigen die gemessenen Dehnungen für die beiden Schnitte Feld und mittleres Rollenlager eine sehr gute Übereinstimmung mit den berechneten Dehnungsverteilungen (Abschnitt 10.4).

Anhand des FEM-Modells konnte gezeigt werden, wie sich die im Vergleich zur Dauerschwellbiegeprüfung in der Praxis unterschiedliche Lasteinleitung auf das Spannungs-Dehnungsverhalten des Verbundkörpers auswirkt. Besonders interessant sind hier die Spannungen in y -Richtung im Bereich der Lasteinleitungspunkte. Während bei einer Lasteinleitung gemäß TP-BEL-ST Zugspannungen in vertikaler Richtung (σ_y) auftreten, verursacht eine Lasteinleitung auf der Oberkante der Gußasphaltschicht im Bereich der Oktaphaltschicht keine Zugspannungen in y -Richtung. Weiterhin haben die Berechnungen sehr stark abweichende Spannungs- bzw. Dehnungsverteilungen (ϵ_x , σ_x im Feld) für die beiden unterschiedlichen Lastfälle gezeigt (vgl. Abschnitt 10.5). Im Bereich des mittleren Lagers ergeben sich nur sehr geringe Unterschiede durch die veränderte Lasteintragung. Weiterhin konnte mittels der FEM-Analysen der Einfluß der Belagstemperatur auf das Spannungs-Dehnungsverhalten des Verbundkörpers verdeut-

licht werden.

Bezüglich der Bewertung der dargestellten Ergebnisse von FEM-Analysen muß jedoch gesagt werden, daß für quantitative Aussagen zum Spannungs-Dehnungsverhalten des Probekörpers in jedem Fall zusätzliche Versuche erforderlich sind. Zur rechnerischen Erfassung des Verhaltens der Oktaphaltschicht ist ein verfeinertes FEM-Modell erforderlich. Hier sollten die Verhältnisse im Übergangsbereich Stahl-Oktaphalt und Oktaphalt-Gußasphalt durch Interface-Elemente modelliert werden.

Aus den Messungen an den beiden Bauwerken lassen sich in Verbindung mit den Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten der Versuchsprobekörper und den Ergebnissen der FEM-Studien Hinweise zur Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung ableiten, die wie folgt zusammengefaßt werden können:

- Die Durchführung der Dauerschwellbiegeprüfung an einem ebenen "Ersatzsystem" liefert im Hinblick auf die Dehnungen des Fahrbahnbleches Werte, die mit den Dehnungen der orthotropen Platte vergleichbar sind. Eine bessere Anpassung an die Dehnungsverläufe in situ ließe sich jedoch durch eine elastische Einspannung der Kragarme bzw. durch Verwendung eines Mehrfeldträgers erreichen.
- Die bei der Dauerschwellbiegeprüfung angewendete Art der Lasteinleitung unterscheidet sich im Hinblick auf die Spannungen und Dehnungen innerhalb des Versuchsprobekörpers erheblich von den in situ auftretenden Beanspruchungen. Bei der Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung sollte dieser Aspekt Berücksichtigung finden.
- Das aus den Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 abgeleitete Beanspruchungskollektiv läßt erkennen, daß die Vorgaben der Dauerschwellbiegeprüfung im Hinblick auf die Größe der Beanspruchung bzw. die Verformungen in situ nur selten erreicht bzw. überschritten werden. Es sollten zukünftig Beanspruchungskollektive verwendet werden, die mehr den Verhältnissen in situ entsprechen.
- Zusätzlich zu der Größe der Durchbiegungen/Pfeilhöhen lassen sich aus den Ergebnissen der Dehnungsmessungen mittlere Impulsdauer im Bereich von 50 - 70 ms ableiten. Auch in diesem Punkt sollte untersucht werden, inwieweit die Dauerschwellbiegeprüfung (Belastungsfrequenz 2 Hz) die Verhältnisse in situ

realitätsnah wiedergibt.

Für das weitere Vorgehen ergeben sich aus den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen an 2 Bauwerken folgende Empfehlungen:

- Anhand von Laborversuchen sollten Möglichkeiten der elastischen Einspannung der Kragarme bzw. die Verwendung von Mehrfeldträgern untersucht werden. Diese Probekörper können dann mit realitätsnahen Beanspruchungskollektiven beaufschlagt werden. Hierbei ist auch die "direkte" Lasteinleitung zu berücksichtigen.
- Um die Anzahl der durchzuführenden Laborversuche auf ein Minimum zu beschränken, erscheint es sinnvoll, den Einfluß einzelner Parameter (z. B. Probekörperabmessungen, Größe der Lastfläche, Temperatureinfluß) durch numerische Berechnungen zu bestimmen.
- Zur Verallgemeinerung des aus den Messungen an der Rheinbrücke im Zuge der A42 abgeleiteten Beanspruchungskollektivs sind zusätzliche Untersuchungen zur Quantifizierung der Einflüsse des Querträgerabstandes und der konstruktiven Ausbildung der Steifen erforderlich.

Das Ziel des Projektes bestand in der Formulierung eines Last- bzw. Verformungskollektivs, das die Beanspruchungen aus Verkehr so beschreibt, daß hieraus ein Simulationsmodell zur Verifizierung bzw. zur Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung entwickelt werden kann.

Dieses Ziel wurde erreicht; zusätzlich wurden bereits erste Hinweise für eine Modifizierung der Dauerschwellbiegeprüfung erarbeitet.

13 Literatur

- [1] Buseck, H.: Ein Beitrag zur Bestimmung von Werkstoffkennwerten an bituminösen Straßenbaustoffen, Schriftenreihe: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 288, Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn - Bad Godesberg, 1980.
- [2] Harre, W.: Stoffeigenschaften bituminöser Brückenbeläge für orthotrope Fahrbahnplatten, Bitumen, 3/1974.
- [3] Harre, W.: Dauerschwellbiegeversuche mit einer Haftbrücke für bituminöse Brückenbeläge auf orthotropen Fahrbahnplatten bei Raumtemperatur, Prüfungsbericht II.1-14421/I, 11. Juli 1984, Hrsg.: Forschungs- und Materialprüfungsanstalt, Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart.
- [4] Hoffmann, Karl: Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Hrsg.: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt, 1987.
- [5] Hürtgen, H.: Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt, Schriftenreihe: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 361, Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn - Bad Godesberg, 1982.
- [6] Knabenschuh, H., Rath, E.: Orthotrope Fahrbahnplatte und Dauerschwellbiegeprüfung, 1. Zwischenbericht, Voruntersuchung an der Rheinbrücke im Zuge der A 42 (Emscherschnellweg) Hrsg.: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, November 1992.
- [7] Rath, E.: Orthotrope Fahrbahnplatte und Dauerschwellbiegeprüfung, 2. Zwischenbericht, Voruntersuchungen des Durchbiege- und Dehnungsverhaltens der Stahlplatte und der Belagsschichten, Januar 1994, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- [8] Sedlacek, G., Bild, S.: Beitrag zur Verbesserung der Haltbarkeit von Fahrbahnbelägen auf orthotropen Platten, Schriftenreihe: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 457 Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau: Bonn - Bad Godesberg, 1985.
- [9] Knabenschuh, H.: Messung von Temperaturunterschieden an Betonbrücken, 3. Zwischenbericht, August 1987, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- [10] Monatlicher Witterungsbericht, Deutscher Wetterdienst, 40. Jahrgang, Nummern 8-12, 41. Jahrgang, Nummern 1-7.
- [11] Merkblatt über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt, Ausgabe 1985, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

- [12] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Herstellung von Brückenbelägen auf Stahl (ZTV-BEL-ST), Ausgabe 1992, Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau.
- [13] Technische Lieferbedingungen für Baustoffe der Dichtungsschichten für Brückenbeläge auf Stahl (TL-BEL-ST), Ausgabe 1992, Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau.
- [14] Technische Prüfvorschriften für die Prüfung der Dichtungsschichten und der Abdichtungssysteme für Brückenbelag auf Stahl (TP-BEL-ST), Ausgabe 1992.

Anhang 1

Tabellen

Tab. 4.1: Durchbiegungsmessungen Rheinbrücke A42, September 1992 bis Oktober 1992

Nr.	Datum	Uhrzeit	
		von	bis
1	02.09.1992	05:00	05:30
2	04.09.1992	05:00	05:30
3	07.09.1992	05:00	05:30
4	18.09.1992	05:00	05:30
5	22.09.1992	05:00	05:30
6	23.09.1992	05:00	05:30
7	06.10.1992	05:00	05:30
8	08.10.1992	05:00	05:30
9	09.10.1992	05:00	05:30
10	19.10.1992	05:00	05:30
11	20.10.1992	05:00	05:30

Tab. 4.2: Durchbiegungsmessungen Rheinbrücke A42, Dezember 1992 bis Juli 1993

Nr.	Datum	Uhrzeit	
		von	bis
1	16.12.1992	11:00	11:30
2	16.12.1992	12:00	12:30
3	22.12.1992	11:00	11:30
4	30.12.1992	08:00	08:30
5	05.01.1993	08:00	08:30
6	05.01.1993	10:00	10:30
7	05.01.1993	12:00	12:30
8	11.02.1993	08:00	08:30
9	01.03.1993	08:00	08:30
10	01.03.1993	10:00	10:30
11	18.03.1993	08:00	08:30
12	18.03.1993	10:00	10:30
13	18.03.1993	11:00	11:30
14	19.03.1993	10:00	10:30
15	23.04.1993	11:00	11:30
16	13.05.1993	08:00	08:30
17	13.05.1993	09:00	09:30
18	27.05.1993	09:00	09:30
19	27.05.1993	10:00	10:30
20	23.06.1993	10:00	10:30
21	05.07.1993	11:00	11:30
22	23.07.1993	11:00	11:30

Tab. 4.3: Anzahl und Extremwerte der klassierten Pfeilhöhen, Rheinbrücke der A42, Dezember 1992 bis Juli 1993

Datum	Uhrzeit		Anz. kl. Pfeilhöhen			Extremwerte			Spurverteilung	
	von	bis	MS2-	MS3 +	MS4-	MS2-	MS3 +	MS4-	MS2	MS4
16.12.92	11:00	11:30	212	49	203	-0,12	0,02	-0,08	37,9	36,3
16.12.92	12:00	12:30	184	68	234	-0,13	0,02	-0,10	30,0	38,1
22.12.92	11:00	11:30	97	10	192	-0,09	0,01	-0,08	20,6	40,9
30.12.92	08:00	08:30	71	1	38	-0,05	0,00	-0,04	60,7	32,5
05.01.93	08:00	08:30	147	2	79	-0,07	0,00	-0,04	58,1	31,2
05.01.93	10:00	10:30	157	16	90	-0,07	0,01	-0,05	55,5	31,8
05.01.93	12:00	12:30	178	31	114	-0,06	0,01	-0,05	53,9	34,5
11.02.93	08:00	08:30	208	9	152	-0,07	0,00	-0,05	50,4	36,8
01.03.93	08:00	08:30	209	26	177	-0,06	0,01	-0,06	43,3	36,6
01.03.93	10:00	10:30	284	35	187	-0,09	0,01	-0,06	53,1	35,0
18.03.93	08:00	08:30	281	57	227	-0,17	0,02	-0,10	47,4	38,1
18.03.93	10:00	10:30	259	54	147	-0,18	0,02	-0,12	55,3	31,4
18.03.93	11:00	11:30	275	74	155	-0,20	0,02	-0,12	56,9	32,1
19.03.93	10:00	10:30	227	53	185	-0,14	0,02	-0,11	45,1	36,8
23.04.93	11:00	11:30	220	127	222	-0,57	0,35	-0,24	32,8	34,8
13.05.93	08:00	08:30	112	31	159	-0,26	0,03	-0,15	24,6	34,9
13.05.93	09:00	09:30	109	23	169	-0,17	0,03	-0,15	21,6	33,5
27.05.93	09:00	09:30	252	71	107	-0,29	0,05	-0,15	62,4	26,5
27.05.93	10:00	10:30	235	90	136	-0,40	0,06	-0,25	54,3	31,4
23.06.93	10:00	10:30	190	41	102	-0,40	0,07	-0,18	51,8	27,8
05.07.93	11:00	11:30	129	133	171	-0,56	0,12	-0,31	30,3	40,1
23.07.93	11:00	11:30	202	67	123	-1,59	0,78	-0,39	48,3	29,4

Tab. 4.4: Durchbiegungsmessungen, Brücke über den Petersdorfer See

Meßreihe	Überfahrt Nr.	v [km/h]	Spurlage [cm]	Bemerkung
1	1	5	-	Probefahrt
	2	5	-	Probefahrt
	3	5	24	
	4	5	8	
	5	5	18	
	6	5	6	
	7	10	4	
	8	10	10	
	9	10	2	
	10	10	-	Fehlversuch
	11	10	12	
	12	30	10	
	13	30	6	
	14	30	8	
	15	30	16	
	16	50	10	
	17	50	10	
	18	50	12	
	19	50	8	
2	20	5	-	Probefahrt
	21	5	30	
	22	5	36	
	23	10	26	
	24	10	14	
	25	30	10	
	26	30	6	Fehlversuch
	27	30	40	
	28	50	24	
	29	50	30	

Tab. 6.1: Ergebnisse der LKW-Zählung am 19.8.1992

Zeit	19.08.1992				
	LKW	Achsen	Achs/LKW	LKW%	Achsen%
00:00	14	73	5,2	0,51	0,66
00:30	6	27	4,5	0,22	0,25
01:00	6	27	4,5	0,22	0,25
01:30	4	19	4,8	0,15	0,17
02:00	7	31	4,4	0,26	0,28
02:30	10	43	4,3	0,37	0,39
03:00	10	43	4,3	0,37	0,39
03:30	19	87	4,6	0,69	0,79
04:00	25	100	4,0	0,91	0,91
04:30	28	120	4,3	1,02	1,09
05:00	60	270	4,5	2,19	2,45
05:30	70	286	4,1	2,56	2,60
06:00	101	411	4,1	3,69	3,73
06:30	98	409	4,2	3,58	3,71
07:00	94	385	4,1	3,44	3,49
07:30	104	373	3,6	3,80	3,38
08:00	93	352	3,8	3,40	3,19
08:30	101	383	3,8	3,69	3,48
09:00	114	430	3,8	4,17	3,90
09:30	105	418	4,0	3,84	3,79
10:00	84	336	4,0	3,07	3,05
10:30	88	353	4,0	3,22	3,20
11:00	132	537	4,1	4,83	4,87
11:30	101	416	4,1	3,69	3,77
12:00	98	392	4,0	3,58	3,56
12:30	117	447	3,8	4,28	4,06
13:00	100	381	3,8	3,66	3,46
13:30	123	499	4,1	4,50	4,53
14:00	107	420	3,9	3,91	3,81
14:30	86	347	4,0	3,15	3,15
15:00	89	332	3,7	3,26	3,01
15:30	63	249	4,0	2,30	2,26
16:00	73	289	4,0	2,67	2,62
16:30	63	274	4,3	2,30	2,49
17:00	58	233	4,0	2,12	2,11
17:30	50	203	4,1	1,83	1,84
18:00	39	166	4,3	1,43	1,51
18:30	45	194	4,3	1,65	1,76
19:00	31	131	4,2	1,13	1,19
19:30	16	70	4,4	0,59	0,64
20:00	17	68	4,0	0,62	0,62
20:30	21	101	4,8	0,77	0,92
21:00	11	49	4,5	0,40	0,44
21:30	15	69	4,6	0,55	0,63
22:00	8	35	4,4	0,29	0,32
22:30	14	67	4,8	0,51	0,61
23:00	4	20	5,0	0,15	0,18
23:30	12	55	4,6	0,44	0,50
Summe:	2.734	11.020		100,00	100,00

Tab. 6.2: Ergebnisse der LKW-Zählung am 17.9.1992

Zeit	17.09.1992				
	LKW	Achsen	Achs/LKW	LKW%	Achsen%
00:00	8	40	5,0	0,25	0,31
00:30	7	33	4,7	0,22	0,25
01:00	10	46	4,6	0,31	0,35
01:30	10	52	5,2	0,31	0,40
02:00	10	48	4,8	0,31	0,37
02:30	9	44	4,9	0,28	0,34
03:00	21	86	4,1	0,65	0,66
03:30	24	97	4,0	0,75	0,75
04:00	21	98	4,7	0,65	0,76
04:30	42	185	4,4	1,31	1,43
05:00	56	253	4,5	1,74	1,95
05:30	83	369	4,4	2,58	2,85
06:00	102	431	4,2	3,18	3,33
06:30	95	390	4,1	2,96	3,01
07:00	96	396	4,1	2,99	3,06
07:30	106	396	3,7	3,30	3,06
08:00	131	496	3,8	4,08	3,83
08:30	121	453	3,7	3,77	3,50
09:00	147	582	4,0	4,58	4,49
09:30	127	504	4,0	3,95	3,89
10:00	112	433	3,9	3,49	3,34
10:30	101	370	3,7	3,14	2,86
11:00	112	431	3,8	3,49	3,33
11:30	108	430	4,0	3,36	3,32
12:00	114	455	4,0	3,55	3,51
12:30	137	559	4,1	4,27	4,31
13:00	131	526	4,0	4,08	4,06
13:30	124	488	3,9	3,86	3,77
14:00	129	486	3,8	4,02	3,75
14:30	113	464	4,1	3,52	3,58
15:00	103	409	4,0	3,21	3,16
15:30	112	468	4,2	3,49	3,61
16:00	82	300	3,7	2,55	2,31
16:30	89	358	4,0	2,77	2,76
17:00	75	288	3,8	2,33	2,22
17:30	50	200	4,0	1,56	1,54
18:00	43	179	4,2	1,34	1,38
18:30	67	291	4,3	2,09	2,25
19:00	27	128	4,7	0,84	0,99
19:30	29	131	4,5	0,90	1,01
20:00	29	135	4,7	0,90	1,04
20:30	22	92	4,2	0,68	0,71
21:00	20	95	4,8	0,62	0,73
21:30	11	51	4,6	0,34	0,39
22:00	16	64	4,0	0,50	0,49
22:30	6	30	5,0	0,19	0,23
23:00	12	52	4,3	0,37	0,40
23:30	12	47	3,9	0,37	0,36
Summe:	3.212	12.959		100,00	100,00

Tab. 6.3: Ergebnisse der LKW-Zählung am 8.10.1992

Zeit	08.10.1992				
	LKW	Achsen	Achs/LKW	LKW%	Achsen%
00:00	11	53	4,8	0,30	0,36
00:30	10	48	4,6	0,27	0,32
01:00	5	23	4,7	0,14	0,16
01:30	11	55	4,8	0,30	0,37
02:00	14	66	4,7	0,38	0,45
02:30	10	45	4,5	0,27	0,30
03:00	20	90	4,4	0,55	0,61
03:30	25	110	4,5	0,68	0,74
04:00	30	133	4,4	0,82	0,90
04:30	49	215	4,4	1,34	1,45
05:00	63	278	4,4	1,72	1,87
05:30	90	381	4,2	2,46	2,57
06:00	113	471	4,2	3,09	3,18
06:30	116	474	4,1	3,17	3,20
07:00	131	524	4,0	3,58	3,53
07:30	123	455	3,7	3,36	3,07
08:00	140	536	3,8	3,83	3,61
08:30	144	546	3,8	3,94	3,68
09:00	154	599	3,9	4,21	4,04
09:30	118	462	3,9	3,22	3,12
10:00	130	519	4,0	3,55	3,50
10:30	143	547	3,8	3,91	3,69
11:00	136	544	4,0	3,72	3,67
11:30	125	511	4,1	3,42	3,45
12:00	146	585	4,0	3,99	3,94
12:30	116	477	4,1	3,17	3,22
13:00	141	568	4,0	3,85	3,83
13:30	118	475	4,0	3,22	3,20
14:00	142	573	4,0	3,88	3,86
14:30	118	475	4,0	3,22	3,20
15:00	138	543	3,9	3,77	3,66
15:30	130	525	4,0	3,55	3,54
16:00	129	497	3,9	3,53	3,35
16:30	88	366	4,2	2,41	2,47
17:00	100	390	3,9	2,73	2,63
17:30	72	292	4,1	1,97	1,97
18:00	56	242	4,3	1,53	1,63
18:30	36	155	4,3	0,98	1,05
19:00	32	138	4,4	0,87	0,93
19:30	45	201	4,4	1,23	1,36
20:00	30	131	4,4	0,82	0,88
20:30	22	105	4,7	0,60	0,71
21:00	17	80	4,6	0,46	0,54
21:30	17	81	4,7	0,46	0,55
22:00	13	56	4,2	0,36	0,38
22:30	14	63	4,6	0,38	0,42
23:00	16	75	4,6	0,44	0,51
23:30	12	51	4,3	0,33	0,34
Summe:	3.659	14.829		100,00	100,00

Tab. 6.4: Ergebnisse der LKW-Zählung am 3.2.1993

Zeit	03.02.1993				
	LKW	Achsen	Achs/LKW	LKW%	Achsen%
00:00	12	51	4,3	0,33	0,34
00:30	9	41	4,6	0,25	0,27
01:00	12	60	5,0	0,33	0,40
01:30	12	55	4,6	0,33	0,37
02:00	6	30	5,0	0,16	0,20
02:30	7	31	4,4	0,19	0,21
03:00	18	87	4,8	0,49	0,58
03:30	25	121	4,8	0,68	0,81
04:00	27	120	4,4	0,74	0,80
04:30	37	164	4,4	1,01	1,09
05:00	67	288	4,3	1,83	1,92
05:30	88	363	4,1	2,41	2,42
06:00	115	488	4,2	3,15	3,25
06:30	129	511	4,0	3,53	3,41
07:00	108	406	3,8	2,96	2,71
07:30	143	540	3,8	3,91	3,60
08:00	140	549	3,9	3,83	3,66
08:30	159	612	3,8	4,35	4,08
09:00	142	554	3,9	3,89	3,70
09:30	139	534	3,8	3,80	3,56
10:00	146	606	4,2	4,00	4,04
10:30	110	415	3,8	3,01	2,77
11:00	158	648	4,1	4,32	4,32
11:30	133	555	4,2	3,64	3,70
12:00	140	567	4,1	3,83	3,78
12:30	127	568	4,5	3,48	3,79
13:00	133	568	4,3	3,64	3,79
13:30	135	558	4,1	3,69	3,72
14:00	128	565	4,4	3,50	3,77
14:30	149	590	4,0	4,08	3,94
15:00	118	483	4,1	3,23	3,22
15:30	130	517	4,0	3,56	3,45
16:00	116	457	3,9	3,17	3,05
16:30	102	420	4,1	2,79	2,80
17:00	78	304	3,9	2,13	2,03
17:30	53	217	4,1	1,45	1,45
18:00	52	231	4,4	1,42	1,54
18:30	52	219	4,2	1,42	1,46
19:00	33	136	4,1	0,90	0,91
19:30	35	154	4,4	0,96	1,03
20:00	29	132	4,6	0,79	0,88
20:30	27	136	5,0	0,74	0,91
21:00	19	90	4,7	0,52	0,60
21:30	16	76	4,8	0,44	0,51
22:00	15	65	4,3	0,41	0,43
22:30	7	29	4,1	0,19	0,19
23:00	13	60	4,6	0,36	0,40
23:30	5	22	4,4	0,14	0,15
Summe:	3.654	14.993		100,00	100,00

Tab. 6.5: Zusammenfassung der LKW-Zählungen

Uhrzeit	Mittelwerte aus vier Zählungen				Glättung	
	LKW	Achsen	LKW (%)	Achsen (%)	Achsen (%)	
00:00	11	54	0,35	0,42	0,33	
00:30	8	37	0,24	0,27	0,32	
01:00	8	39	0,25	0,29	0,36	
01:30	9	45	0,27	0,33	0,41	
02:00	9	44	0,28	0,32	0,46	
02:30	9	41	0,28	0,31	0,55	
03:00	17	77	0,51	0,56	0,75	
03:30	23	104	0,70	0,77	1,01	
04:00	26	113	0,78	0,84	1,34	
04:30	39	171	1,17	1,27	1,68	
05:00	62	272	1,87	2,05	2,00	
05:30	83	350	2,50	2,61	2,30	
06:00	108	450	3,28	3,37	2,61	
06:30	110	446	3,31	3,33	2,93	
07:00	107	428	3,24	3,20	3,24	
07:30	119	441	3,59	3,28	3,41	
08:00	126	483	3,78	3,57	3,50	
08:30	131	499	3,94	3,68	3,52	
09:00	139	541	4,21	4,03	3,56	
09:30	122	480	3,71	3,59	3,60	
10:00	118	474	3,53	3,48	3,64	
10:30	111	421	3,32	3,13	3,67	
11:00	135	540	4,09	4,05	3,68	
11:30	117	478	3,53	3,56	3,66	
12:00	125	500	3,74	3,70	3,68	
12:30	124	513	3,80	3,84	3,68	
13:00	126	511	3,81	3,78	3,65	
13:30	125	505	3,82	3,80	3,60	
14:00	127	511	3,83	3,80	3,52	
14:30	117	469	3,49	3,47	3,40	
15:00	112	442	3,37	3,26	3,23	
15:30	109	440	3,23	3,21	2,99	
16:00	100	386	2,98	2,83	2,74	
16:30	86	355	2,57	2,63	2,50	
17:00	78	304	2,33	2,25	2,23	
17:30	56	228	1,70	1,70	1,98	
18:00	48	205	1,43	1,52	1,71	
18:30	50	215	1,53	1,63	1,49	
19:00	31	133	0,94	1,00	1,26	
19:30	31	139	0,92	1,01	1,07	
20:00	26	117	0,78	0,86	0,93	
20:30	23	109	0,70	0,81	0,80	
21:00	17	79	0,50	0,58	0,66	
21:30	15	69	0,45	0,52	0,58	
22:00	13	55	0,39	0,41	0,53	
22:30	10	47	0,32	0,36	0,45	
23:00	11	52	0,33	0,37	0,40	
23:30	10	44	0,32	0,34	0,39	
Summe:	3.317	13.456	100%	100%	100%	

Tab. 6.6: Abschätzung der Jahresganglinie für die A42

KW	LKW	LKW%	Achsen	Achsen%
1992				
36	18.308	2,07	74.330	2,07
37	18.202	2,06	73.900	2,06
38	18.378	2,08	74.615	2,08
39	18.723	2,12	76.015	2,12
40	18.599	2,10	75.512	2,10
41	18.352	2,08	74.509	2,08
42	18.387	2,08	74.651	2,08
43	18.272	2,07	74.184	2,07
44	15.505	1,75	62.950	1,75
45	18.149	2,05	73.685	2,05
46	18.767	2,12	76.194	2,12
47	15.903	1,80	64.566	1,80
48	18.758	2,12	76.157	2,12
49	19.413	2,20	78.817	2,20
50	19.156	2,17	77.773	2,17
51	14.285	1,62	57.997	1,62
52	6.241	0,71	25.338	0,71
53	7.160	0,81	29.070	0,81

Tab. 6.6: Abschätzung der Jahresganglinie für die A42

KW	LKW	LKW%	Achsen	Achsen%
1993				
1	7.160	0,81	29.070	0,81
2	16.381	1,85	66.507	1,85
3	16.221	1,83	65.857	1,84
4	16.902	1,91	68.622	1,91
5	14.940	1,69	60.656	1,69
6	16.557	1,87	67.221	1,87
7	16.911	1,91	68.659	1,91
8	17.247	1,95	70.023	1,95
9	17.468	1,98	70.920	1,98
10	17.724	2,00	71.959	2,01
11	18.113	2,05	73.539	2,05
12	11.784	1,33	47.843	1,33
13	18.387	2,08	74.651	2,08
14	17.963	2,03	72.930	2,03
15	17.874	2,02	72.568	2,02
16	18.202	2,06	73.900	2,06
17	15.824	1,79	64.245	1,79
18	15.028	1,70	61.014	1,70
19	15.514	1,75	62.987	1,76
20	19.041	2,15	77.306	2,15
21	16.036	1,81	65.106	1,81
22	18.882	2,14	76.661	2,14
23	18.361	2,08	74.546	2,08
24	17.830	2,02	72.390	2,02
25	18.361	2,08	74.546	2,08
26	17.874	2,02	72.568	2,02
27	17.194	1,95	69.808	1,95
28	16.805	1,90	68.228	1,90
29	16.009	1,81	64.997	1,81
30	15.647	1,77	63.527	1,77
31	16.195	1,83	65.752	1,83
32	16.513	1,87	67.043	1,87
33	16.867	1,91	68.480	1,91
34	17.600	1,99	71.456	1,99
35	17.998	2,04	73.072	2,04

Summe:	884.000	100,00	3.588.920	100,00
---------------	----------------	---------------	------------------	---------------

Tab. 7.1: Temperaturmessungen an der orthotropen Platte der A42

Datum Uhrzeit	Meßstelle					
	1	2	3	4	5	6
02.09.1992	10,6	11,1	10,7	10,9	10,9	10,6
500-530	10,6	11,1	10,7	10,9	10,9	10,6
	10,6	10,9	10,9	11,0	11,0	10,8
Mittelwert:	10,6	11,0	10,8	10,9	10,9	10,7
04.09.1992	11,0	11,3	11,1	11,3	11,3	11,0
500-530	11,0	11,5	11,1	11,3	11,5	11,1
	11,0	11,5	11,1	11,3	11,5	11,1
Mittelwert:	11,0	11,4	11,1	11,3	11,4	11,1
07.09.1992	14,0	14,3	14,1	14,1	14,0	13,6
500-530	13,7	13,9	13,8	13,9	14,0	13,8
	13,5	13,9	13,7	13,9	14,0	13,6
Mittelwert:	13,7	14,0	13,9	14,0	14,0	13,7
18.09.1992	11,4	12,2	11,8	12,2	12,2	11,5
500-530	11,2	12,1	11,7	12,1	12,1	11,3
	11,2	11,8	11,6	11,8	11,8	11,3
Mittelwert:	11,3	12,0	11,7	12,0	12,0	11,4
22.09.1992	16,7	17,1	16,8	17,1	17,1	17,0
500-530	17,0	17,2	17,1	17,2	17,4	17,1
	17,0	17,2	17,2	17,4	17,4	17,1
Mittelwert:	16,9	17,2	17,0	17,2	17,3	17,1
23.09.1992	13,7	14,7	14,3	14,7	14,7	13,9
500-530	13,6	14,4	14,3	14,5	14,4	13,7
	13,4	14,2	14,1	14,2	14,2	13,5
Mittelwert:	13,6	14,4	14,2	14,5	14,4	13,7
06.10.1992	9,0	9,2	9,0	9,2	9,2	9,0
500-530	9,0	9,2	9,0	9,2	9,2	9,0
	8,9	9,1	8,8	9,1	9,4	9,0
Mittelwert:	9,0	9,2	8,9	9,2	9,3	9,0
08.10.1992	8,0	8,6	8,5	8,6	8,2	7,6
500-530	7,7	8,4	8,2	8,4	8,4	7,8
	7,5	8,2	8,1	8,2	8,1	7,5
Mittelwert:	7,7	8,4	8,3	8,4	8,2	7,6
09.10.1992	11,0	11,2	10,9	11,1	11,2	11,1
500-530	10,9	11,2	11,0	11,2	11,3	11,0
	10,8	11,0	10,9	11,0	11,2	10,9
Mittelwert:	10,9	11,1	10,9	11,1	11,2	11,0

Tab. 7.1: Temperaturmessungen an der orthotropen Platte der A42

Datum Uhrzeit	Meßstelle					
	1	2	3	4	5	6
19.10.1992	6,0	6,9	6,4	6,7	6,7	6,0
500-530	5,9	6,7	6,3	6,7	6,7	6,0
	5,8	6,5	6,4	6,5	6,5	5,9
Mittelwert:	5,9	6,7	6,4	6,6	6,6	6,0
20.10.1992	3,6	4,5	4,2	4,5	4,4	3,6
500-530	3,5	4,3	4,2	4,3	4,3	3,6
	3,6	4,3	4,3	4,4	4,3	3,7
Mittelwert:	3,6	4,4	4,2	4,4	4,3	3,6
16.12.1992	7,9	7,5	7,5	7,5	7,6	7,9
1100-1130	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Mittelwert:	7,9	7,5	7,5	7,5	7,6	7,9
16.12.1992	7,9	7,5	7,5	7,5	7,5	7,9
1200-1230	8,2	7,6	7,6	7,8	7,8	8,5
	8,5	7,8	7,7	7,8	7,9	8,7
Mittelwert:	8,2	7,6	7,6	7,7	7,7	8,4
22.12.1992	-	-	-	-	-	-
1100-1130	-	-	-	-	-	-
	4,4	4,4	4,5	4,5	4,4	4,5
Mittelwert:	4,4	4,4	4,5	4,5	4,4	4,5
30.12.1992	-	-	-	-	-	-
800-830	-6,0	-5,4	-5,4	-5,3	-5,4	-6,0
	-5,9	-5,2	-5,1	-5,2	-5,4	-5,9
Mittelwert:	-6,0	-5,3	-5,3	-5,3	-5,4	-6,0
05.01.1993	-2,9	-3,2	-3,2	-3,1	-2,9	-2,8
800-830	-2,9	-3,0	-3,3	-3,0	-2,9	-2,8
	-2,7	-2,7	-2,8	-2,7	-2,5	-2,4
Mittelwert:	-2,8	-3,0	-3,1	-2,9	-2,8	-2,7
05.01.1993	-1,6	-1,6	-1,6	-1,6	-1,6	-1,3
1000-1030	-1,1	-1,3	-1,1	-1,3	-1,1	-0,7
	-0,8	-1,1	-1,1	-1,1	-1,0	-0,6
Mittelwert:	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1,2	-0,9
05.01.1993	1,5	1,1	0,7	0,8	1,1	1,7
1200-1230	1,6	1,0	0,8	1,0	1,1	1,8
	1,7	1,1	0,8	1,1	1,2	1,7
Mittelwert:	1,6	1,1	0,8	1,0	1,1	1,7

Tab. 7.1: Temperaturmessungen an der orthotropen Platte der A42

Datum Uhrzeit	Meßstelle					
	1	2	3	4	5	6
11.02.1993	-	-	-	-	-	-
800-830	-	-	-	-	-	-
Mittelwert:	-	-	-	-	-	-
01.03.1993	-2,4	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1	-2,4
800-830	-2,4	-2,1	-2,1	-2,0	-2,1	-2,2
	-2,2	-1,8	-1,8	-1,8	-1,9	-1,9
Mittelwert:	-2,3	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,2
01.03.1993	0,4	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,5
1000-1030	0,8	0,2	0,2	0,2	0,4	1,0
	1,1	0,5	0,4	0,5	0,6	1,2
Mittelwert:	0,8	0,2	0,2	0,2	0,4	0,9
18.03.1993	-	-	-	-	-	-
800-830	-	-	-	-	-	-
	10,0	9,8	9,6	9,8	10,0	10,2
Mittelwert:	10,0	9,8	9,6	9,8	10,0	10,2
18.03.1993	10,9	10,5	10,3	10,5	10,6	11,1
1000-1030	11,5	10,9	10,6	10,7	11,0	11,7
	11,8	11,0	10,8	10,9	11,3	12,2
Mittelwert:	11,4	10,8	10,6	10,7	11,0	11,7
18.03.1993	12,5	11,6	11,4	11,6	11,9	12,6
1100-1130	12,4	12,1	11,6	11,8	12,2	12,7
	12,4	11,8	11,6	11,8	12,2	12,8
Mittelwert:	12,4	11,8	11,5	11,7	12,1	12,7
19.03.1993	-	-	-	-	-	-
1000-1030	-	-	-	-	-	-
	11,2	9,4	8,8	9,0	9,7	11,9
Mittelwert:	11,2	9,4	8,8	9,0	9,7	11,9
23.04.1993	-	-	-	-	-	-
1100-1130	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Mittelwert:	-	-	-	-	-	-
13.05.1993	15,0	15,3	15,2	15,3	15,4	15,3
800-830	15,1	15,2	15,1	15,2	15,3	15,2
	15,1	15,2	15,1	15,2	15,3	15,3
Mittelwert:	15,1	15,2	15,1	15,2	15,3	15,3

Tab. 7.1: Temperaturmessungen an der orthotropen Platte der A42

Datum Uhrzeit	Meßstelle					
	1	2	3	4	5	6
13.05.1993	15,4	15,3	15,2	15,4	15,4	15,6
900-930	15,6	15,4	15,3	15,4	15,5	15,9
	16,0	15,6	15,4	15,5	15,8	16,4
Mittelwert:	15,7	15,4	15,3	15,4	15,6	16,0
27.05.1993	16,9	16,8	16,5	16,7	16,9	17,1
900-930	17,7	17,0	16,7	16,8	17,2	18,0
	18,1	17,4	16,8	17,1	17,4	18,5
Mittelwert:	17,6	17,1	16,7	16,9	17,2	17,9
27.05.1993	21,3	18,6	18,1	18,4	19,0	21,7
1000-1030	21,9	20,0	19,3	19,6	20,4	22,3
	21,6	20,3	19,8	20,2	20,7	21,9
Mittelwert:	21,6	19,6	19,1	19,4	20,0	22,0
23.06.1993	-	-	-	-	-	-
1000-1030	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Mittelwert:	-	-	-	-	-	-
05.07.1993	30,5	27,7	26,7	27,1	28,3	30,9
1100-1130	29,9	27,6	26,6	27,0	28,2	30,2
	29,5	27,4	26,4	26,9	27,9	29,7
Mittelwert:	30,0	27,6	26,6	27,0	28,1	30,3
23.07.1993	-	-	-	-	-	-
1100-1130	21,9	20,7	20,2	20,5	21,1	22,3
	22,3	20,9	20,4	20,7	21,3	22,8
Mittelwert:	22,1	20,8	20,3	20,6	21,2	22,6

Tab. 7.2: Temperaturmessungen Essen-Bredene, September 1992

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredene			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Sep 92	36	1	10,0	14,9	8,8	13,9	14,3
		2	12,7	16,0	9,0	15,4	
		3	12,7	17,4	11,6	17,2	
		4	9,8	12,4	9,1	10,7	
		5	10,4	13,7	8,9	12,4	
		6	11,5	16,6	5,8	16,1	
	37	7	14,3	18,6	11,0	18,7	19,2
		8	11,9	15,6	8,7	14,8	
		9	13,0	18,0	7,9	17,9	
		10	15,8	20,7	10,4	21,4	
		11	16,3	23,4	13,4	24,9	
		12	12,6	17,6	8,4	17,4	
		13	15,4	19,5	10,2	19,9	
	38	14	12,7	15,4	11,1	14,6	19,1
		15	15,2	19,0	12,4	19,2	
		16	14,2	17,8	12,5	17,7	
		17	14,5	19,7	9,3	20,1	
		18	16,8	21,7	12,3	22,7	
		19	15,4	19,8	13,5	20,2	
		20	15,8	18,2	14,2	18,2	
		21	17,2	22,2	12,2	23,3	
	39	22	19,0	23,4	16,5	24,9	22,0
		23	14,2	17,9	12,8	17,8	
		24	14,0	17,5	9,9	17,3	
		25	15,9	21,7	11,6	22,7	
		26	18,3	24,3	13,5	26,0	
		27	19,6	26,8	15,1	29,2	
		28	18,0	24,8	14,8	26,7	
	40	29	16,0	18,5	13,2	18,6	17,7
		30	14,4	16,6	12,8	16,1	

Tab. 7.3: Temperaturmessungen Essen-Bredeneu, Oktober 1992

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredeneu			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Okt 92	40	1	13,5	16,1	12,8	15,5	
		2	12,0	14,8	10,7	13,8	
		3	12,4	16,2	9,4	15,6	
		4	11,9	14,7	8,6	13,7	
	41	5	7,4	12,2	6,9	10,5	10,2
		6	9,8	10,6	6,9	8,4	
		7	11,0	11,7	10,3	9,8	
		8	10,5	14,4	8,5	13,3	
		9	8,8	11,5	7,9	9,6	
		10	7,5	11,7	4,5	9,8	
		11	8,4	11,5	3,5	9,6	
	42	12	6,0	9,6	4,5	7,1	7,1
		13	4,9	10,5	-0,3	8,3	
		14	7,0	10,2	1,2	7,9	
		15	6,0	9,7	4,1	7,3	
		16	4,8	8,4	3,4	5,6	
		17	5,1	9,2	0,6	6,6	
		18	5,6	9,6	2,0	7,1	
	43	19	7,7	11,7	4,7	9,8	7,1
		20	8,7	12,8	3,6	11,2	
		21	6,2	9,4	5,5	6,9	
		22	6,0	8,8	3,2	6,1	
		23	5,7	7,3	5,0	4,2	
		24	5,0	7,4	3,5	4,3	
		25	6,9	10,1	4,2	7,8	
	44	26	5,4	8,6	3,7	5,8	4,9
		27	6,8	8,0	4,2	5,1	
		28	5,9	8,3	4,9	5,5	
		29	5,2	7,1	4,4	3,9	
		30	5,1	8,8	3,7	6,1	
		31	3,0	6,2	1,6	2,8	

Tab. 7.4: Temperaturmessungen Essen-Bredene, November 1992

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredene			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Nov 92	44	1	3,6	8,3	0,3	5,5	8,3
	45	2	7,0	9,5	1,2	7,0	
		3	7,2	9,6	5,5	7,1	
		4	7,4	10,0	5,2	7,6	
		5	10,2	10,9	7,0	8,8	
		6	10,8	12,0	9,4	10,2	
		7	8,6	11,0	5,7	8,9	
		8	7,2	11,1	5,1	9,1	
	46	9	7,6	8,3	5,0	5,5	5,6
		10	9,2	11,0	8,0	8,9	
		11	8,0	13,2	6,0	11,8	
		12	4,7	7,2	3,8	4,0	
		13	3,6	4,9	2,2	1,1	
		14	3,4	6,1	1,2	2,6	
		15	5,5	6,7	2,6	3,4	
	47	16	7,0	7,7	6,0	4,7	3,5
		17	4,1	7,0	0,9	3,8	
		18	4,4	5,7	3,0	2,1	
		19	5,4	8,1	4,1	5,2	
		20	3,8	6,2	3,1	2,8	
		21	5,3	6,2	2,2	2,8	
		22	12,0	12,2	5,4	10,5	
	48	23	9,4	12,2	8,0	10,5	8,9
		24	9,0	9,6	7,7	7,1	
		25	10,1	11,3	9,0	9,3	
		26	7,8	14,1	7,1	12,9	
		27	6,4	8,3	3,7	5,5	
		28	6,1	10,5	3,8	8,3	
		29	7,0	8,5	2,8	5,7	
	49	30	11,3	13,5	8,0	12,1	7,7

Tab. 7.5: Temperaturmessungen Essen-Bredene, Dezember 1992

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredene			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Dez 92	49	1	7,5	10,9	6,2	8,8	
		2	11,0	12,8	5,5	11,2	
		3	5,9	12,8	4,6	11,2	
		4	2,9	5,6	0,5	2,0	
		5	3,0	4,9	1,6	1,1	
		6	3,8	5,8	2,3	2,2	
	50	7	6,0	7,2	2,5	4,0	1,6
		8	5,4	7,1	4,2	3,9	
		9	2,5	4,2	1,4	0,2	
		10	2,9	3,3	2,5	-1,0	
		11	2,6	3,0	2,0	-1,4	
		12	5,1	6,9	3,0	3,7	
		13	4,7	5,2	3,4	1,5	
	51	14	8,0	8,5	5,2	5,7	5,2
		15	5,7	8,1	3,0	5,2	
		16	7,0	8,7	4,8	6,0	
		17	6,4	7,8	4,6	4,8	
		18	6,0	8,0	4,8	5,1	
		19	7,0	7,6	5,9	4,6	
		20	3,3	6,7	1,6	3,4	
		21	2,5	3,0	1,0	-1,4	
	52	22	3,8	4,6	2,9	0,7	-0,8
		23	4,1	4,7	2,9	0,8	
		24	3,6	5,0	2,5	1,2	
		25	0,8	2,7	0,2	-1,7	
		26	-2,5	0,5	-3,6	-4,6	
		27	-1,6	1,2	-4,9	-3,7	
		28	-2,2	-0,2	-3,9	-5,5	
	53	29	-1,6	3,0	-5,1	-1,4	-1,4
		30	0,6	7,6	-3,6	4,6	
		31	-0,6	3,1	-2,9	-1,2	

Tab. 7.6: Temperaturmessungen Essen-Bredenev, Januar 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredenev			A42		
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel	
Jan 93	53	1	-1,6	3,2	-4,9	-1,1	2,8	
		2	-4,2	1,0	-6,4	-3,9		
		3	-7,8	-5,0	-9,9	-11,6		
	1	4	-4,7	-3,4	-8,4	-9,6		10,5
		5	0,9	3,8	-5,6	-0,3		
		6	7,5	8,6	1,9	5,8		
		7	5,9	9,2	2,4	6,6		
		8	4,8	9,0	2,1	6,4		
		9	7,2	10,2	0,8	7,9		
		10	10,2	11,4	9,0	9,4		
		11	8,7	10,5	7,8	8,3		
	2	12	5,4	7,8	3,8	4,8		7,2
		13	9,4	15,3	2,9	14,5		
		14	5,8	14,3	3,8	13,2		
		15	9,5	12,0	3,4	10,2		
		16	11,6	13,5	9,9	12,1		
		17	9,1	12,2	7,6	10,5		
		18	5,2	8,2	3,4	5,3		
	3	19	6,2	7,2	2,5	4,0		1,6
		20	9,2	10,3	6,7	8,0		
		21	10,4	11,4	8,4	9,4		
		22	8,9	11,5	6,3	9,6		
		23	7,8	9,5	4,8	7,0		
		24	8,6	11,3	7,4	9,3		
		25	2,1	7,4	0,3	4,3		
	4	26	1,4	2,8	-0,8	-1,6		1,6
		27	3,2	4,2	1,5	0,2		
		28	5,2	7,6	1,8	4,6		
		29	2,3	7,6	-0,1	4,6		
		30	0,0	2,2	-1,6	-2,4		
		31	-1,2	2,2	-3,9	-2,4		

Tab. 7.7: Temperaturmessungen Essen-Bredeneu, Februar 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredeneu			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Feb 93	5	1	0,4	6,3	-5,6	2,9	-2,5
		2	0,0	4,7	-2,5	0,8	
		3	-1,0	0,2	-1,6	-5,0	
		4	-1,5	-0,3	-4,4	-5,6	
		5	-1,0	-0,4	-2,4	-5,7	
		6	1,1	2,2	-0,6	-2,4	
		7	4,2	5,0	2,2	1,2	
	6	8	3,8	5,2	3,1	1,5	-0,3
		9	2,0	3,1	1,0	-1,2	
		10	0,6	2,4	-0,5	-2,1	
		11	0,2	4,1	-3,0	0,1	
		12	1,2	6,9	-1,5	3,7	
		13	-1,2	1,2	-3,5	-3,7	
		14	-0,6	4,3	-3,4	0,3	
	7	15	-1,4	-0,9	-2,8	-6,4	0,3
		16	1,8	3,3	-1,5	-1,0	
		17	5,8	6,8	2,1	3,5	
		18	4,3	5,6	3,1	2,0	
		19	4,4	5,8	2,0	2,2	
		20	3,4	5,1	2,3	1,3	
		21	1,1	4,7	0,5	0,8	
	8	22	-0,3	0,8	-1,0	-4,2	-1,9
		23	-1,7	0,6	-3,1	-4,4	
		24	-2,3	1,0	-4,7	-3,9	
		25	0,7	4,2	-4,9	0,2	
		26	2,0	5,0	0,0	1,2	
		27	0,6	3,7	-1,0	-0,5	
		28	-0,4	2,5	-2,8	-2,0	

Tab. 7.8: Temperaturmessungen Essen-Bredene, März 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredene			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Mär 93	9	1	1,0	2,8	-2,7	-1,6	-1,2
		2	1,8	5,7	0,1	2,1	
		3	-1,9	0,8	-2,7	-4,2	
		4	-0,6	1,0	-4,2	-3,9	
		5	1,2	2,4	-0,5	-2,1	
		6	4,9	5,9	1,9	2,4	
		7	5,0	6,9	3,9	3,7	
	10	8	2,6	7,1	-0,1	3,9	10,2
		9	3,8	9,0	-1,3	6,4	
		10	7,8	11,1	2,6	9,1	
		11	8,6	13,1	5,4	11,6	
		12	10,9	15,7	6,4	15,0	
		13	10,7	15,8	6,4	15,1	
		14	12,0	17,0	7,2	16,6	
	11	15	12,4	18,2	8,3	18,2	12,8
		16	10,9	16,3	8,0	15,7	
		17	11,0	14,0	7,2	12,8	
		18	9,7	11,5	8,4	9,6	
		19	5,8	10,8	2,4	8,7	
		20	7,6	13,1	0,4	11,6	
		21	11,4	15,6	5,8	14,8	
	12	22	10,6	13,5	7,5	12,1	6,1
		23	6,4	10,7	4,6	8,5	
		24	4,8	8,7	2,0	6,0	
		25	4,4	7,5	1,0	4,4	
		26	3,9	7,9	1,9	4,9	
		27	1,2	4,6	-1,8	0,7	
		28	1,5	6,4	-2,8	3,0	
	13	29	2,7	7,2	-2,3	4,0	10,2
		30	6,9	11,4	-1,4	9,4	
		31	13,8	17,7	8,1	17,5	

Tab. 7.9: Temperaturmessungen Essen-Bredenev, April 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredenev			A42		
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel	
Apr 93	13	1	12,2	17,7	9,2	17,5	8,6	
		2	6,6	9,2	5,6	6,6		
		3	6,6	8,8	5,0	6,1		
		4	5,5	8,5	3,6	5,7		
	14	5	6,6	10,9	2,0	8,8		
		6	7,0	8,4	5,4	5,6		
		7	6,9	7,8	5,2	4,8		
		8	6,4	9,0	4,0	6,4		
		9	10,1	13,6	3,4	12,3		
		10	10,0	15,0	7,7	14,1		
		11	8,0	10,2	6,1	7,9		
	15	12	7,9	11,3	5,6	9,3		10,2
		13	8,0	10,7	4,2	8,5		
		14	8,9	13,5	5,8	12,1		
		15	9,4	13,5	5,8	12,1		
		16	8,1	12,8	4,7	11,2		
		17	9,1	10,0	7,5	7,6		
		18	10,6	13,4	9,7	12,0		
	16	19	10,1	11,6	8,9	9,7		20,1
		20	15,5	20,6	8,2	21,3		
		21	16,6	22,9	13,9	24,2		
		22	14,8	21,3	10,5	22,2		
		23	15,9	19,5	9,2	19,9		
		24	17,5	22,3	12,2	23,5		
		25	16,9	21,0	13,0	21,8		
	17	26	17,2	21,1	11,8	21,9		25,9
		27	19,4	23,8	12,6	25,4		
		28	20,5	25,5	13,1	27,6		
		29	21,0	25,8	13,3	28,0		
		30	20,5	26,0	14,7	28,2		

Tab. 7.10: Temperaturmessungen Essen-Bredeneu, Mai 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredeneu			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Mai 93		1	16,6	23,2	13,1	24,6	
		2	13,2	18,4	10,9	18,4	
	18	3	10,4	14,0	8,3	12,8	14,5
		4	9,4	13,0	4,7	11,5	
		5	9,7	14,0	3,7	12,8	
		6	9,9	13,5	3,8	12,1	
		7	12,2	16,0	8,7	15,4	
		8	17,0	21,4	10,4	22,3	
		9	16,8	23,0	13,1	24,4	
	19	10	19,2	24,4	12,9	26,2	20,8
		11	20,6	25,5	13,9	27,6	
		12	17,4	22,6	13,5	23,8	
		13	16,1	19,5	14,3	19,9	
		14	10,5	14,6	9,2	13,6	
		15	10,7	14,7	8,9	13,7	
		16	13,2	17,6	5,4	17,4	
	20	17	18,6	23,0	9,3	24,4	22,1
		18	19,0	24,1	17,2	25,8	
		19	16,3	22,7	14,1	24,0	
		20	17,1	23,7	13,0	25,3	
		21	12,5	15,3	11,1	14,5	
		22	14,2	18,6	7,8	18,7	
		23	16,8	21,2	9,7	22,0	
	21	24	20,1	25,7	10,6	27,8	23,1
		25	21,2	26,1	14,8	28,3	
		26	19,2	24,6	12,7	26,4	
		27	16,1	20,3	14,9	20,9	
		28	11,0	14,9	9,7	13,9	
		29	15,7	20,3	9,2	20,9	
		30	15,9	18,8	13,6	19,0	
	22	31	13,5	16,6	10,7	16,1	21,5

Tab. 7.11: Temperaturmessungen Essen-Bredeneu, Juni 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredeneu			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Jun 93	22	1	16,4	20,6	11,2	21,3	
		2	15,8	23,1	14,3	24,5	
		3	14,0	16,7	11,5	16,3	
		4	17,1	21,0	13,0	21,8	
		5	21,8	26,8	14,3	29,2	
		6	21,6	26,9	15,7	29,4	
	23	7	21,0	25,2	14,9	27,2	26,1
		8	20,7	26,5	15,1	28,9	
		9	23,8	28,9	14,8	31,9	
		10	23,0	26,1	19,7	28,3	
		11	18,6	22,1	16,4	23,2	
		12	14,1	17,3	11,8	17,0	
		13	14,8	19,7	10,2	20,1	
	24	14	11,9	14,2	11,0	13,0	17,7
		15	13,8	18,5	10,1	18,6	
		16	12,6	13,5	10,5	12,1	
		17	15,3	19,7	10,8	20,1	
		18	16,6	20,0	12,2	20,5	
		19	17,2	21,0	15,1	21,8	
		20	16,5	20,9	12,6	21,7	
	25	21	16,4	19,8	10,8	20,2	18,8
		22	17,1	22,0	10,3	23,1	
		23	13,6	18,2	11,8	18,2	
		24	13,0	17,7	7,7	17,5	
		25	12,8	16,0	6,6	15,4	
		26	14,8	18,2	9,5	18,2	
		27	16,0	21,6	13,5	22,6	
	26	28	14,8	18,6	10,8	18,7	27,6
		29	19,7	24,4	11,5	26,2	
		30	21,6	26,4	13,3	28,7	

Tab. 7.12: Temperaturmessungen Essen-Bredenev, Juli 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredenev			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Jul 93	26	1	23,2	28,6	14,5	31,6	
		2	22,9	28,6	15,2	31,6	
		3	21,4	26,4	14,3	28,7	
		4	22,5	27,1	16,8	29,6	
	27	5	14,7	22,6	11,6	23,8	22,2
		6	14,6	17,5	8,9	17,3	
		7	15,1	18,6	12,9	18,7	
		8	17,5	21,8	9,9	22,8	
		9	21,1	26,1	13,6	28,3	
		10	15,2	21,5	12,0	22,4	
		11	13,2	19,7	9,5	20,1	
	28	12	12,4	17,1	9,2	16,8	18,7
		13	14,4	18,0	9,4	17,9	
		14	14,8	16,2	11,3	15,6	
		15	15,9	16,4	14,4	15,9	
		16	18,5	22,7	16,0	24,0	
		17	17,5	21,4	15,1	22,3	
		18	16,8	22,1	13,3	23,2	
	29	19	14,6	17,5	13,1	17,3	19,8
		20	14,4	18,2	12,1	18,2	
		21	14,7	18,6	11,6	18,7	
		22	14,8	17,7	10,5	17,5	
		23	17,5	19,9	12,7	20,4	
		24	19,6	24,6	16,3	26,4	
		25	13,3	20,2	11,7	20,8	
	30	26	13,7	18,7	10,6	18,8	20,9
		27	14,3	15,2	12,4	14,3	
		28	16,8	20,6	15,1	21,3	
		29	19,2	24,4	14,9	26,2	
		30	18,3	24,2	15,8	25,9	
		31	15,0	18,7	14,3	18,8	

Tab. 7.13: Temperaturmessungen Essen-Bredeneu, August 1993

Monat/Jahr	KW	Datum	Essen-Bredeneu			A42	
			TM	TMAX	TMIN	Tagesmittel	Wochenmittel
Aug 93	31	1	16,5	21,1	10,7	21,9	23,1
		2	19,2	24,4	14,6	26,2	
		3	19,0	21,5	14,9	22,4	
		4	18,9	22,5	15,3	23,7	
		5	17,0	23,8	14,5	25,4	
		6	14,6	18,8	12,9	19,0	
		7	16,8	21,1	10,0	21,9	
		8	17,8	23,1	15,4	24,5	
	32	9	16,4	19,5	13,4	19,9	21,0
		10	14,2	17,6	12,4	17,4	
		11	16,6	19,2	10,5	19,5	
		12	16,8	21,0	15,0	21,8	
		13	15,2	19,5	11,0	19,9	
		14	20,2	25,4	12,3	27,4	
		15	19,4	22,3	16,4	23,5	
	33	16	18,4	22,2	15,4	23,3	23,3
		17	16,0	19,8	13,7	20,2	
		18	17,4	22,3	10,7	23,5	
		19	17,1	22,0	12,2	23,1	
		20	18,5	22,7	13,0	24,0	
		21	19,0	24,1	15,6	25,8	
		22	12,7	17,6	10,2	17,4	
	34	23	11,6	16,2	8,5	15,6	16,7
		24	12,4	17,4	7,6	17,2	
		25	12,6	16,0	8,3	15,4	
		26	13,6	18,6	10,7	18,7	
		27	12,9	16,7	9,5	16,3	
		28	12,6	17,2	9,2	16,9	
		29	13,4	18,5	6,7	18,6	
	35	30	12,7	15,1	10,6	14,2	14,7
		31	12,9	15,8	11,2	15,1	

Tab. 8.1: Anzahl klassierter Lastspiele

Datum	Uhrzeit		Anzahl Lastspiele
	von	bis	
16.12.92	11:00	11:30	15.201
16.12.92	12:00	12:30	16.667
22.12.92	11:00	11:30	12.796
30.12.92	08:00	08:30	3.341
05.01.93	08:00	08:30	7.229
05.01.93	10:00	10:30	7.771
05.01.93	12:00	12:30	8.974
11.02.93	08:00	08:30	11.792
01.03.93	08:00	08:30	13.790
01.03.93	10:00	10:30	14.695
18.03.93	08:00	08:30	16.937
18.03.93	10:00	10:30	12.868
18.03.93	11:00	11:30	13.134
19.03.93	10:00	10:30	13.829
23.04.93	11:00	11:30	17.480
13.05.93	08:00	08:30	13.004
13.05.93	09:00	09:30	14.181
27.05.93	09:00	09:30	11.343
27.05.93	10:00	10:30	11.890
23.06.93	10:00	10:30	10.073
05.07.93	11:00	11:30	11.571
23.07.93	11:00	11:30	11.364

Tab. 8.2: Pfeilhöhenverteilungen MS2 negativ, Wochenwerte

KW	Datum	KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6	KL7	KL8	KL9	KL10	KL11
51	16.12.92	18.344	8.924	1.001	0	0	0	0	0	0	0	0
52	22.12.92	12.421	1.429	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	30.12.92	10.356	299	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	05.01.93	21.516	1.326	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11.02.93	28.593	2.547	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	01.03.93	35.691	2.857	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	18.03.93	15.431	18.315	4.318	1.439	0	0	0	0	0	0	0
11	19.03.93	16.067	15.466	2.552	0	0	0	0	0	0	0	0
16	23.04.93	148	1.634	3.563	2.077	3.864	7.427	4.454	4.602	3.416	743	743
19	13.05.93	2.748	8.756	3.042	1.336	448	76	0	0	0	0	0
21	27.05.93	1.315	10.228	13.623	5.868	1.889	1.454	647	432	0	0	0
25	23.06.93	0	4.476	11.259	7.361	2.884	1.009	142	142	142	0	0
27	05.07.93	459	1.063	4.259	5.782	1.976	1.976	2.127	610	761	151	459
29	23.07.93	295	2.377	2.525	4.011	4.159	4.602	3.563	2.968	1.634	743	3.121

Tab. 8.3: Pfeilhöhenverteilungen MS3 positiv, Wochenwerte

KW	Datum	KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6	KL7	KL8	KL9	KL10	KL11
51	16.12.92	8.354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	22.12.92	1.429	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	30.12.92	152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	05.01.93	2.291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11.02.93	1.347	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	01.03.93	4.772	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	18.03.93	8.949	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	19.03.93	7.957	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	23.04.93	1.929	0	0	0	0	148	16.040	743	0	0	0
19	13.05.93	4.014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	27.05.93	11.559	144	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	23.06.93	5.627	289	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	05.07.93	5.625	13.534	1.063	0	0	0	0	0	0	0	0
29	23.07.93	8.170	1.186	0	0	0	0	0	0	148	148	295

Tab. 8.4: Pfeilhöhenverteilungen MS4 negativ, Wochenwerte

KW	Datum	KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6	KL7	KL8	KL9	KL10	KL11
51	16.12.92	23.273	7.852	71	0	0	0	0	0	0	0	0
52	22.12.92	24.415	3.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	30.12.92	5.706	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	05.01.93	13.299	92	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11.02.93	22.756	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	01.03.93	27.902	627	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	18.03.93	15.939	9.227	571	0	0	0	0	0	0	0	0
11	19.03.93	17.865	9.608	301	0	0	0	0	0	0	0	0
16	23.04.93	448	24.057	5.645	1.929	891	0	0	0	0	0	0
19	13.05.93	8.994	12.311	2.808	220	0	0	0	0	0	0	0
21	27.05.93	2.345	10.325	3.982	720	288	0	0	0	0	0	0
25	23.06.93	720	8.659	4.329	1.009	0	0	0	0	0	0	0
27	05.07.93	302	6.997	7.148	6.694	3.498	1.215	151	0	0	0	0
29	23.07.93	743	9.356	5.941	1.634	448	0	0	148	0	0	0

Tab. 8.5: Prozentuale Pfeilhöhenverteilungen MS2 negativ, Wochenwerte

KW	Datum	KL 1	KL 2	KL 3	KL 4	KL 5	KL 6	KL 7	KL 8	KL 9	KL10	KL11
51	16.12.92	4,82	2,35	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
52	22.12.92	3,26	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
53	30.12.92	2,72	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	05.01.93	5,66	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	11.02.93	7,52	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	01.03.93	9,38	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	18.03.93	4,06	4,81	1,13	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	19.03.93	4,22	4,07	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	23.04.93	0,04	0,43	0,94	0,55	1,02	1,95	1,17	1,21	0,90	0,20	0,20
19	13.05.93	0,72	2,30	0,80	0,35	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	27.05.93	0,35	2,69	3,58	1,54	0,50	0,38	0,17	0,11	0,00	0,00	0,00
25	23.06.93	0,00	1,18	2,96	1,93	0,76	0,27	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00
27	05.07.93	0,12	0,28	1,12	1,52	0,52	0,52	0,56	0,16	0,20	0,04	0,12
29	23.07.93	0,08	0,62	0,66	1,05	1,09	1,21	0,94	0,78	0,43	0,20	0,82
%-Anteil:		42,94	20,95	12,13	7,33	4,00	4,35	2,87	2,30	1,56	0,43	1,14
%-Summe:		42,94	63,89	76,02	83,35	87,35	91,69	94,57	96,87	98,43	98,86	100,00

Tab. 8.6: Prozentuale Pfeilhöhenverteilungen MS3 positiv, Wochenwerte

KW	Datum	KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6	KL7	KL8	KL9	KL10	KL11
51	16.12.92	7,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
52	22.12.92	1,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
53	30.12.92	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	05.01.93	2,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	11.02.93	1,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	01.03.93	4,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	18.03.93	8,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	19.03.93	7,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	23.04.93	1,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	15,14	0,70	0,00	0,00	0,00
19	13.05.93	3,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	27.05.93	10,91	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	23.06.93	5,31	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	05.07.93	5,31	12,78	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	23.07.93	7,71	1,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,14	0,28
%-Anteil:		68,15	14,31	1,00	0,00	0,00	0,14	15,14	0,70	0,14	0,14	0,28
%-Summe:		68,15	82,45	83,46	83,46	83,46	83,60	98,74	99,44	99,58	99,72	100,00

Tab. 8.7: Prozentuale Pfeilhöhenverteilungen MS4 negativ, Wochenwerte

KW	Datum	KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6	KL7	KL8	KL9	KL10	KL11
51	16.12.92	7,35	2,48	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
52	22.12.92	7,72	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
53	30.12.92	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	05.01.93	4,20	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	11.02.93	7,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	01.03.93	8,82	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	18.03.93	5,04	2,92	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	19.03.93	5,65	3,04	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	23.04.93	0,14	7,60	1,78	0,61	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	13.05.93	2,84	3,89	0,89	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	27.05.93	0,74	3,26	1,26	0,23	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	23.06.93	0,23	2,74	1,37	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	05.07.93	0,10	2,21	2,26	2,12	1,11	0,38	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
29	23.07.93	0,23	2,96	1,88	0,52	0,14	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00
%-Anteil:		52,05	32,27	9,73	3,86	1,62	0,38	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
%-Summe:		52,05	84,31	94,04	97,90	99,52	99,91	99,95	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. 8.8: Ergebnisse der Regressionsrechnungen zur Temperaturabhängigkeit der Pfeilhöhen

Meßstelle	R	R ²	SigF	Regressionsgerade	
				Steigung	Konstante
MS2	0,89	0,79	0	0,00148	0,00773
-	0,95	0,90	0	-0,11925	-0,06878
MS3	0,92	0,84	0	0,00212	0,00557
-	0,95	0,90	0	-0,00266	-0,03518
MS4	0,77	0,60	0,0001	0,00093	0,00821
-	0,93	0,87	0	-0,00615	-0,05559

Tab. 9.1: Modul $|E|$ für Gußasphalt 0/11 mmModul $|E|$ [MN/m²]

f [Hz]	T [°C]						
	-20	-10	0	10	20	30	40
2	29.422	25.052	17.821	10.541	4.309	1.306	408
4	29.550	25.706	18.894	11.742	5.329	1.772	539
6	29.809	26.098	19.593	12.509	6.018	2.332	652
8	29.943	26.503	19.995	13.008	6.473	2.425	740
10	30.080	26.714	20.354	13.418	6.829	2.679	822
20	30.533	27.296	21.349	14.691	8.147	3.580	1.154
40	30.893	28.067	22.389	15.974	9.552	4.662	1.646
60	30.867	28.331	22.905	16.710	10.387	5.360	2.011
80	30.873	28.528	23.148	17.196	10.938	5.879	2.325
100	30.803	28.466	23.413	17.507	11.337	6.278	2.601
120	30.689	28.401	23.276	17.716	11.669	6.524	2.841

Tab. 9.2: Modul E_{eff} für Gußasphalt 0/11 mmModul E_{eff} [MN/m²]

v [km/h]	d [ms]	T [°C]						
		-20	-10	0	10	20	30	40
12	166,7	29.422	25.052	17.821	10.541	4.309	1.306	408
24	83,3	29.550	25.706	18.894	11.742	5.329	1.772	539
36	55,6	29.809	26.098	19.593	12.509	6.018	2.332	652
48	41,7	29.943	26.503	19.995	13.008	6.473	2.425	740
60	33,3	30.080	26.714	20.354	13.418	6.829	2.679	822
70	28,5	30.157	26.813	20.523	13.634	7.053	2.832	879
80	25,0	30.231	26.908	20.686	13.842	7.269	2.980	933
90	22,2	30.307	27.005	20.851	14.054	7.488	3.130	988

Tab. 9.3: Modul $|E|$ für Oktaphalt 0/5 mmModul $|E|$ [MN/m²]

f [Hz]	T [°C]						
	-20	-10	0	10	20	30	40
2	19.044	15.054	9.611	6.179	1.856	492	174
4	19.297	15.602	10.443	7.046	2.430	707	230
6	19.506	15.936	10.941	7.557	2.816	877	279
8	19.630	16.183	11.296	7.927	3.121	1.005	317
10	19.743	16.393	11.573	8.216	3.363	1.143	347
20	19.997	16.921	12.405	9.135	4.171	1.592	475
40	20.256	17.369	13.254	10.100	5.099	2.191	686
60	20.353	17.701	13.696	10.645	5.675	2.617	913
80	20.456	17.918	14.019	11.054	6.130	2.950	1.197
100	20.462	18.066	14.340	11.417	6.531	3.331	1.586
120	20.695	18.132	14.502	11.627	6.802	3.628	1.956

Tab. 9.4: Modul E_{eff} für Oktaphalt 0/5 mmModul E_{eff} [MN/m²]

v [km/h]	d [ms]	T [°C]						
		-20	-10	0	10	20	30	40
12	166,7	19.044	15.054	9.611	6.179	1.856	492	174
24	83,3	19.297	15.602	10.443	7.046	2.430	707	230
36	55,6	19.506	15.936	10.941	7.557	2.816	877	279
48	41,7	19.630	16.183	11.296	7.927	3.121	1.005	317
60	33,3	19.743	16.393	11.573	8.216	3.363	1.143	347
70	28,5	19.786	16.482	11.715	8.373	3.500	1.219	369
80	25,0	19.827	16.569	11.851	8.523	3.632	1.293	390
90	22,2	19.870	16.657	11.989	8.676	3.767	1.368	411

Tab. 9.5: Meßprotokoll, Probekörper 1

Meßprotokoll 1

Dauerschwellbiegeprüfung

Auswertung zu einem Zeitquerschnitt

Datum : 27.08.1993
 Meßort : BAST, Bergisch Gladbach, Halle 8
 Belastungseinrichtung : Hydropulsanlage Schenck 400 kN
 Temperatur : 19.9 °C an der Seite des Probekörpers

Versuchsprobekörper

Nummer : 1
 Maße (Stahlplatte) : L:700, B:200, H:12
 Oktahaftmasse : 0/0 = 0,6 mm
 Oktaphalt : 0/5 = 10 mm
 Asphalt : Gußasphalt-Schutzschicht = 35 mm
 : Gußasphalt-Deckschicht = 35 mm

Meßpunkte

induktive Wegaufnehmer: L1.1; L2.2; L1.3; L2.4
 Dehnungsmeßstreifen : jeweils auf der Oberkante von:
 Stahlplatte; Oktaphaltschicht;
 Schutzschicht; Deckschicht.

Kalibrierwerte

Weg (ind. Wegaufnehmer): 1 mm = 10,00 V
 Belastung (Druckmeßdose): 50 kN = 10,00 V
 Dehnung (DMS)
 Stahlplatte : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 4,00 V
 Oktaphaltschicht : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 4,00 V
 Schutzschicht : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 4,00 V
 Deckschicht : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 2,00 V

Parameter Hydropulsanlage Schenck 400 kN

Belastungsfrequenz : 2 Hz Sinus
 Vorlast : 3,5 kN
 Amplitude : 11,4 kN
 Mittelwert : 14,9 kN
 Endlast : 26,3 kN

Tab. 9.6: Verschiebungen über dem Belastungssteg L2; Probekörper 1

Kanal	Ort	Verschiebung	
		Grundlast [mm]	Oberlast [mm]
CH00	L1.1	-0,197	-0,221
CH01	L2.2	-0,435	-0,170
CH02	L1.3	-0,532	-0,172
CH03	L2.4	-0,239	-0,081

Tab. 9.7: Dehnungen über dem Belastungssteg L2; Probekörper 1

Kanal	Ort	Dehnung	
		Grundlast [10 ⁻⁶ m/m]	Oberlast [10 ⁻⁶ m/m]
CH04	Stahlplatte	-115,35	-79,35
CH05	Mastixschicht	107,42	196,53
CH06	Schutzschicht	33,56	-68,36
CH07	Deckschicht	-345,46	-362,55

Tab. 9.8: Meßprotokoll, Probekörper 2

Meßprotokoll 2

Dauerschwellbiegeprüfung

Auswertung zu einem Zeitquerschnitt

Datum : 06.01.94
 Meßort : BAST, Bergisch Gladbach, Halle 8
 Belastungseinrichtung : Hydropulsanlage Schenck 400 kN
 Temperatur : 19.9 °C an der Seite des Probekörpers

Versuchsprobekörper

Nummer : 2
 Maße : L:700, B:200, H:12
 Oktahaftmasse : 0/0 = 0,6 mm
 Oktaphalt : 0/5 = 10 mm
 Asphalt : Gußasphalt-Schutzschicht = 35 mm
 : Gußasphalt-Deckschicht = 35 mm

Meßpunkte

induktive Wegaufnehmer: L1.1; L2.2; L1.3; L2.4
 Dehnungsmeßstreifen : jeweils auf der Oberseite von:
 Stahlplatte; Oktaphaltschicht;
 Schutzschicht; Deckschicht.

Kalibrierwerte

Weg (ind. Wegaufnehmer): 1 mm = 10,00 V
 Belastung (Druckmeßdose): 50 kN = 10,00 V
 Dehnung (DMS)
 Stahlplatte : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 10,00 V
 Oktaphaltschicht : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 10,00 V
 Schutzschicht : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 10,00 V
 Deckschicht : 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ = 4,00 V

Parameter Hydropulsanlage Schenck 400 kN

Belastungsfrequenz : 2 Hz Sinus
 Vorlast : 2,9 kN
 Amplitude : 12,4 kN
 Mittelwert : 15,3 kN
 Endlast : 27,7 kN

Tab. 9.9: Verschiebungen über dem Belastungssteg L2; Probekörper 2

Kanal	Ort	Verschiebung	
		Grundlast [mm]	Oberlast [mm]
CH00	L1.1	-0,409	-0,264
CH01	L2.2	-0,453	-0,173
CH02	L1.3	-0,302	-0,282
CH03	L2.4	-0,057	-0,120

Tab. 9.10: Dehnungen über dem Belastungssteg L2; Probekörper 2

Kanal	Ort	Dehnung	
		Grundlast [10 ⁻⁶ m/m]	Oberlast [10 ⁻⁶ m/m]
CH08	Stahlplatte	-109,38	-94,24
CH09	Oktaphaltschicht	381,84	294,95
CH10	Schutzschicht	-89,36	-69,34
CH11	Deckschicht	-617,66	-406,49

Tab. 9.11: Dehnungen über dem Rollenlager R2; Probekörper 2

Kanal	Ort	Dehnung	
		Grundlast [10 ⁻⁶ m/m]	Oberlast [10 ⁻⁶ m/m]
CH04	Stahlplatte	187,99	170,41
CH05	Oktaphaltschicht	-385,4	-288,57
CH06	Schutzschicht	53,22	121,09
CH07	Deckschicht	667,72	617,68

Anhang 2

Abbildungen

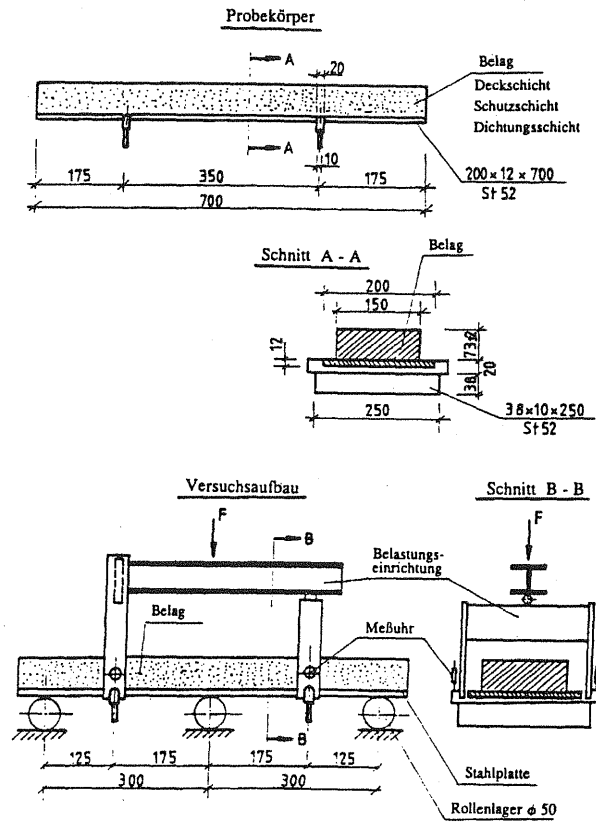


Abb. 2.1: Prüfanordnung Dauerschwellbiegeprüfung

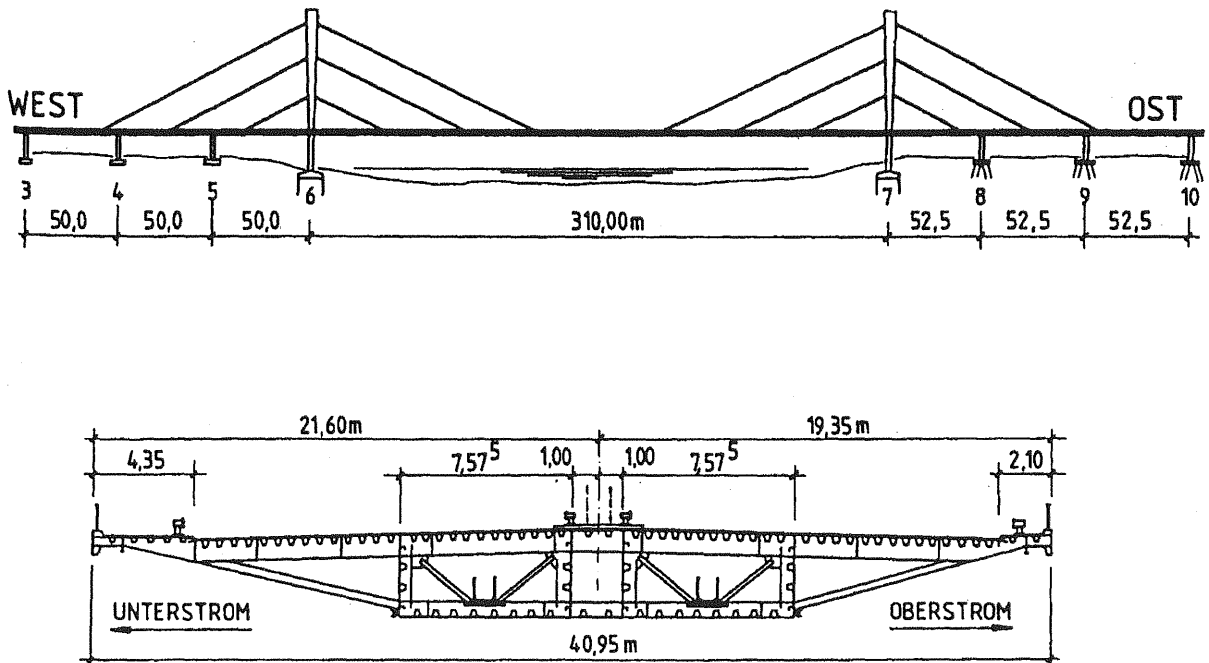


Abb. 3.1: Bauwerksübersicht Rheinbrücke A42, Emscherschnellweg

© Niederlassung
 Albert-Hahn-Strasse 5-7
 Postfach 23 01 46
 D-4100 Duisburg 29
 Telefon (02 03) 76 85 0

Telefax 8 55 708
 Telefax (02 03) 76 85 232
 Drahtwort DEUTAG Duisburg

Zentrallaboratorium



Eignungsprüfung 7105 00 01782 vom

15.9.1989

Artikel Gussasphalt 0/11 mm S
 Maschinenwerk Thyssen
 Erbaufirma Strabag Bau AG
 Baumaßnahme A 42 Rheinbrücke, Duisburg-Baerl
 Bauklasse II, techn. Regelwerk III
 Auftraggeber RABAG Essen
 Verwendungszweck Deckschicht

Artikel-Nr. 7105
 ARK/Werk 0407

Grundlagen

Beauftragter Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, TL Min-SiB 83
 DIN 1965, 1966

Bindemittel

Erweichungspunkt Ring und Kugel

B 1 Oxesolit H 45

57 °C

Bezeichnung	Lieferkörnung	Gewinnungszentrale / Hersteller		M-%	RG Min-Nr.
Mineralstoffe					
M 1 Basalt	Edeleplith 6/11 mm	Wilmmeroth	Basalt Union	19,8	
M 2 Basalt	Edeleplith 5/8 mm	Wilmmeroth	Basalt Union	12,3	
M 3 Mordax "Alpin"	Edeleplith 2/5 mm	Oberthaus	ÖH.U.	18,0	
M 4 Basalt	Edeleplith 0/2 mm	Wilmmeroth	Basalt Union	14,0	
M 5 Natursand	Natursand 0/2 mm	Appeldorn	Loock	12,9	
M 6 Kalkstein	Füller	Domag	R.W.-K.	23,0	

Rohdichte des Mineralstoffgemisches: 2,822 g/cm³

Siebanalyse der Lieferkörnungen / Mineralstoffanteile sonstiger Einsatzstoffe

mm	Siebstand (Masse-%)					
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6
31,5	-	-	-	-	-	-
22,4	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-
11,2	6,3	-	-	-	-	-
8	88,8	1,5	-	-	-	-
5	4,9	80,8	9,7	-	-	-
2	-	8,7	85,0	2,7	8,0	-
0,71	-	-	4,7	28,9	30,9	-
0,25	-	-	0,6	39,6	33,8	-
0,09	-	-	-	15,6	25,8	6,4
<0,09	-	-	-	13,2	4,4	93,6
Über- sirn	6,3	1,5	9,7	2,7	8,0	6,4
Soil- sirn	88,8	89,8	85,0	97,3	92,0	93,6
Unter- sirn	4,9	8,7	5,3	0,0	0,0	0,0

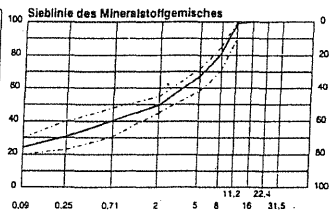
© Niederlassung
 Albert-Hahn-Strasse 5-7
 Postfach 23 01 46
 D-4100 Duisburg 29
 Telefon (02 03) 76 85 0

Telefax 8 55 708
 Telefax (02 03) 76 85 232
 Drahtwort DEUTAG Duisburg

Zentrallaboratorium



mm	Rückstand Masse-%	Durchgang Masse-%	Anteil Masse-%
31,5	0,0	100,0	Splitt (Fines) 50,6
22,4	0,0	100,0	
16	0,0	100,0	Sand 25,5
11,2	1,2	98,8	
8	17,8	81,0	Füller 23,9
5	13,8	87,2	
2	17,8	82,2	
0,71	6,9	93,1	
0,25	9,6	90,4	
0,09	7,0	93,0	
<0,09	23,9	76,1	



Die Summen-Siebanalyse gilt für die Mischgutzusammensetzungen A, B und C.

Prüfergebnisse der Eignungsprüfung	Mischgutzusammensetzung			
	A	B	C	
Bindemittelanteil und -eigenschaft				
Anteil Oxesolit H 45	Masse-%	6,50	7,00	7,50
Erweichungspunkt Ring und Kugel des resultierenden Bindemittels	°C	57,0	57,0	57,0
Bindemittelgehalt gesamt	Masse-%	6,5	7,0	7,5
Bindemittelgehalt gesamt	Masse-Teile	6,95	7,53	8,11
Mischguteigenschaften				
Mischgutrordichte	g/cm ³	2,536	2,517	2,497
Raumdicke Probewürfel	g/cm ²	2,522	2,509	2,492
Mineralstoffanteil	Vol.-%	83,6	82,7	81,7
Bindemittelanteil	Vol.-%	15,9	17,0	18,1
Eindringtiefe 40 °C 5 cm ³ 0,5 h	mm	1,3	2,5	4,8
Eindringtiefe 40 °C 5 cm ³ 1,0 h	mm	1,5	2,9	5,7
Zunahme der Eindringtiefe	mm	0,2	0,4	0,9

Beurteilung

Für die Bauausführung wird die Mischgutzusammensetzung B vorgeschlagen.

Prüfstellenleiter

Sachbearbeiter

Auftragnehmer

gez. Barth



Abb. 3.2: Eignungsprüfung Gußasphalt 0/11 mm

© Niederlassung
Teererkamp 43
Postfach 1203
D-4770 Soest
Telefon (02921) 88110

Telefon (02921) 83149
Telefax 84349
Druckwerk DEUTAG Soest



DEUTAG
Asphalttechnik GmbH

Zentrallaboratorium

Nach RAP-Stra für Eignungsprüfungen an bituminösen Baustoffgemischen anerkannt

TEERBAU
Ges. für Straßenbau mbH
Postfach 880
4250 Bottrop

Eignungsprüfung 6889 00 01929 vom 11.5.90

11.5.1990

Artikel **Oktaphalt 0/5 mm**
Mischwerk DGA Dorstfeld
Einbaufirma AGE Strabag/Teerbau
Baumaßnahme Rheinbrücke Emcherschnelweg BAB A 42
Auftraggeber RABA Essen

Artikel-Nr. 6889
ARK/Werk 9020

Bezeichnung	Lieferkörnung	Gewinnungsstätte / Hersteller	M.-%	RQ Min-Nr.
Mineralstoffe				
M 1 Diabas	Eiselsplitt 2/5 mm	Remblinghausen	Cronenb.St.ind.	28,0
M 2 Diabas	Edelbrechsand 0/2 mm	Remblinghausen	Cronenb.St.ind.	45,0
M 3 Kalkstein	Füller	Hönnetal	RWK	27,0

Siabanalyse der Lieferkörnungen / Mineralstoffanteile sonstiger Einsatzstoffe

mm	Siebückstand (Masse-%)									
	M 1	M 2	M 3							
31,5	-	-	-							
22,4	-	-	-							
18	-	-	-							
11,2	-	-	-							
8	-	-	-							
5	2,8	-	-							
2	98,3	9,9	-							
0,75	0,6	43,5	-							
0,25	0,3	29,8	-							
0,09	-	11,8	6,4							
<0,09	-	5,2	93,6							
Überkorn	2,8	9,9	6,4							
Bollkorn	98,3	90,1	93,6							
Unterkorn	0,0	0,0	0,0							

Abb. 3.3: Eignungsprüfung Oktaphalt 0/5 mm

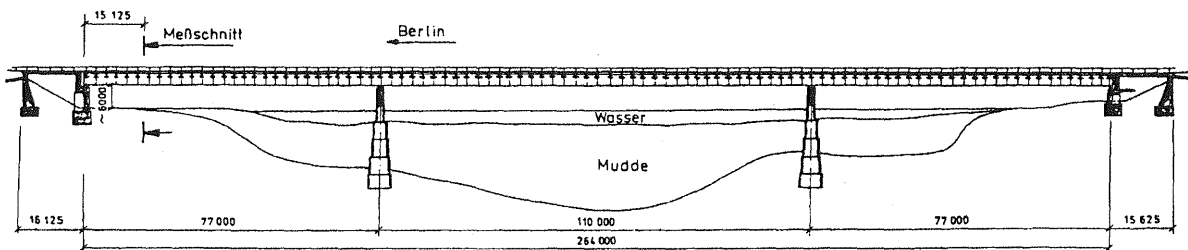


Abb. 3.4: Bauwerksübersicht Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

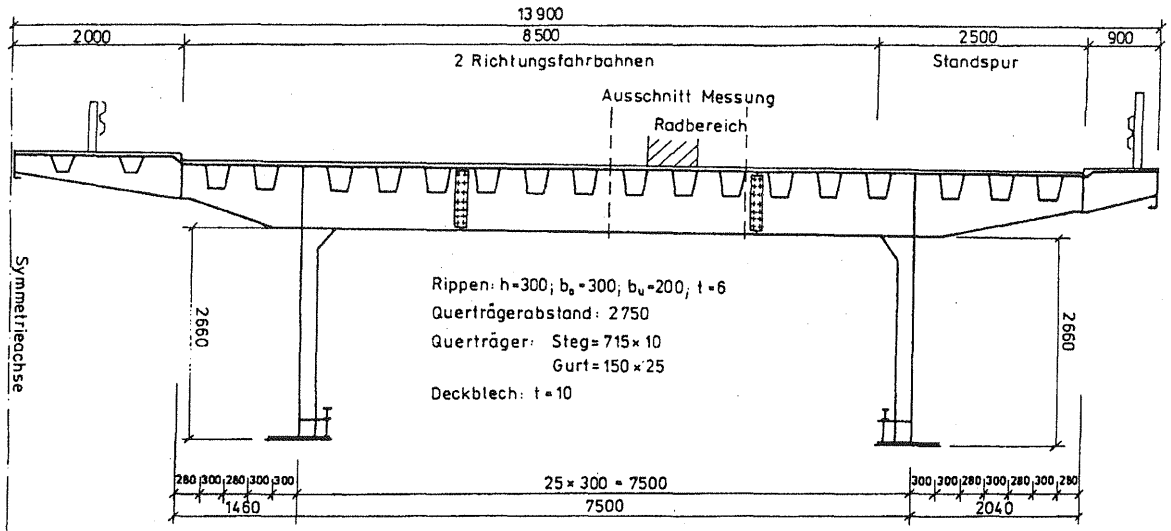


Abb. 3.5: Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19, Meßquerschnitt

Rheinbrücke Emscherschnellweg im Zuge der BAB A42

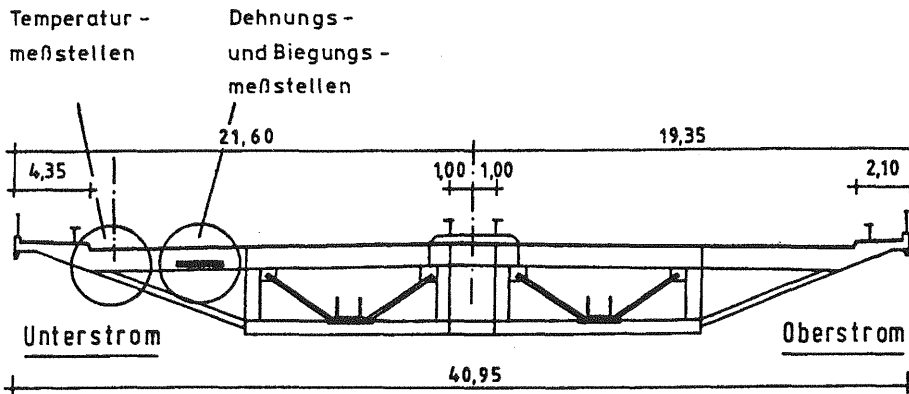
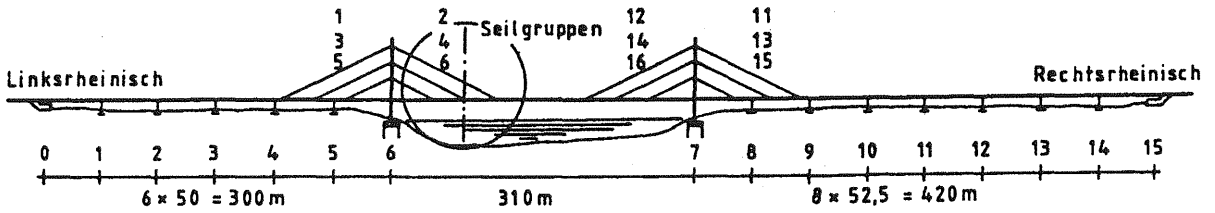


Abb. 4.1: Meßstellenübersicht Rheinbrücke A42

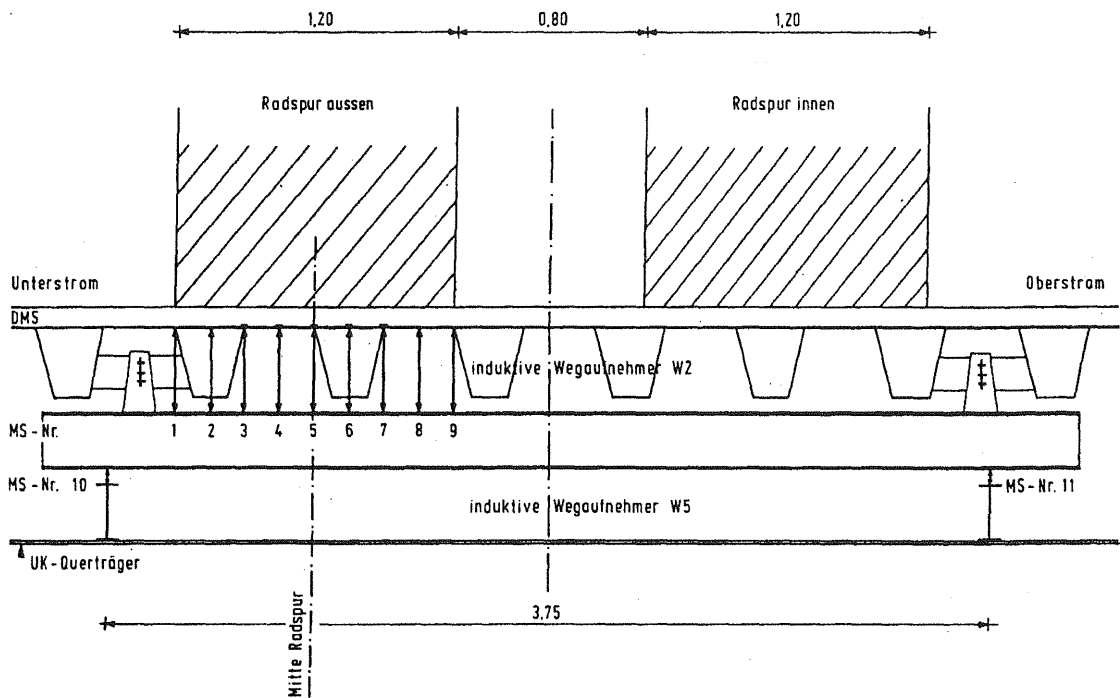


Abb. 4.2: Meßstellenübersicht Durchbiegungsmessungen Rheinbrücke der A42

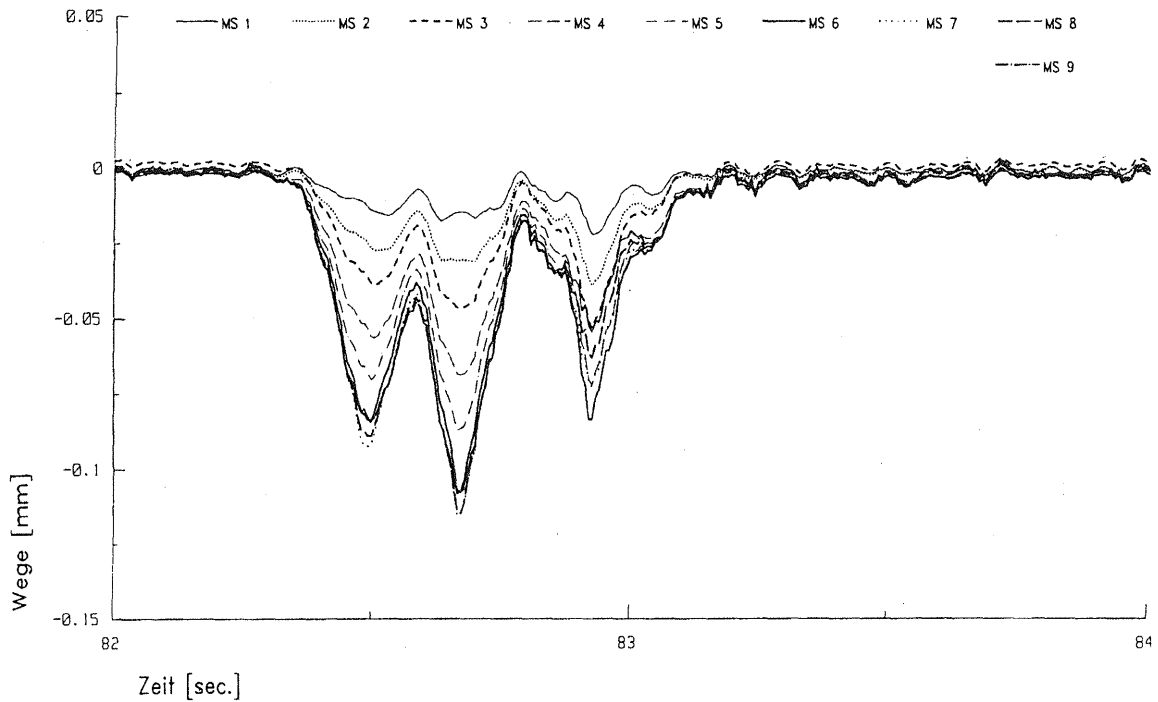


Abb. 4.3: Durchbiegungsmessungen unter Verkehr, 1.3.1993

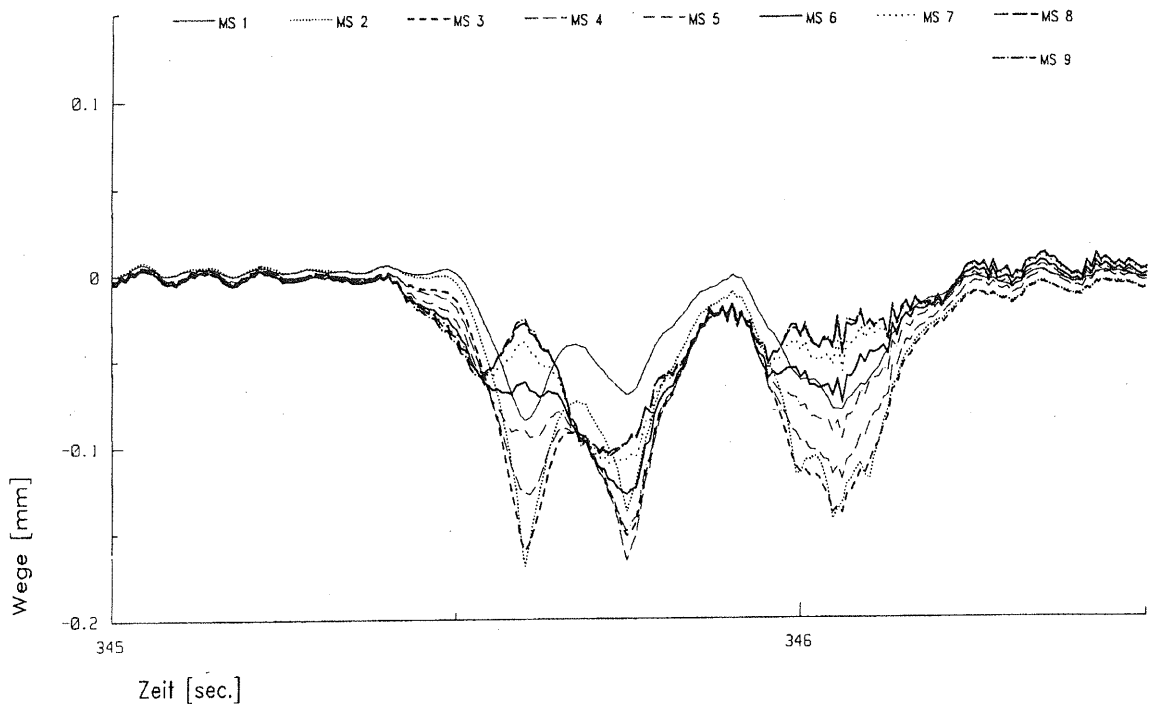


Abb. 4.4: Durchbiegungsmessungen unter Verkehr, 18.3.1993

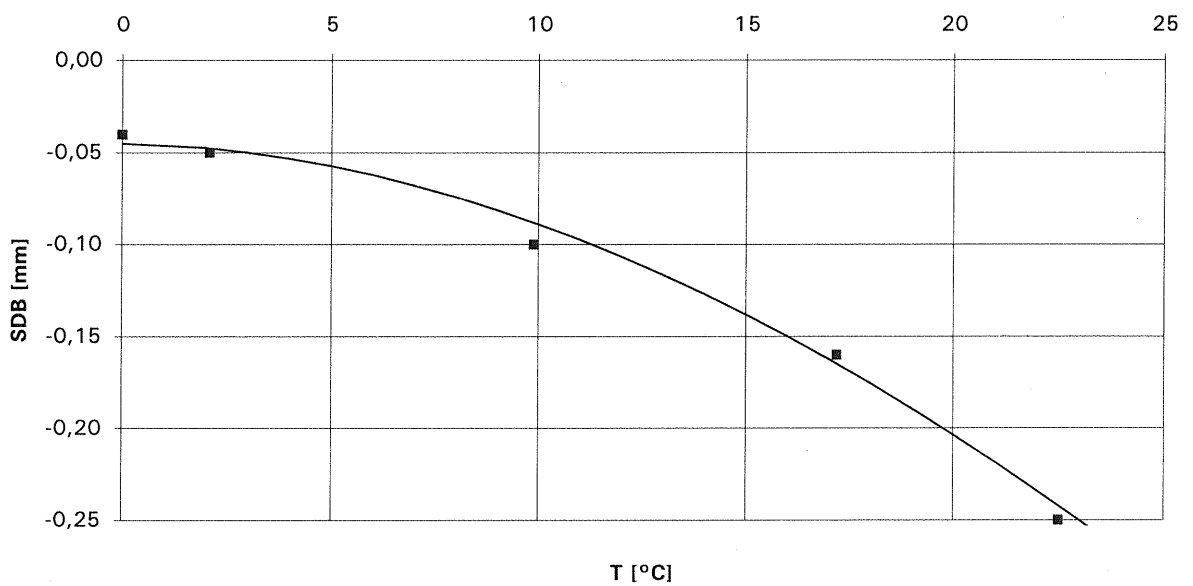


Abb. 4.5: Schwellwert der Felddurchbiegung als Funktion der Temperatur

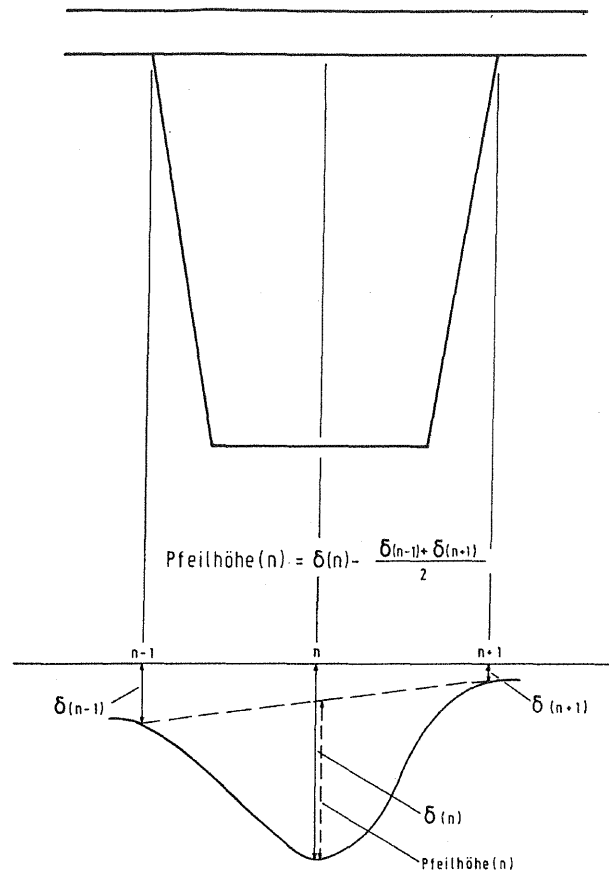


Abb. 4.6: Berechnung der Pfeilhöhen aus gemessenen Durchbiegungen

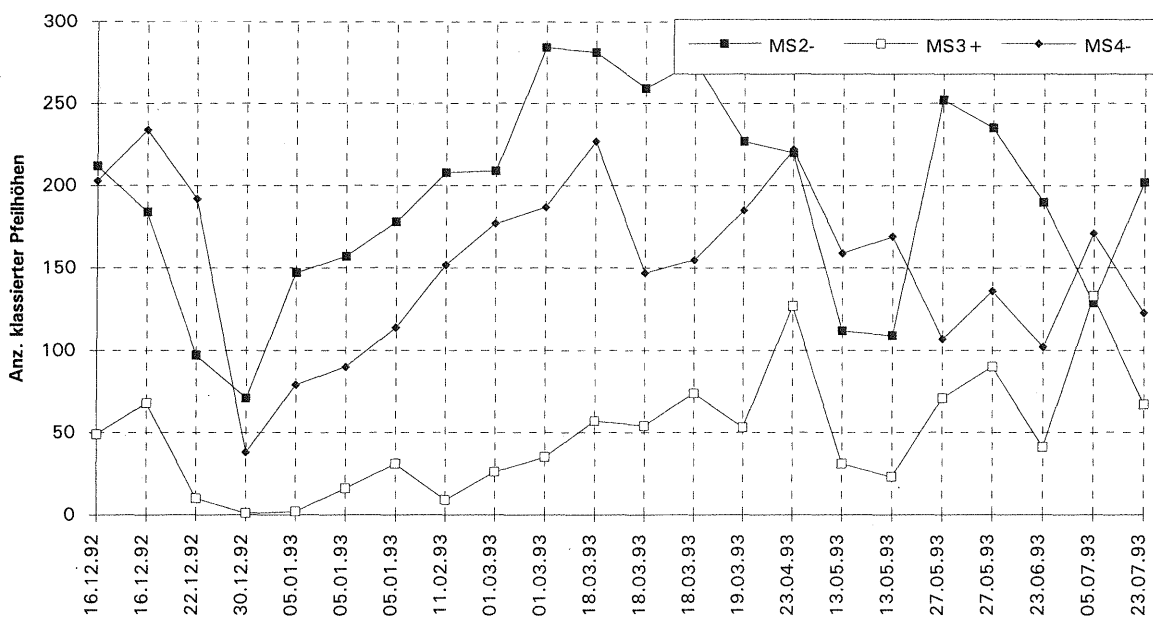


Abb. 4.7: Anzahl klassierter Pfeilhöhen

Abb. 4.9: Spurvorteilung klassierter Pfeilhöhen

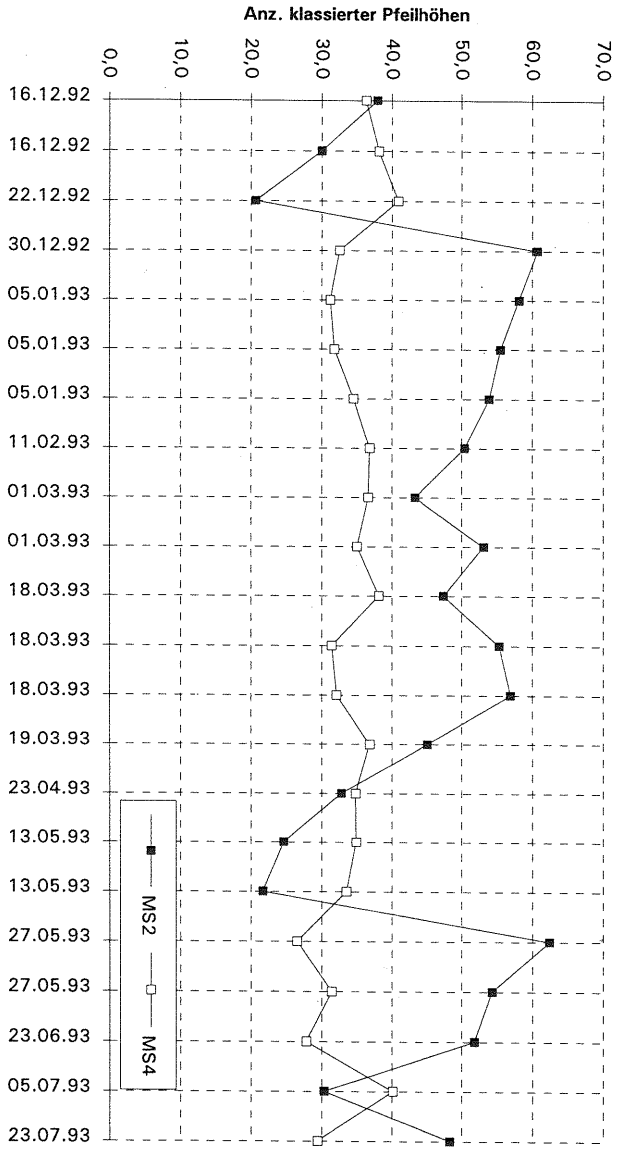
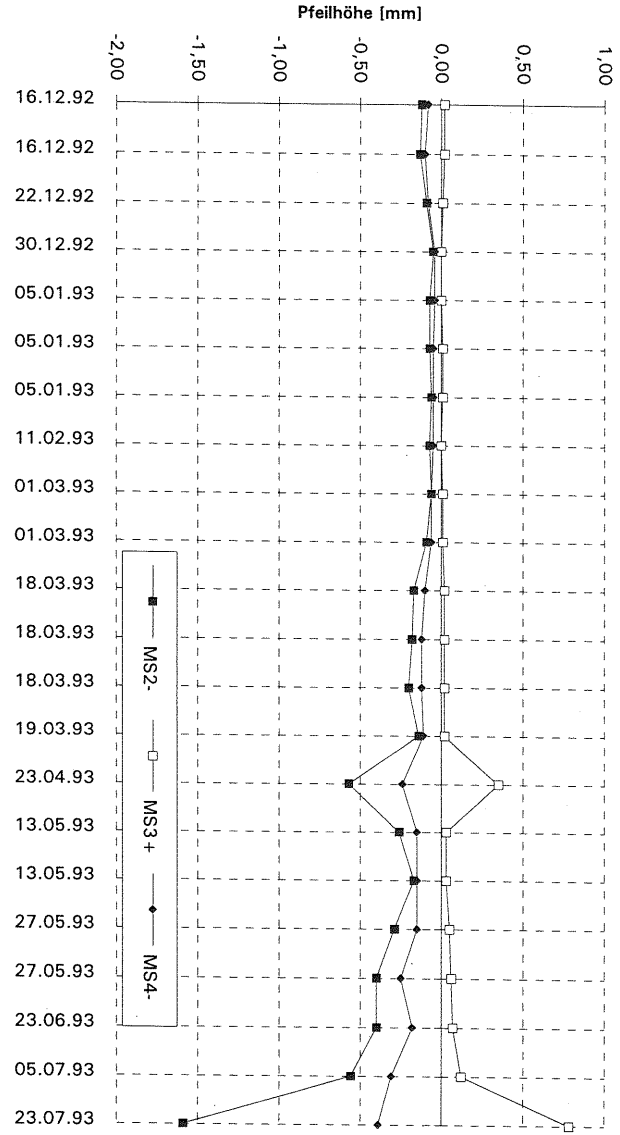


Abb. 4.8: Extremwerte klassierter Pfeilhöhen



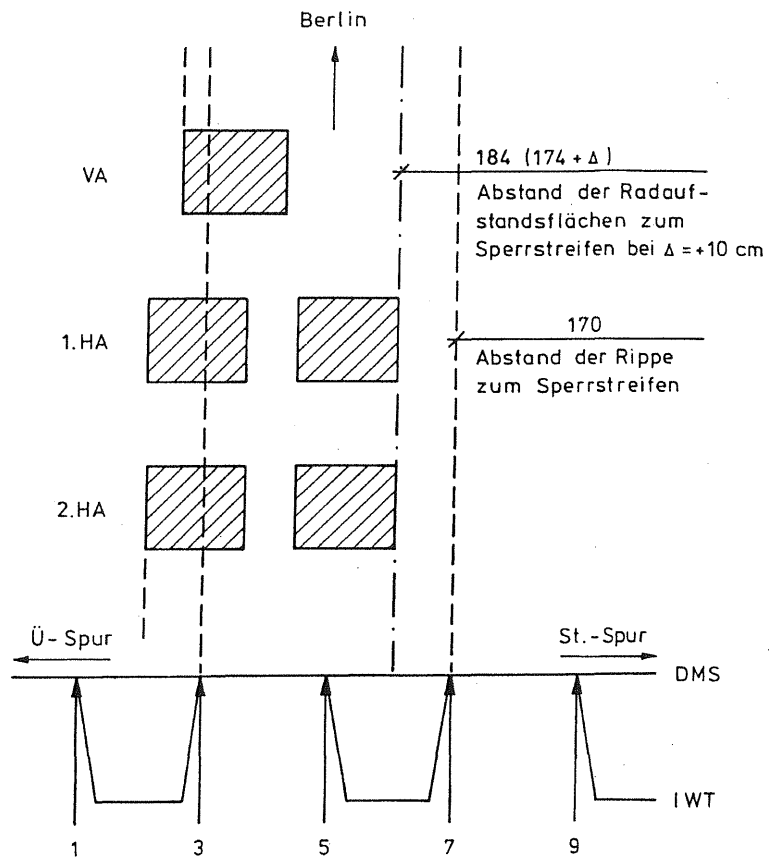


Abb. 4.12: Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19, Spurlage der Radlasten

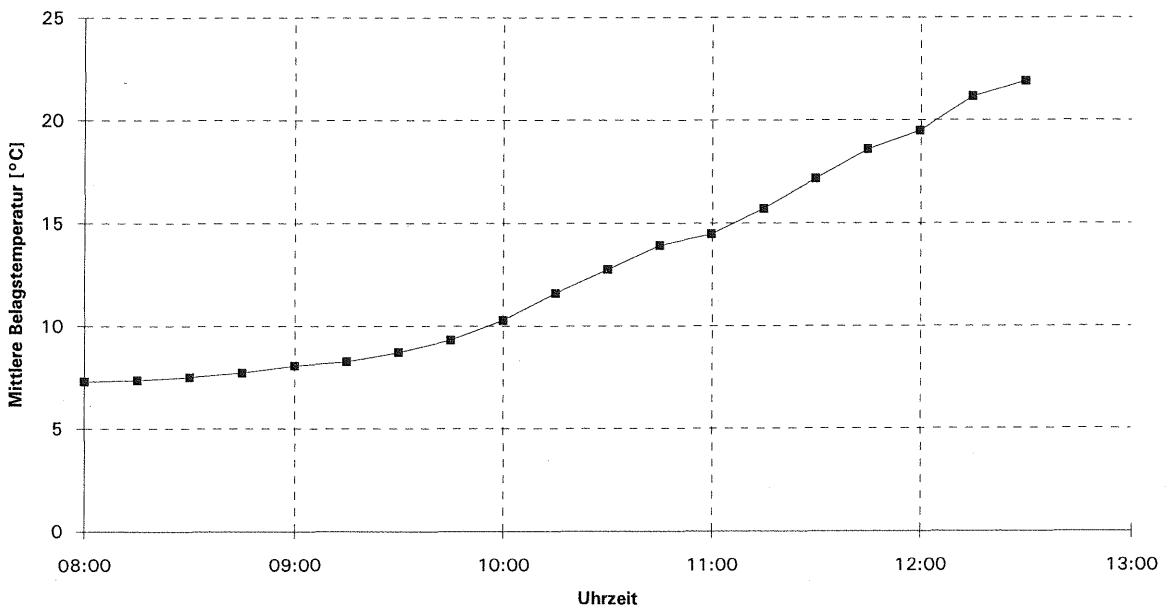


Abb. 4.13: Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19, Temperaturen während der Messungen

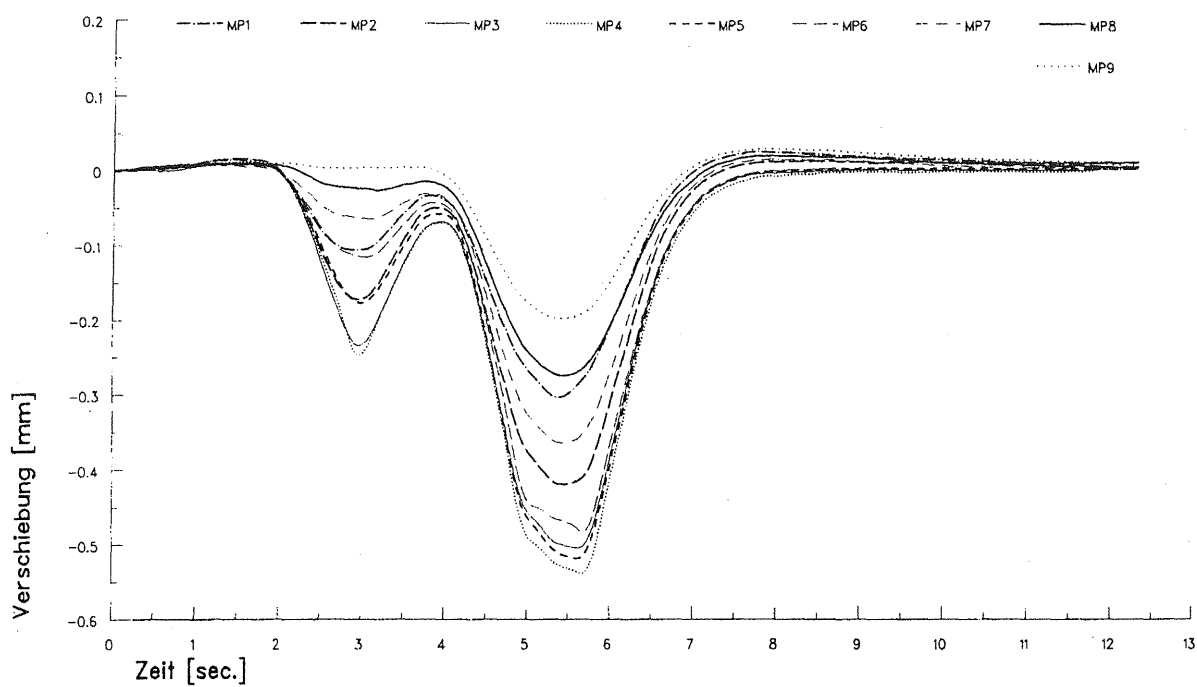


Abb. 4.14: Gemessene Durchbiegungen, Petersdorf, $v = 5$ km/h, Überfahrt 4

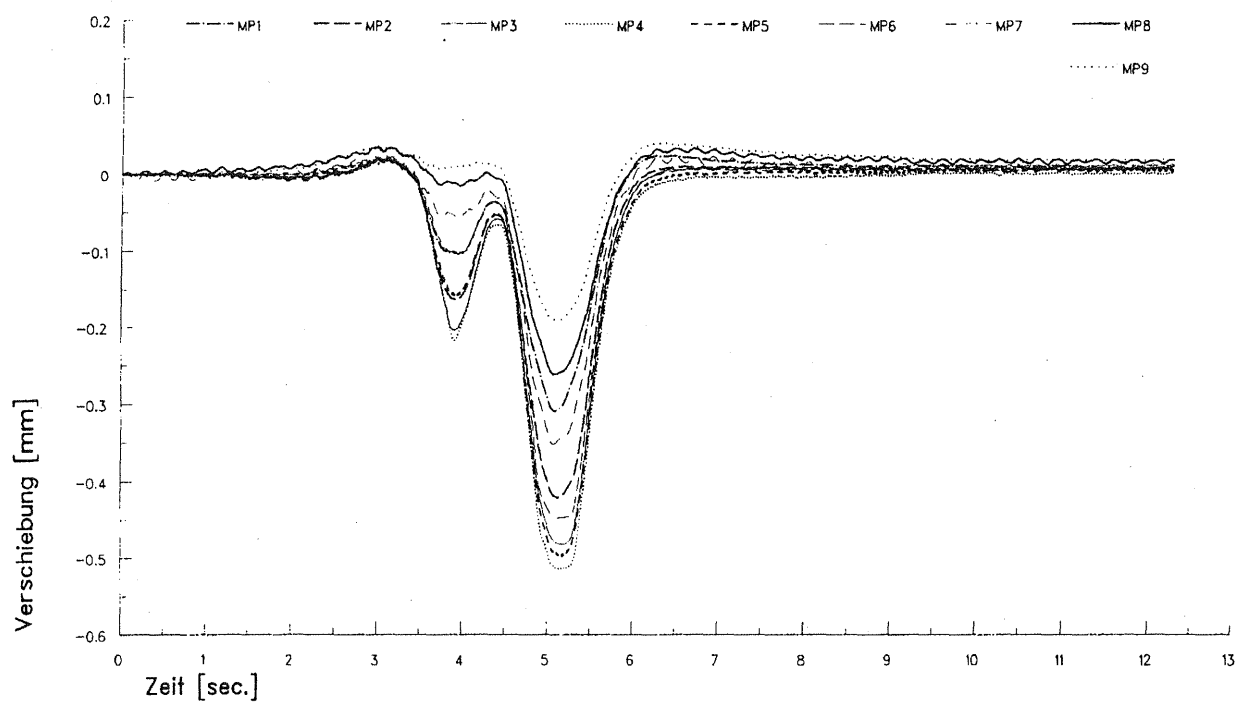


Abb. 4.15: Gemessene Durchbiegungen, Petersdorf, $v = 10$ km/h, Überfahrt 8

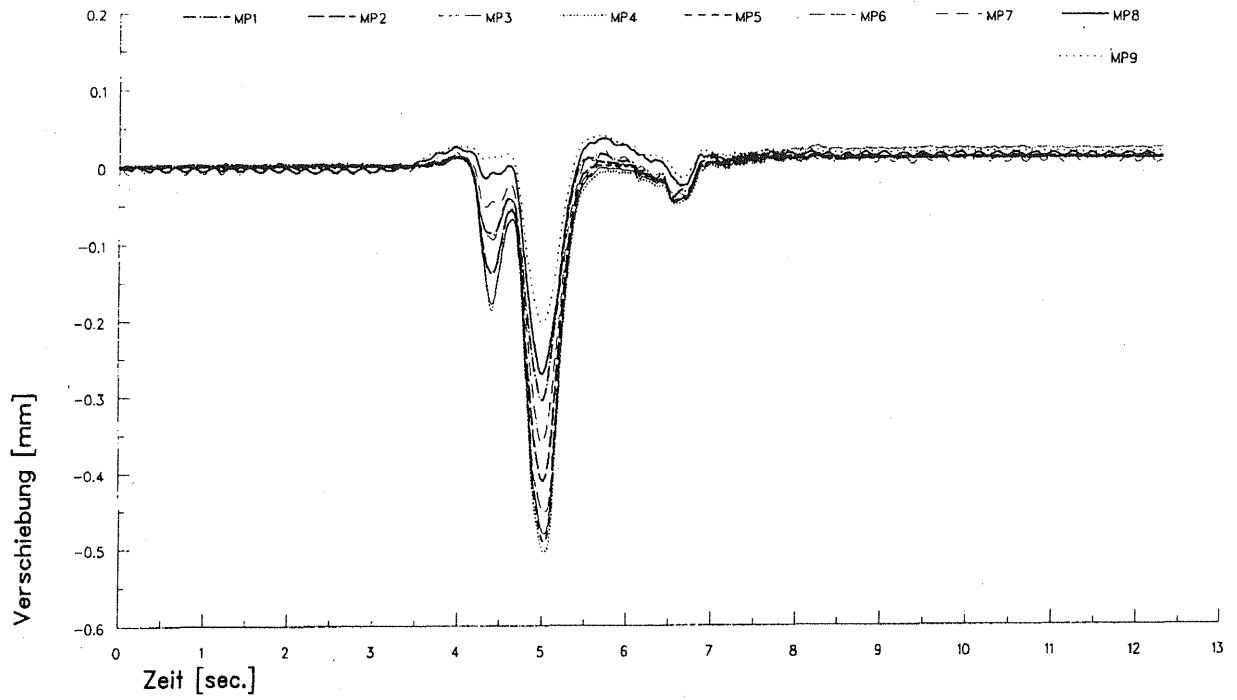


Abb. 4.16: Gemessene Durchbiegungen, Petersdorf, $v = 30$ km/h, Überfahrt 12

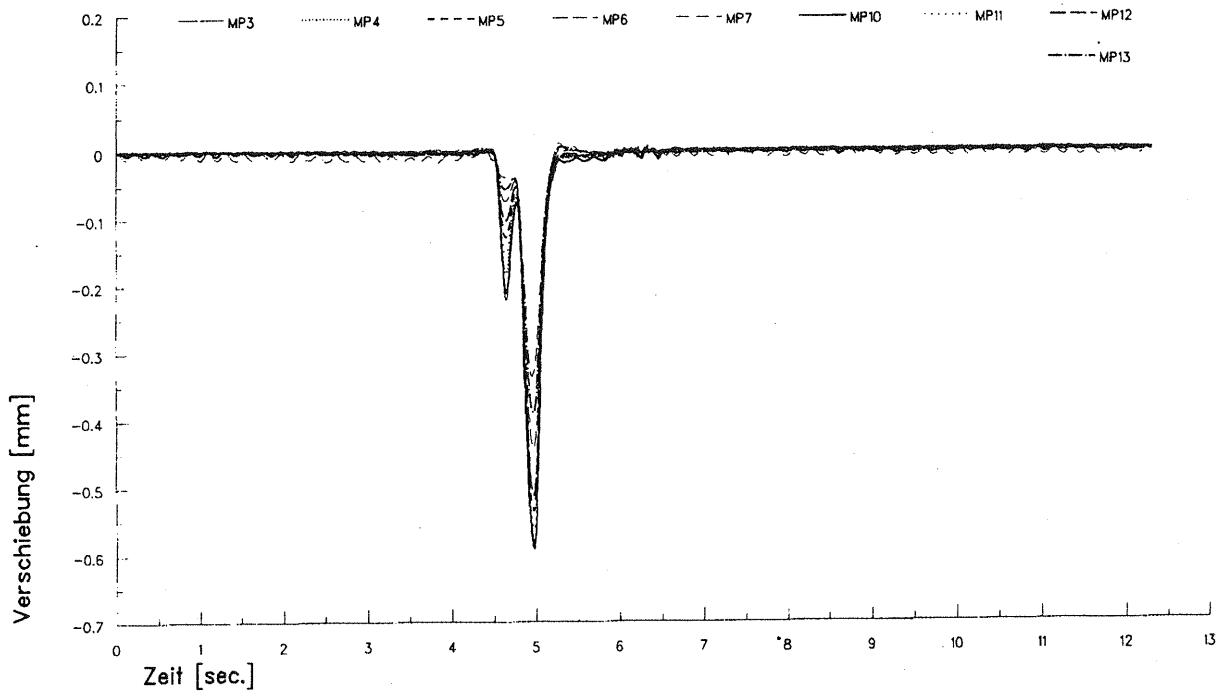


Abb. 4.17: Gemessene Durchbiegungen, Petersdorf, $v = 50$ km/h, Überfahrt 16

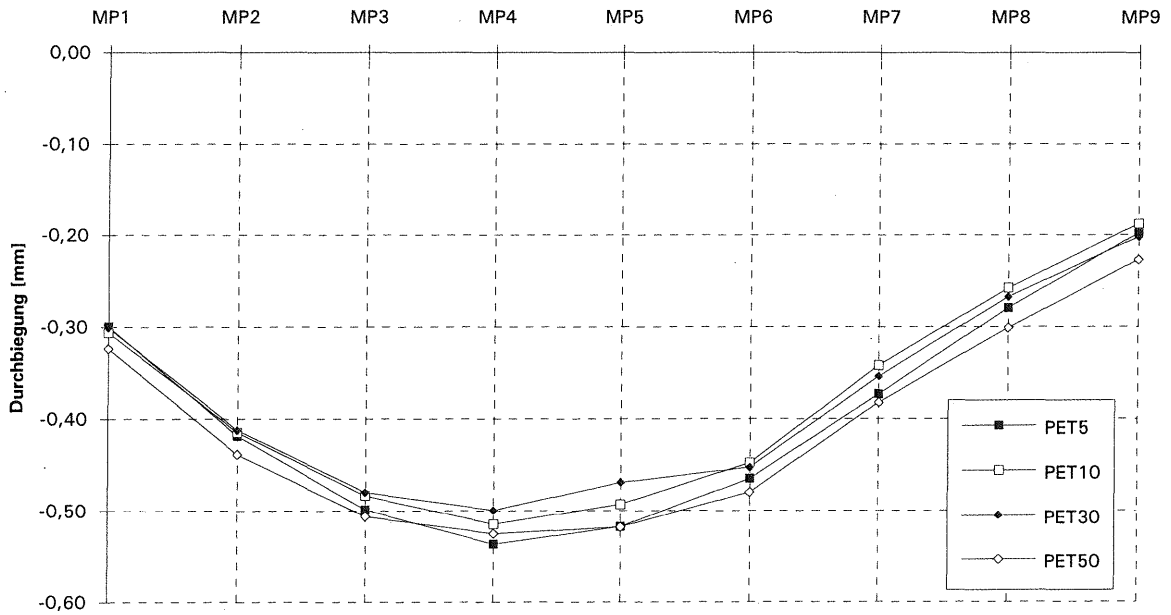


Abb. 4.18: Biegelinienverläufe Brücke Petersdorf, Hintere Doppelachse

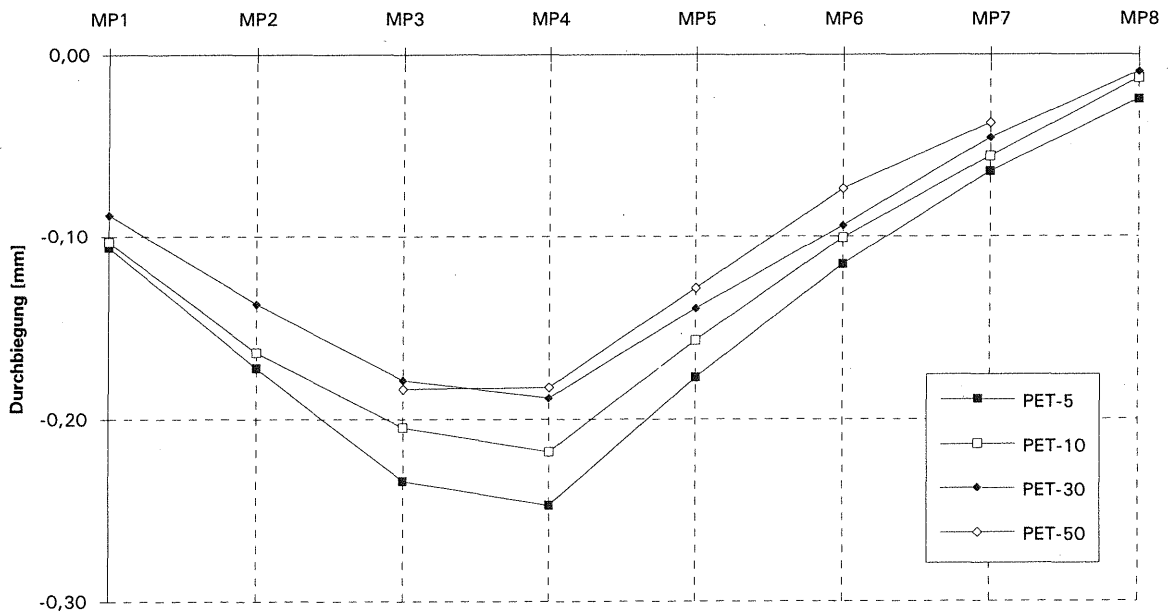


Abb. 4.19: Biegelinienverläufe Brücke Petersdorf, Vorderachse

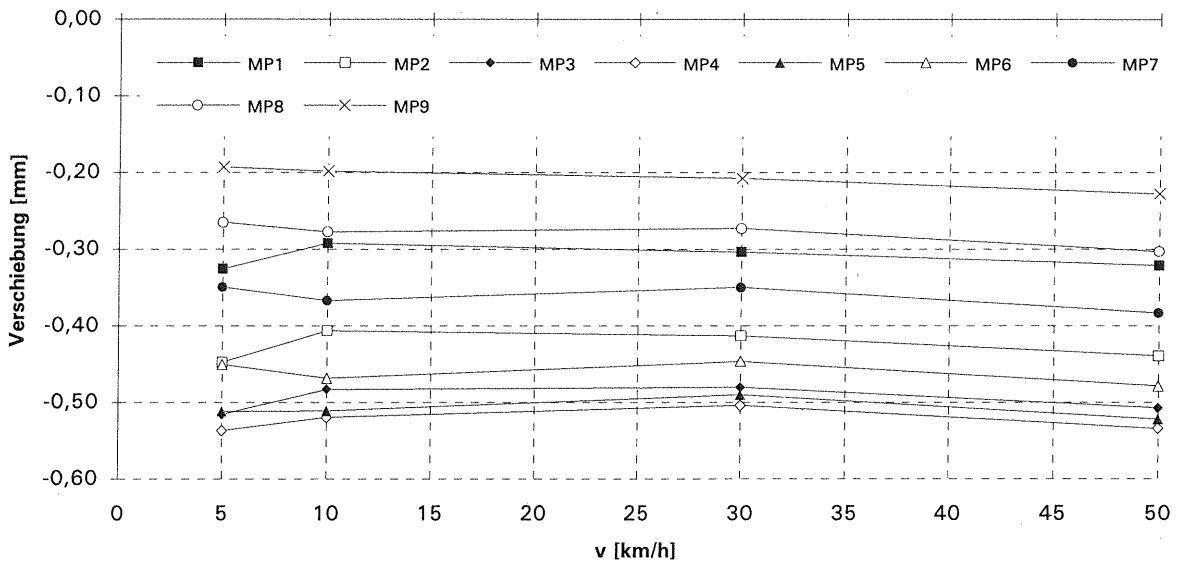


Abb. 4.20: Durchbiegungen als Funktion der Geschwindigkeit, Brücke Petersdorf

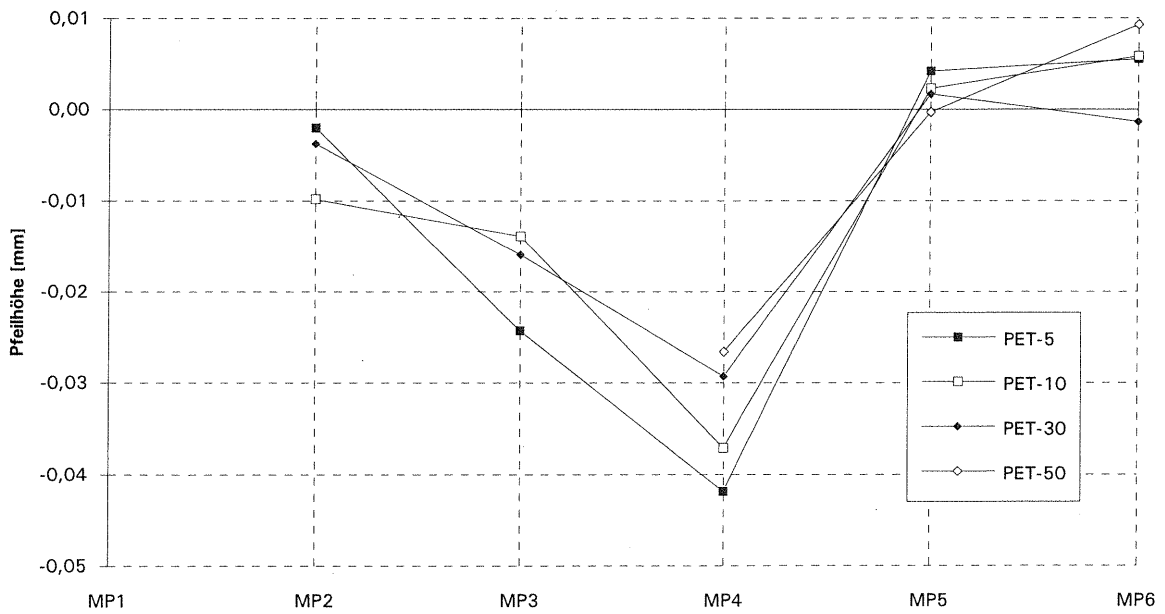


Abb. 4.21: Pfeilhöhen Brücke Petersdorf, Vorderachse

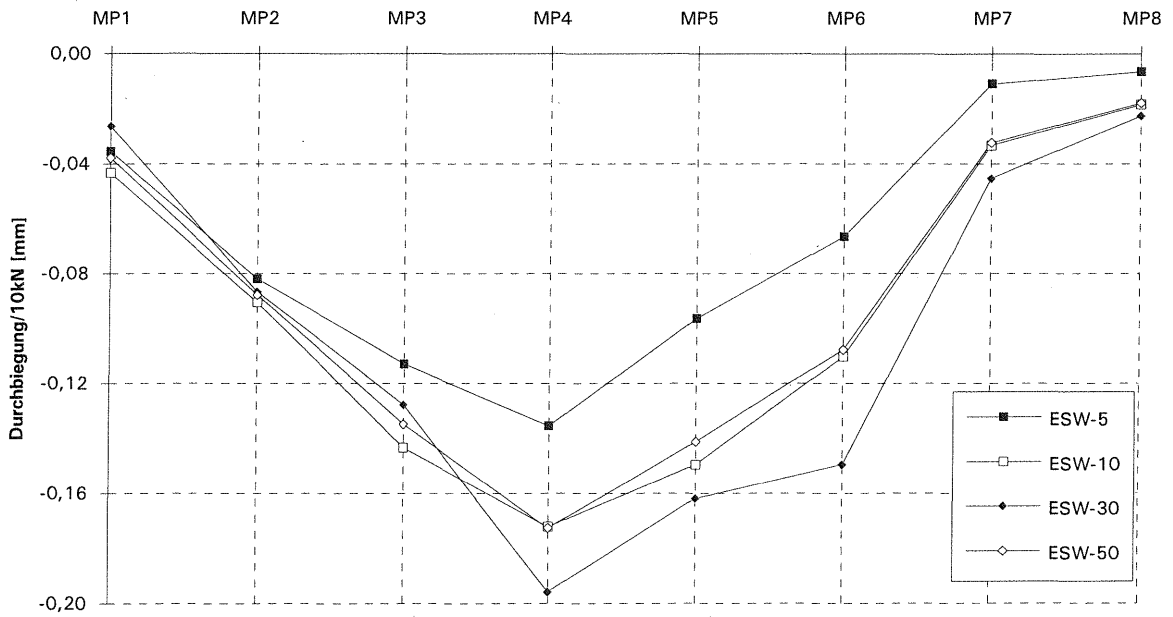


Abb. 4.22: Normierte Durchbiegungen, Rheinbrücke A42, Vorderachse

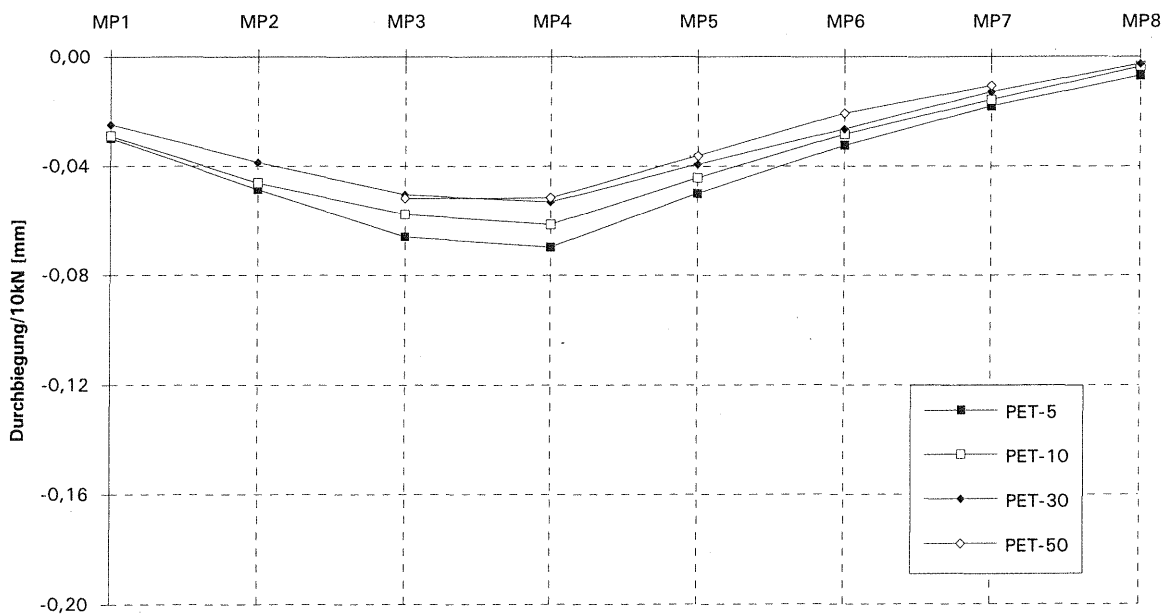


Abb. 4.23: Normierte Durchbiegungen, Brücke Petersdorf, Vorderachse

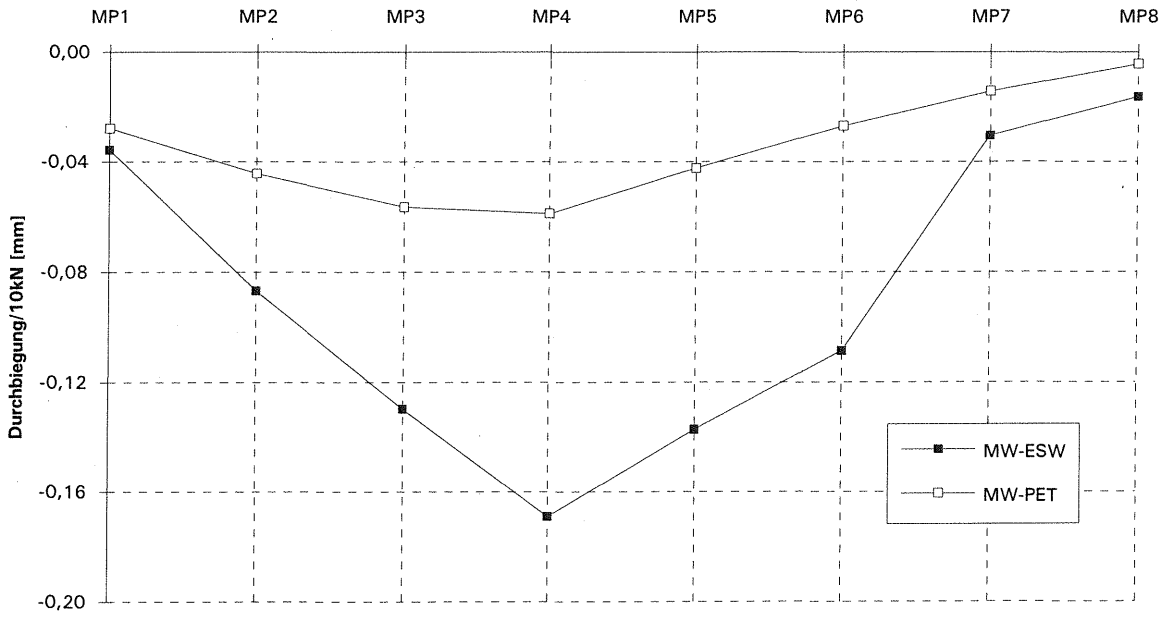


Abb. 4.24: Mittelwerte der normierten Durchbiegungen, Brücke Petersdorf, Rheinbrücke A42

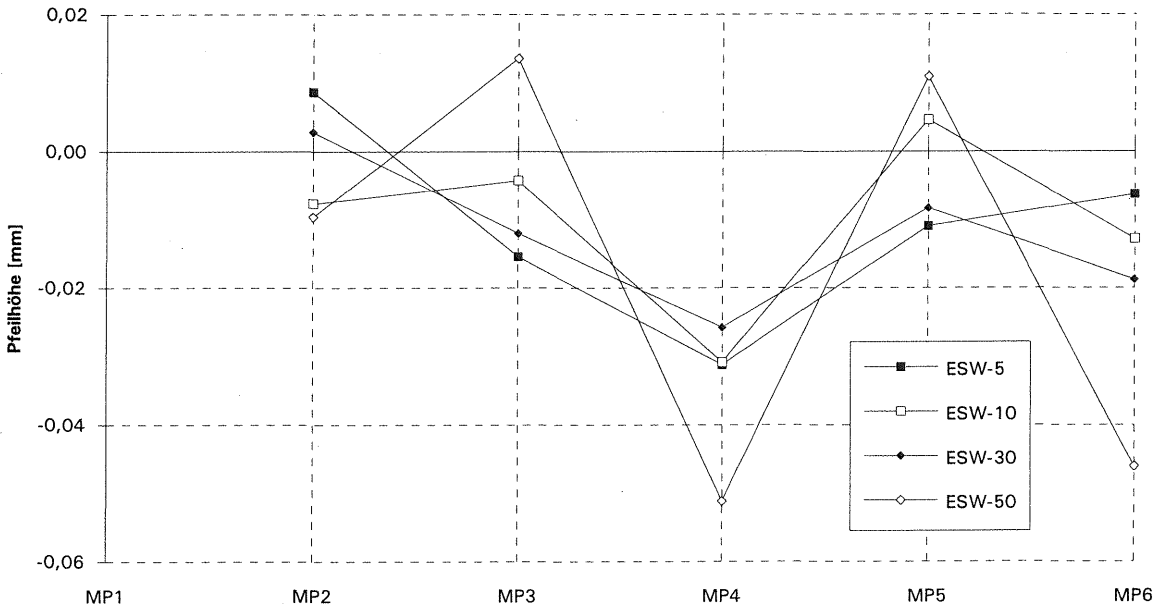


Abb. 4.25: Normierte Pfeilhöhen, Rheinbrücke A42, Vorderachse

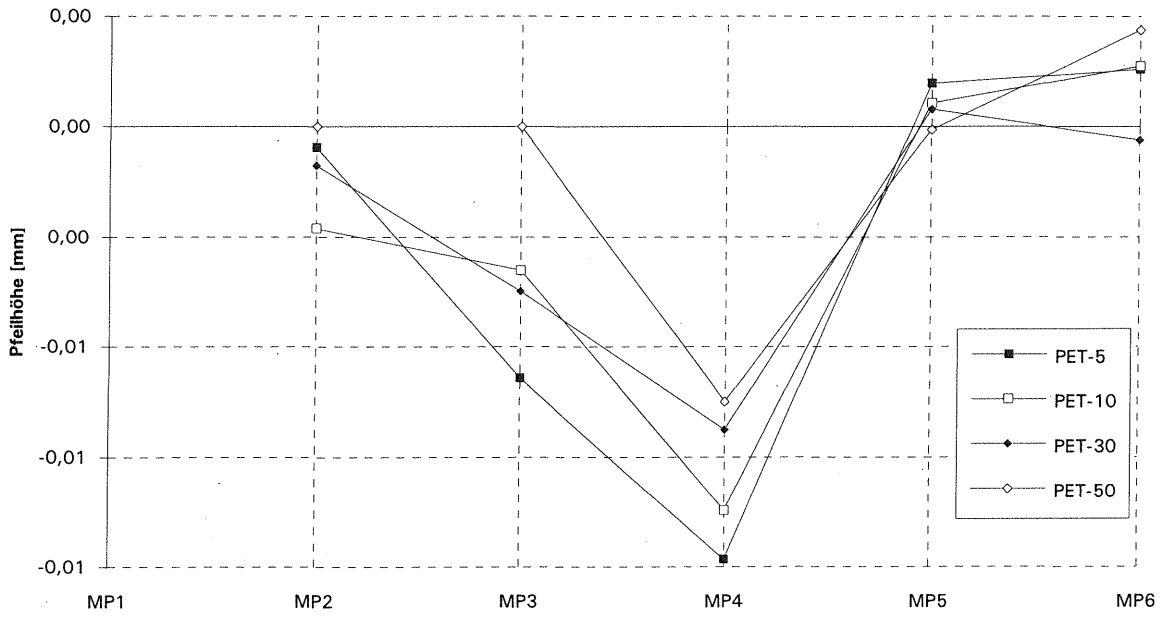


Abb. 4.26: Normierte Pfeilhöhen, Brücke Petersdorf, Vorderachse

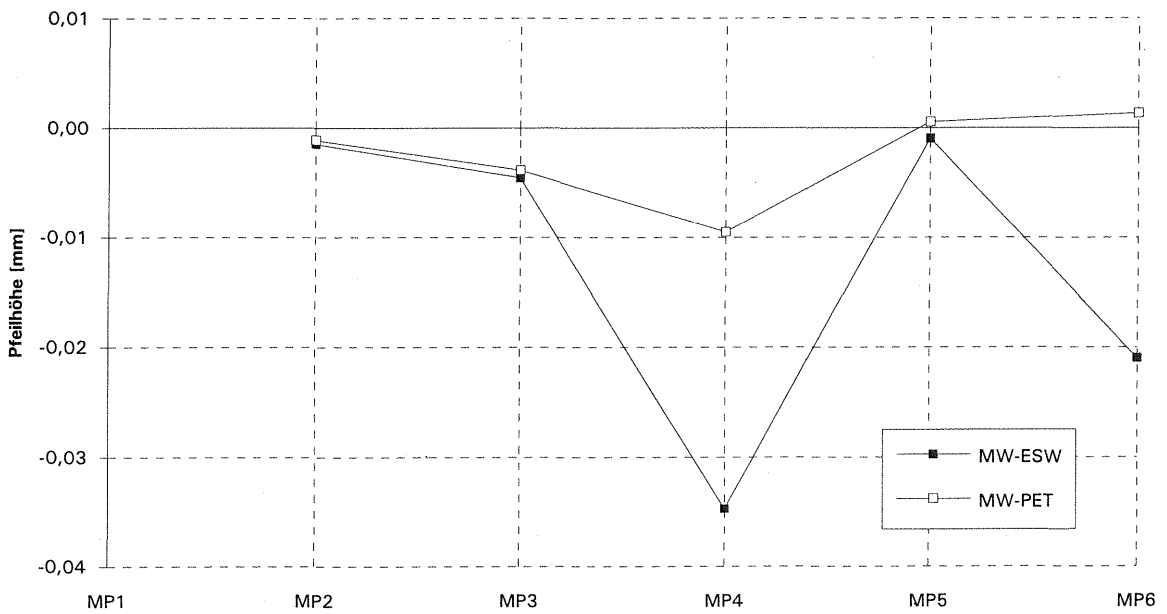


Abb. 4.27: Mittelwerte der normierten Pfeilhöhen, Brücke Petersdorf, Rheinbrücke A42

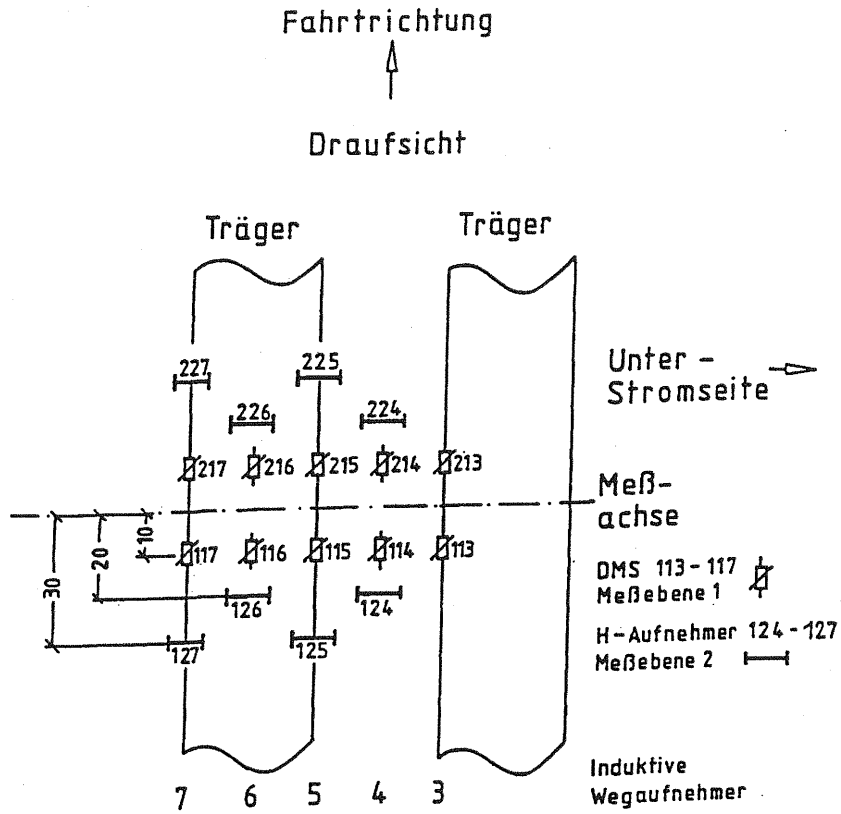


Abb. 5.1: Meßstellenanordnung Dehnungsmessungen, Rheinbrücke im Zuge der A42, Draufsicht

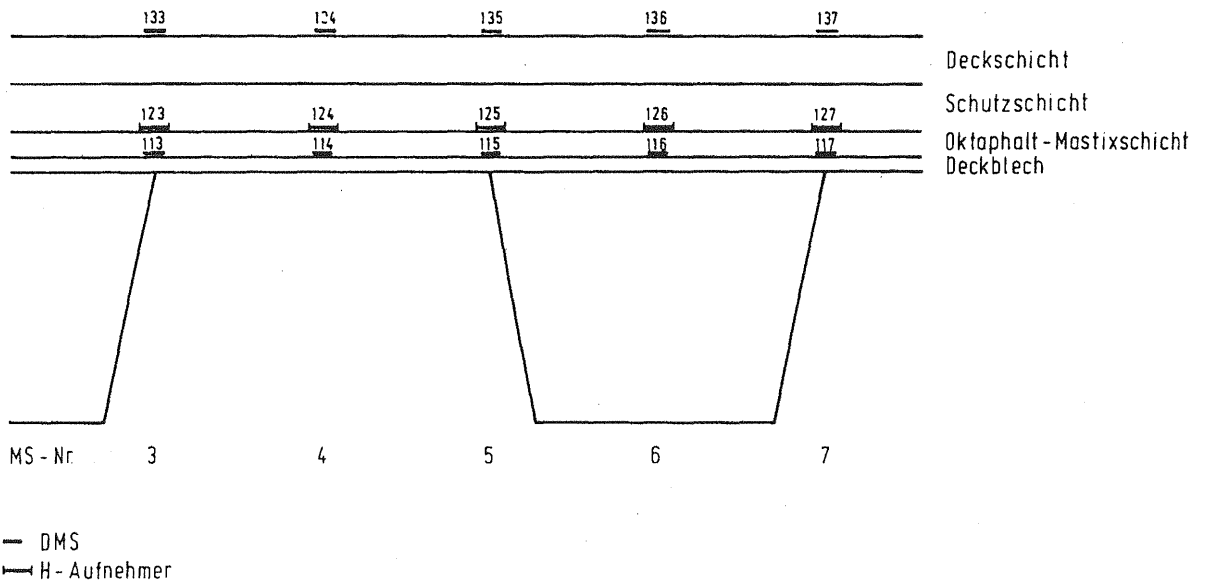
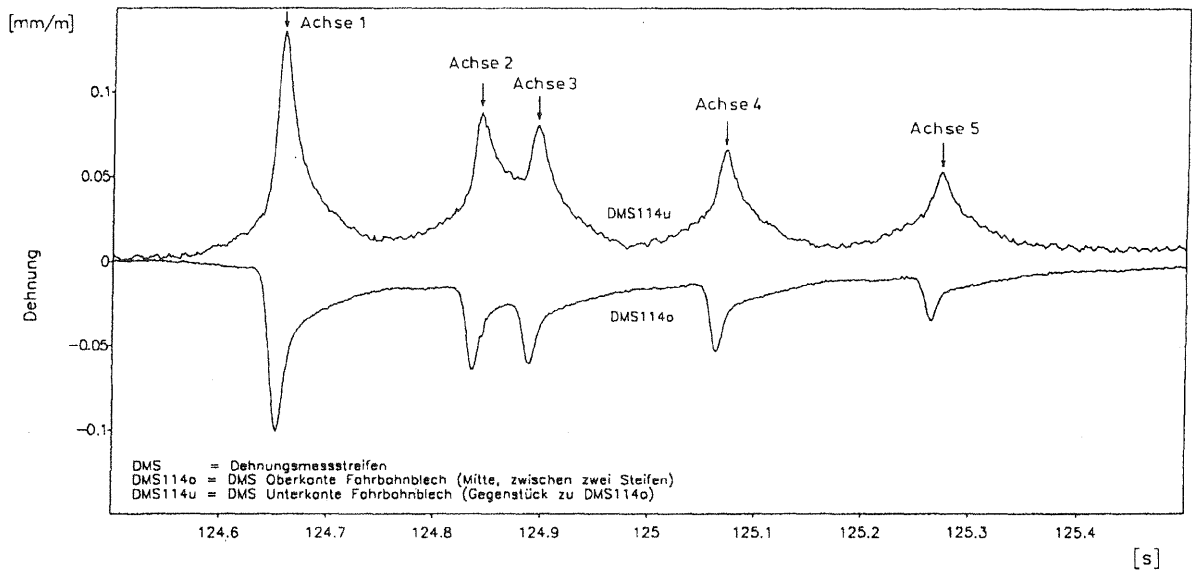
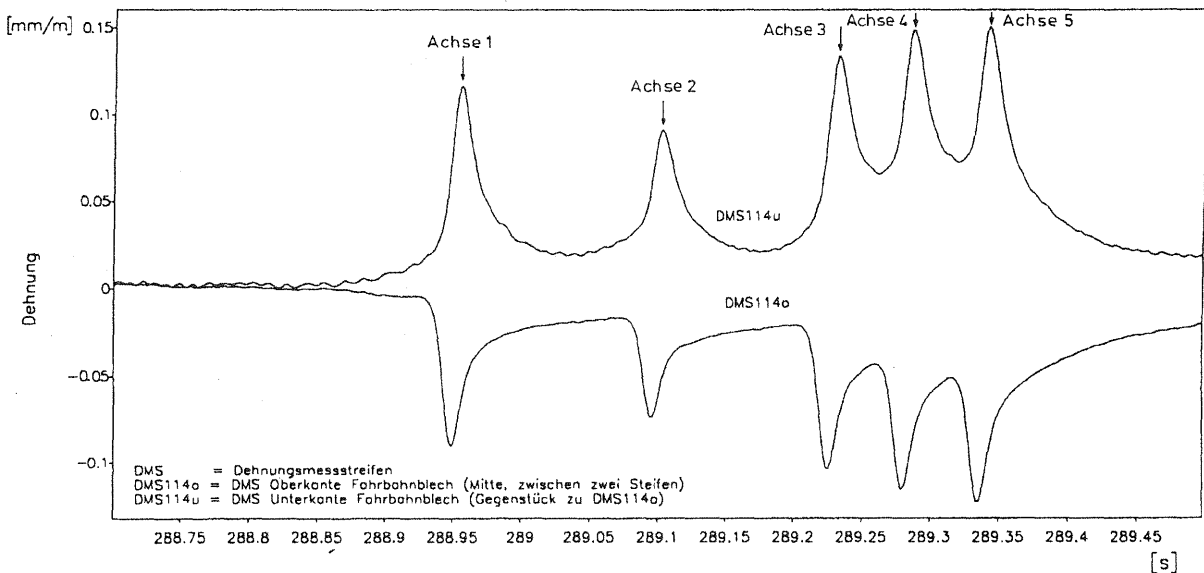


Abb. 5.2: Meßstellenanordnung Dehnungsmessungen, Rheinbrücke im Zuge der A42, Querschnitt



<p>Dehnungsmessung</p> <p>Messung: Rheinbrücke bei Duisburg im Zuge der A42 Tag: 16.07.93 bei normalem Verkehr</p>	<p>BAST</p> <p>-B4r-</p> <p>26.05.94</p>
---	--

Abb. 5.3: Dehnungen als Funktion der Zeit, Rheinbrücke im Zuge der A42, Lkw-Überfahrt 1



<p>Dehnungsmessung</p> <p>Messung: Rheinbrücke bei Duisburg im Zuge der A42 Tag: 16.07.93 bei normalem Verkehr</p>	<p>BAST</p> <p>-B4r-</p> <p>26.05.94</p>
---	--

Abb. 5.4: Dehnungen als Funktion der Zeit, Rheinbrücke im Zuge der A42, Lkw-Überfahrt 2

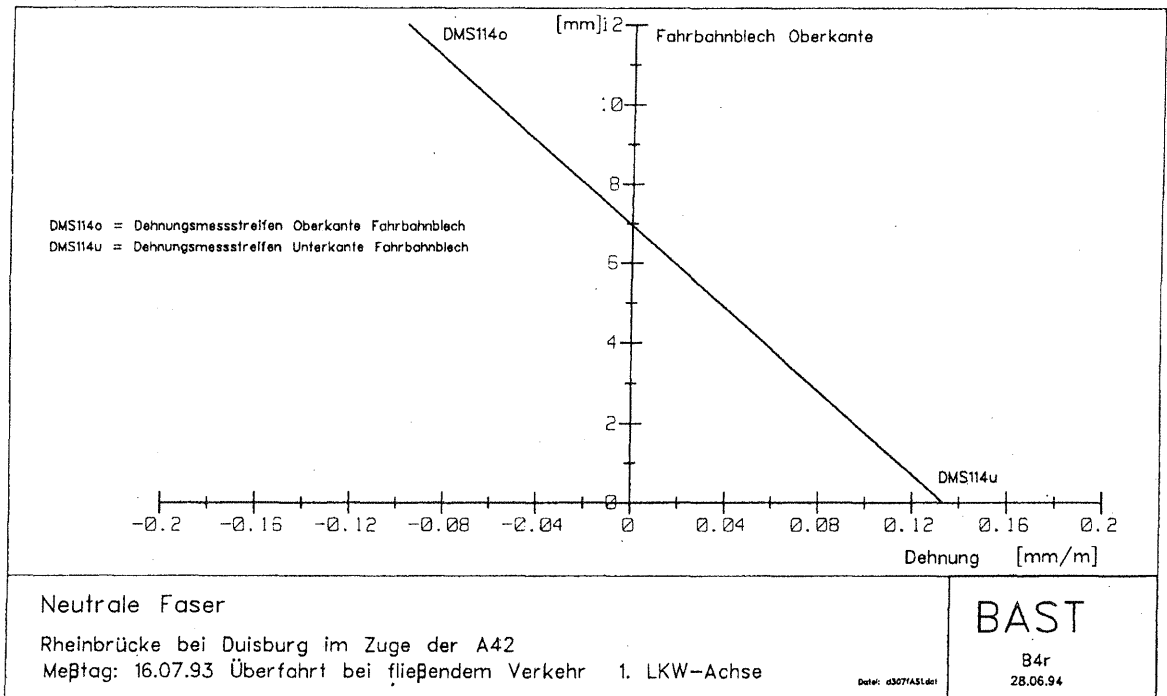


Abb. 5.5: Dehnung des Fahrbahnbleches, Rheinbrücke im Zuge der A42, Lkw-Überfahrt 1

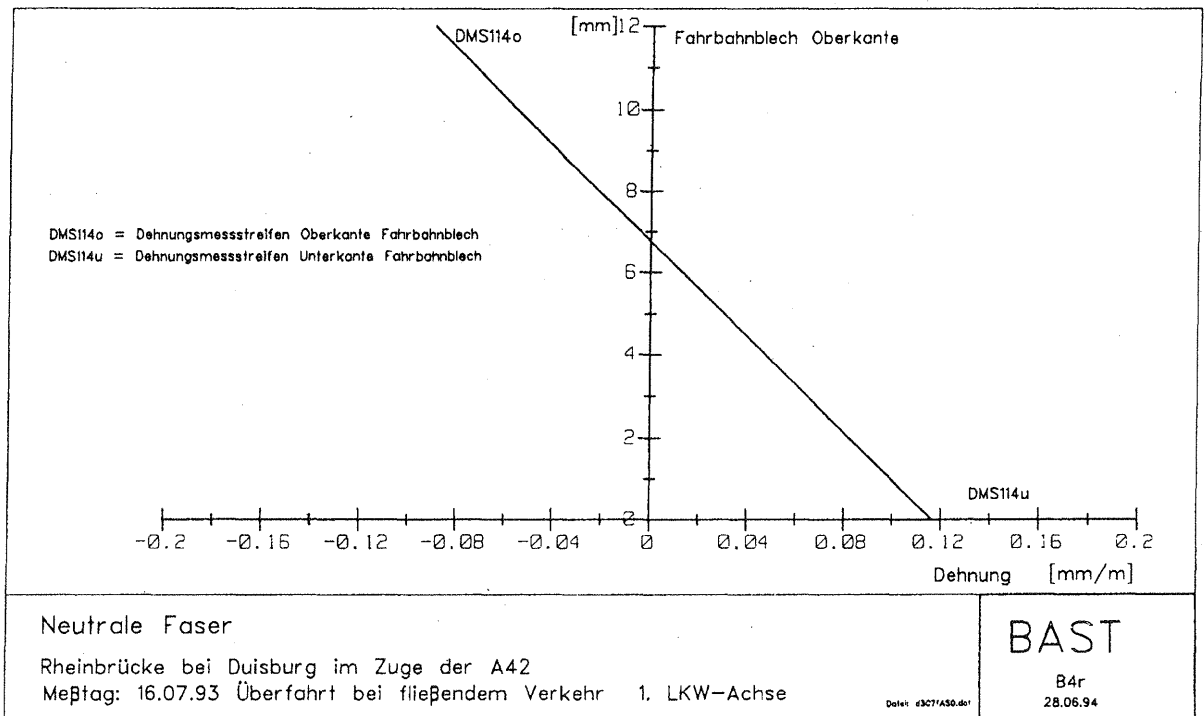


Abb. 5.6: Dehnungen des Fahrbahnbleches, Rheinbrücke im Zuge der A42, Lkw-Überfahrt 2

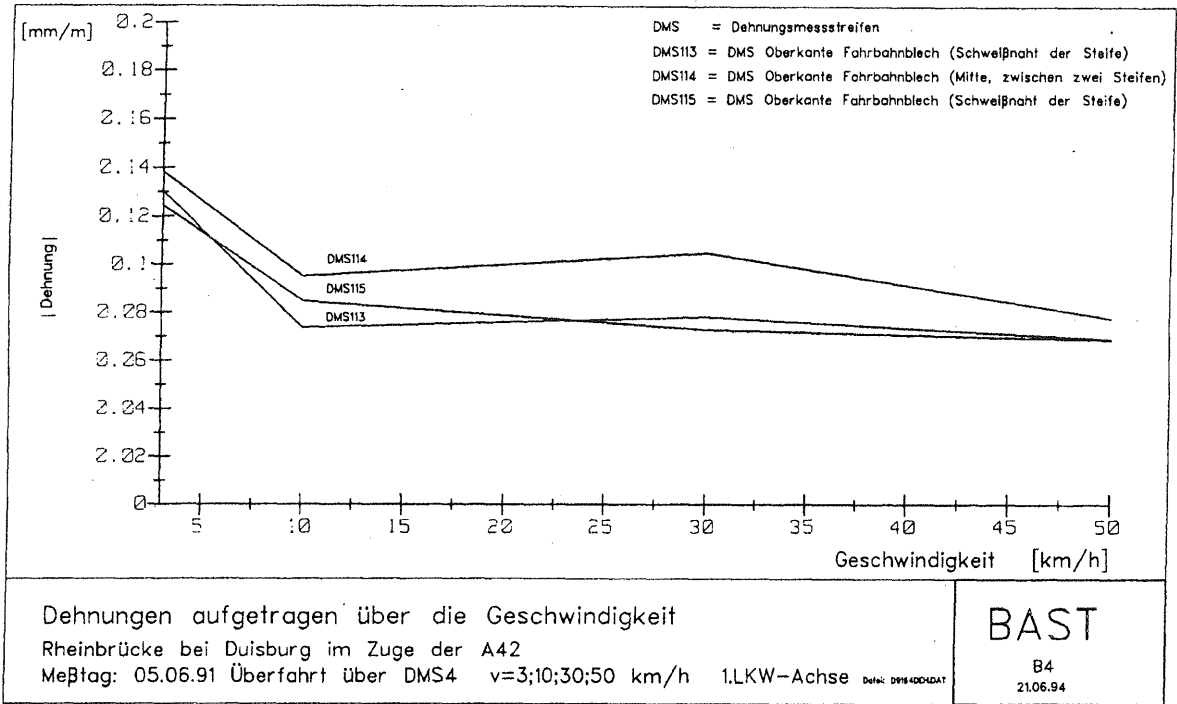


Abb. 5.7: Dehnungen als Funktion der Geschwindigkeit, Rheinbrücke im Zuge der A42

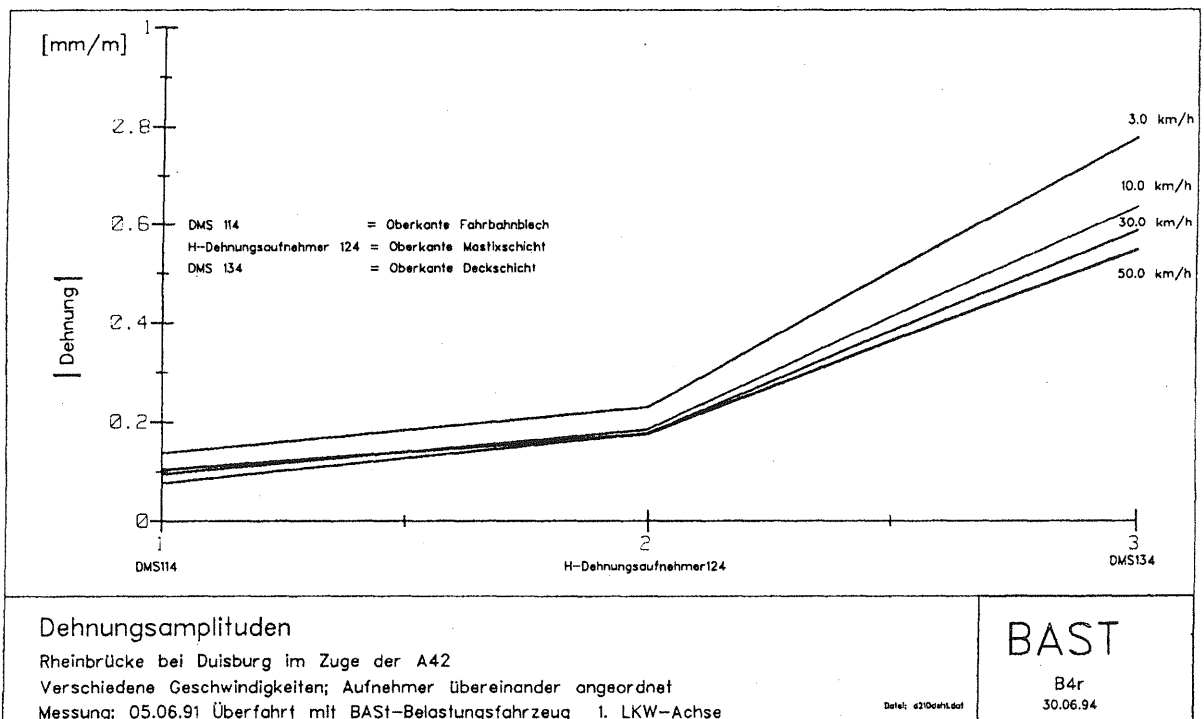


Abb. 5.8: Dehnungen in den bituminösen Schichten, Rheinbrücke im Zuge der A42

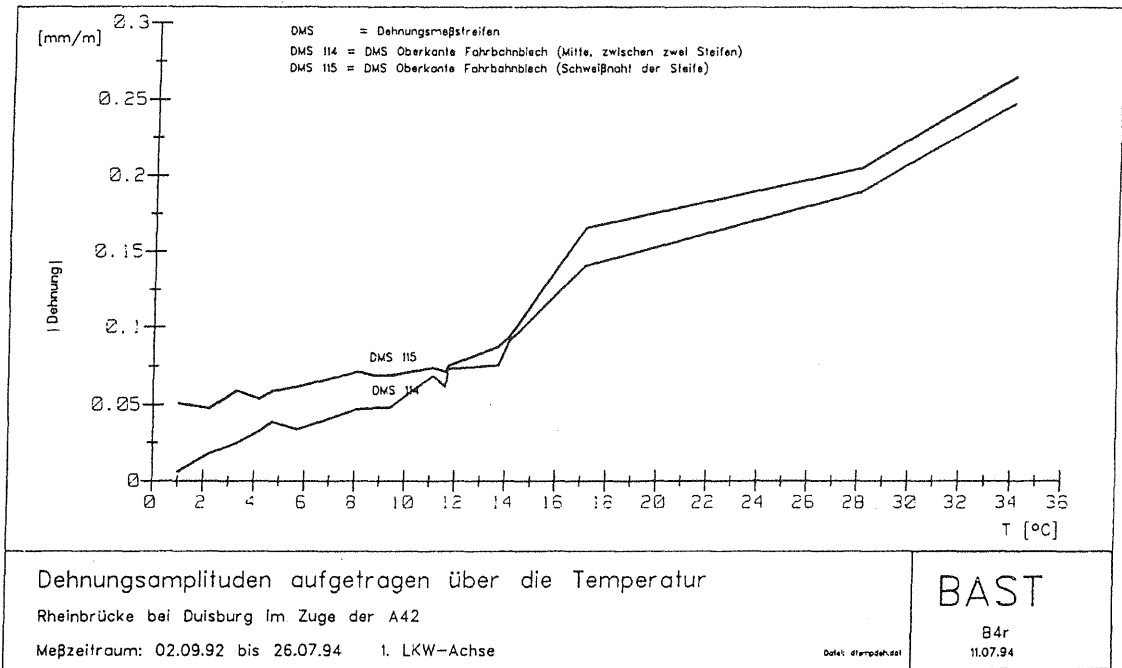
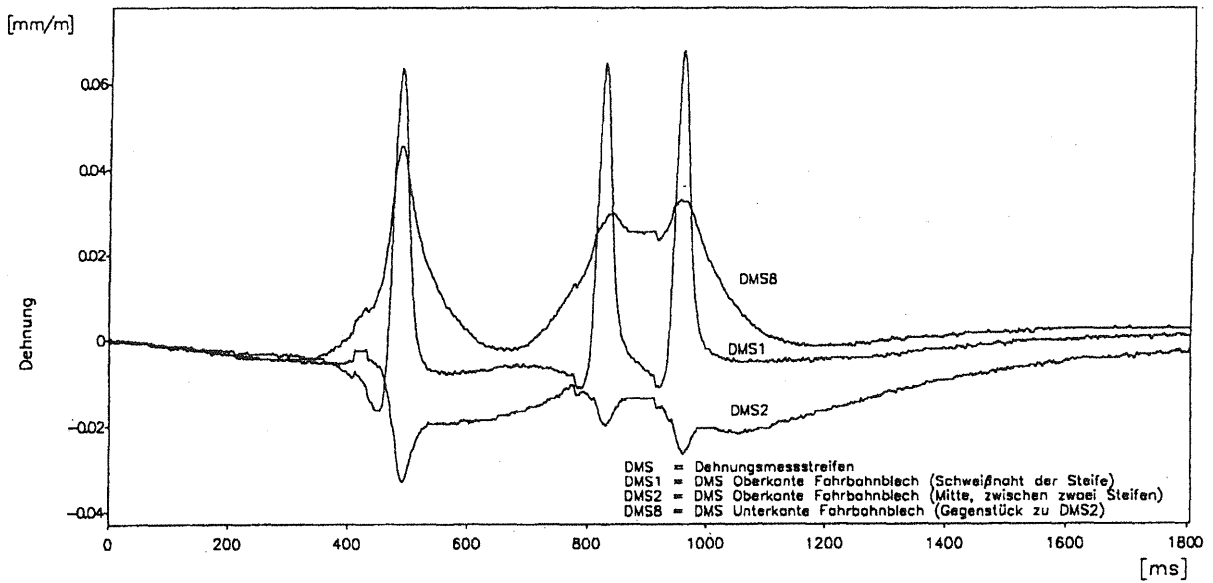


Abb. 5.9: Dehnungen als Funktion der mittleren Belagstemperatur, Rheinbrücke im Zuge der A42

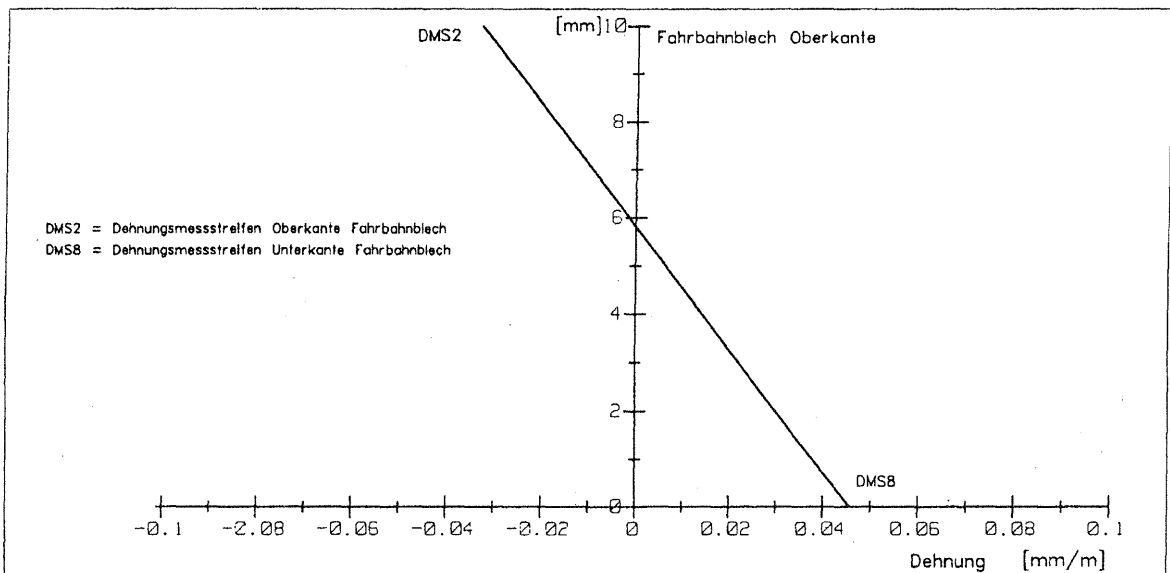


Abb. 5.10: Meßquerschnitt, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19



<p>Dehnungsmessung</p> <p>Messung: Petersdorfer Brücke BAB19 Tag: 12.04.94 Überfahrt: 04 v=05 km/h Signalfilterung: 30 Hz mit Nullpunktkorrektur</p>	<p>BAST</p> <p>-B4r-</p> <p>26.05.94</p>
---	---

Abb. 5.11: Dehnungen als Funktion der Zeit, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19



<p>Neutrale Faser</p> <p>Petersdorfer Brücke (BAB 19)</p> <p>Messung am: 12.04.94 Überfahrt 04 v=05 km/h 1. LKW-Achse</p>	<p>BAST</p> <p>B4r</p> <p>16.06.94</p>
---	---

Abb. 5.12: Dehnungen des Fahrbahnbleches, v = 5 km/h, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

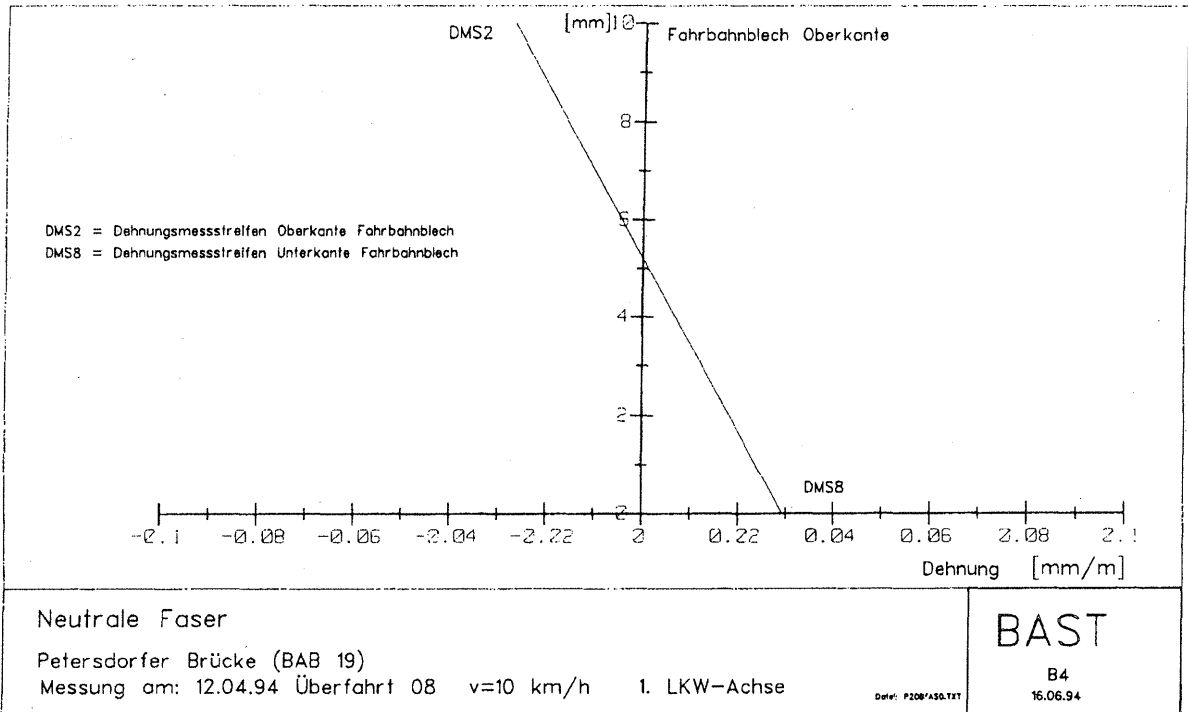


Abb. 5.13: Dehnungen des Fahrbahnbleches, v = 10 km/h, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

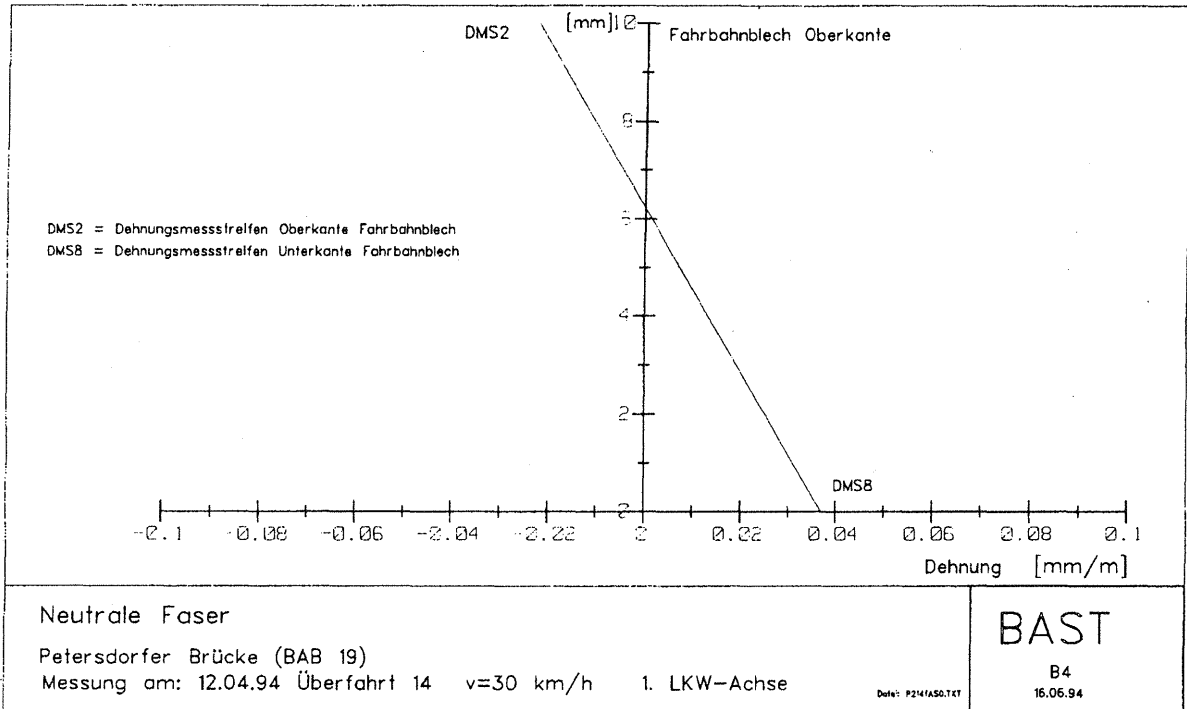


Abb. 5.14: Dehnungen des Fahrbahnbleches, v = 30 km/h, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

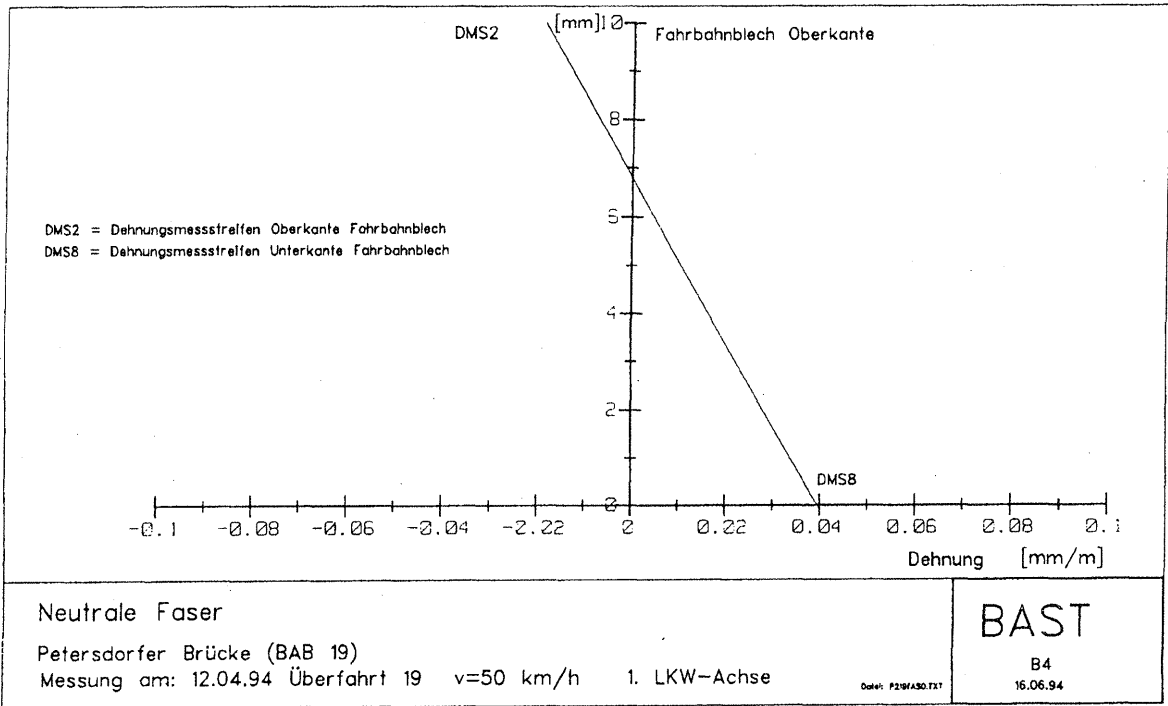
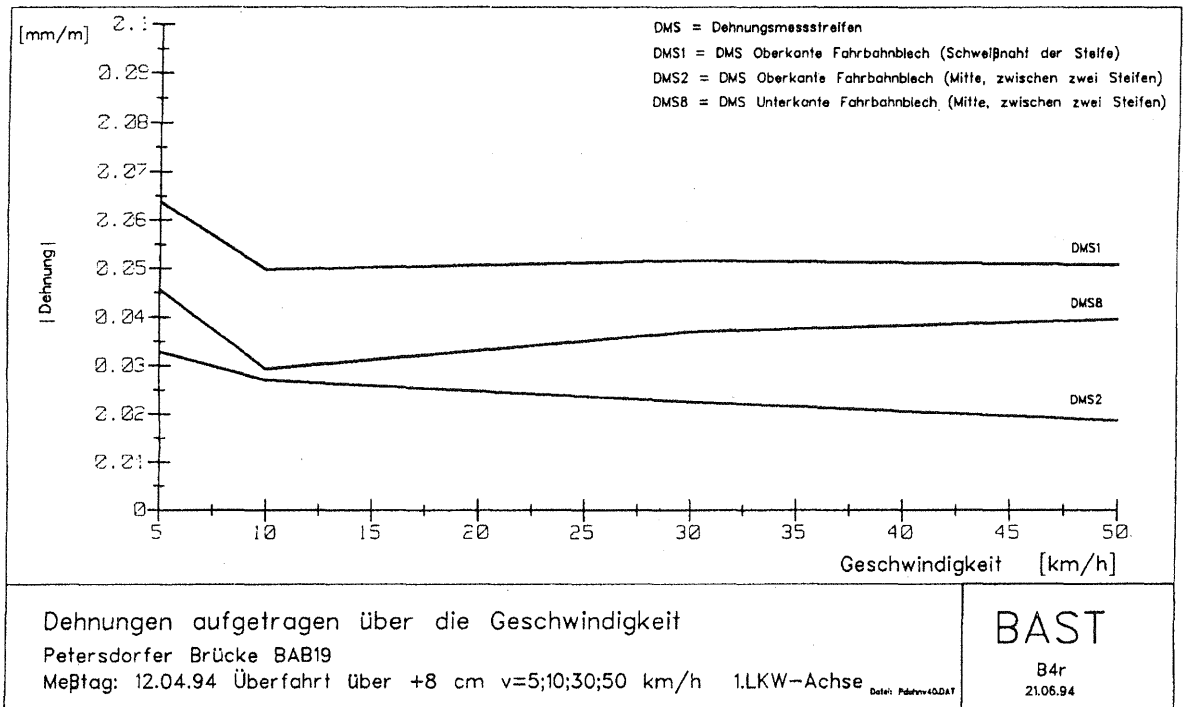


Abb. 5.15: Dehnungen des Fahrbahnbleches, v = 50 km/h, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19



5.16: Dehnungen als Funktion der Geschwindigkeit, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

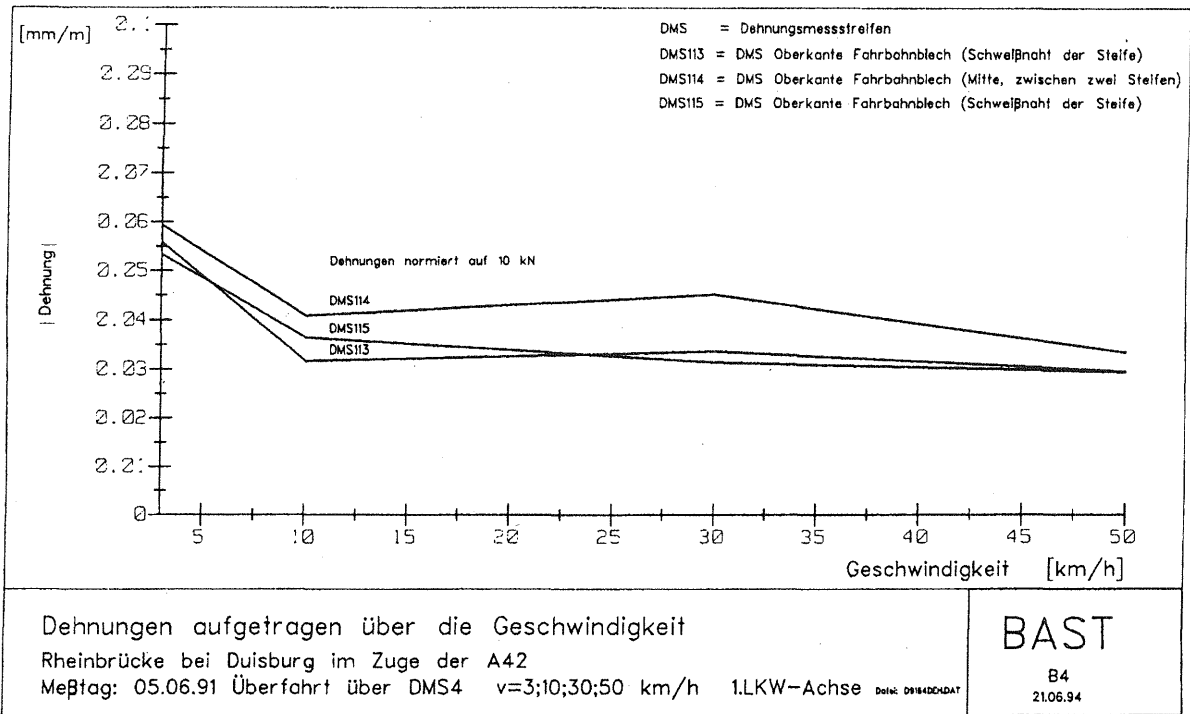


Abb. 5.17: Dehnungen bezogen auf eine Radlast von 10 kN als Funktion der Zeit, Rheinbrücke im Zuge der A42

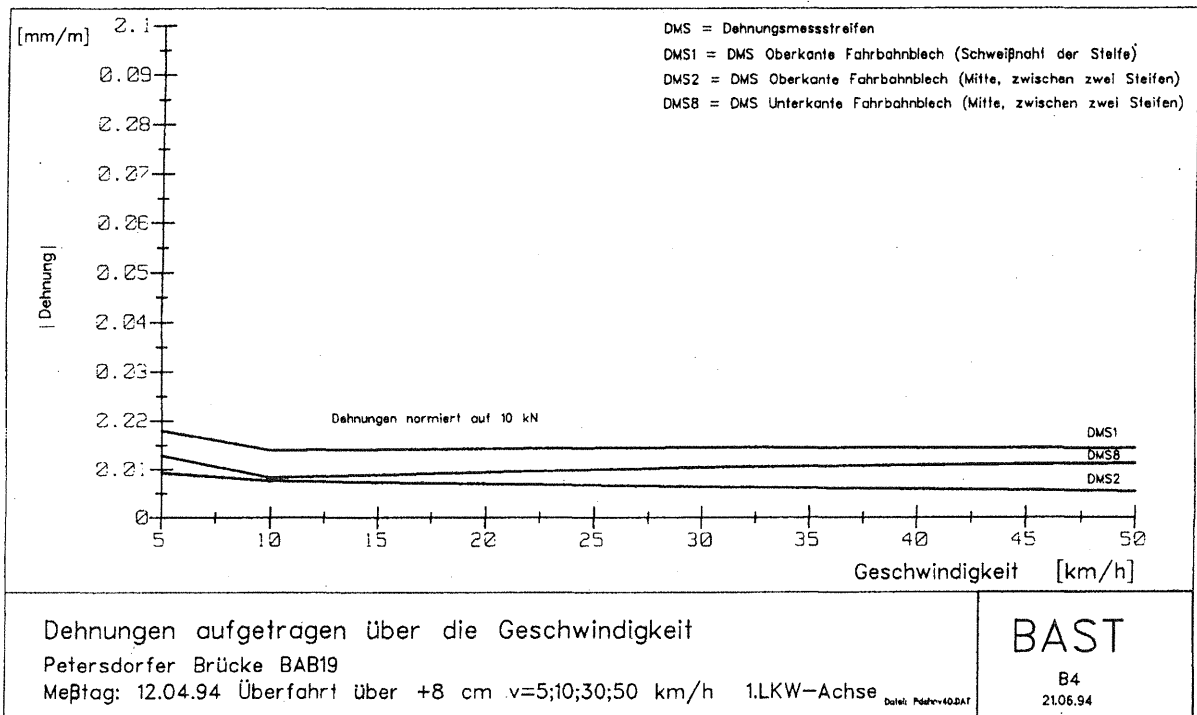


Abb. 5.18: Dehnungen bezogen auf eine Radlast von 10 kN als Funktion der Zeit, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

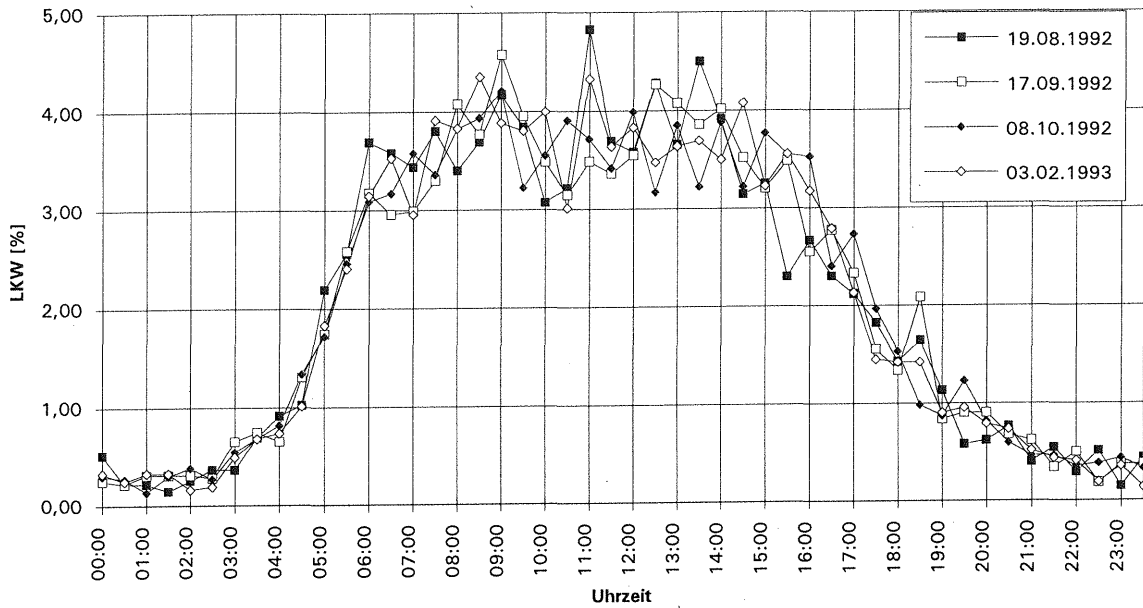


Abb. 6.1: LKW-Zählungen an der A42, Tagesganglinien der LKW-Anzahlen

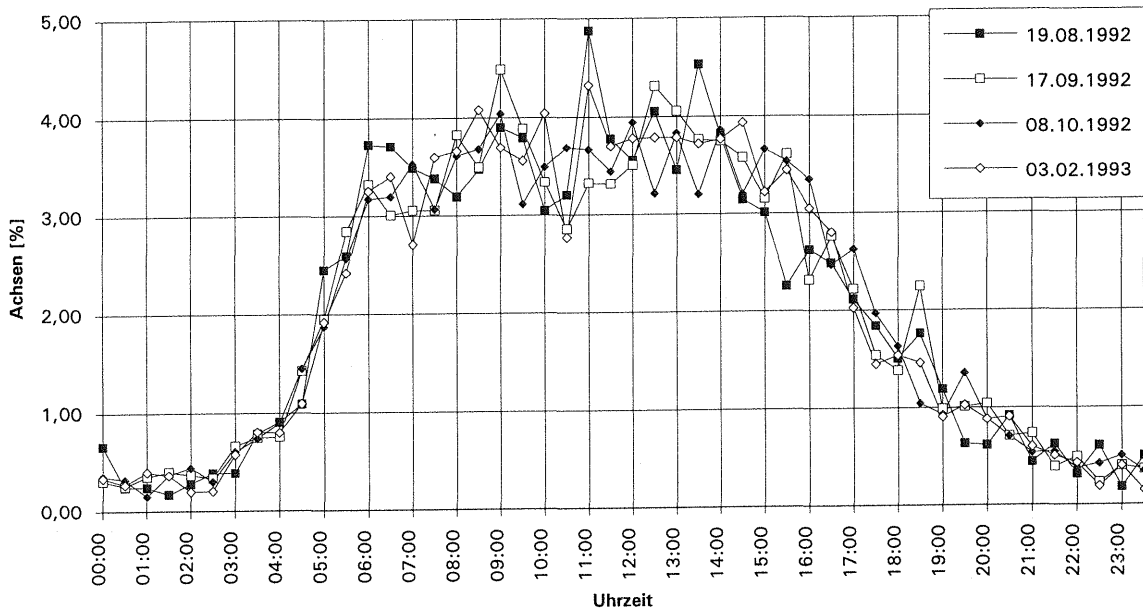


Abb. 6.2: LKW-Zählungen an der A42, Tagesganglinien der Achsanzahlen

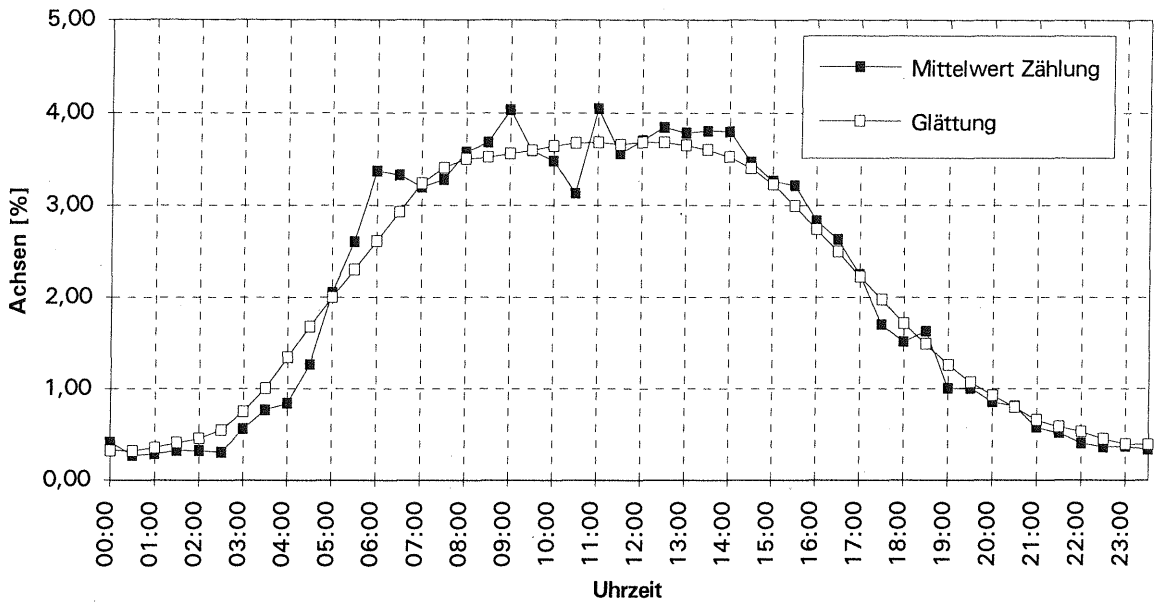


Abb. 6.3: LKW-Zählungen an der A42, mittlere Tagesganglinie der Achsanzahlen und Glättung

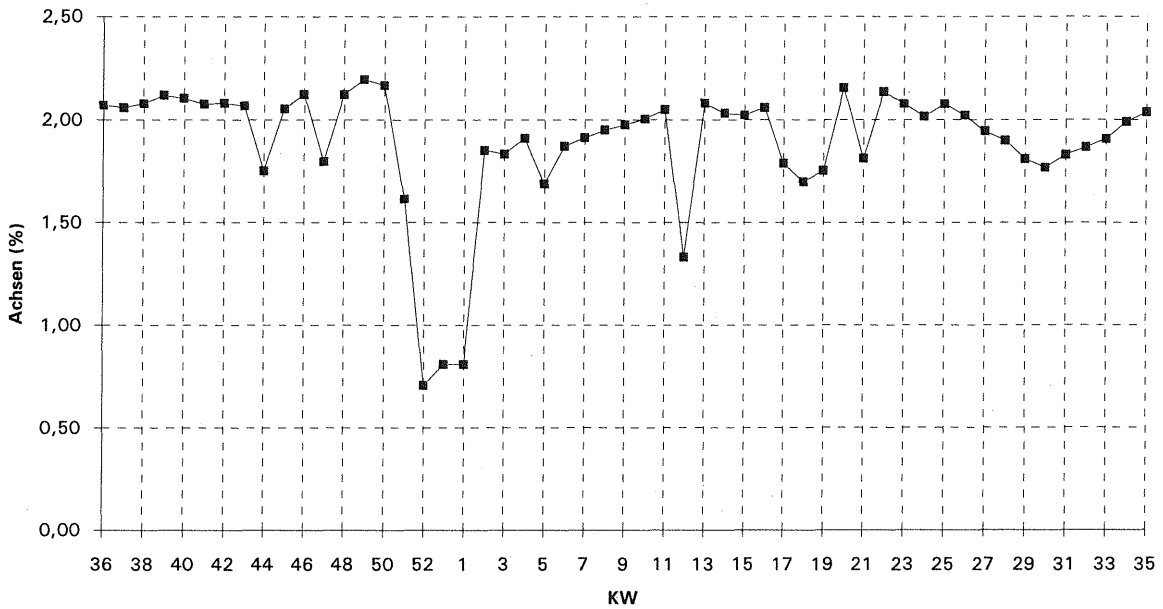


Abb. 6.4: Jahresganglinie A42, Achsanzahlen

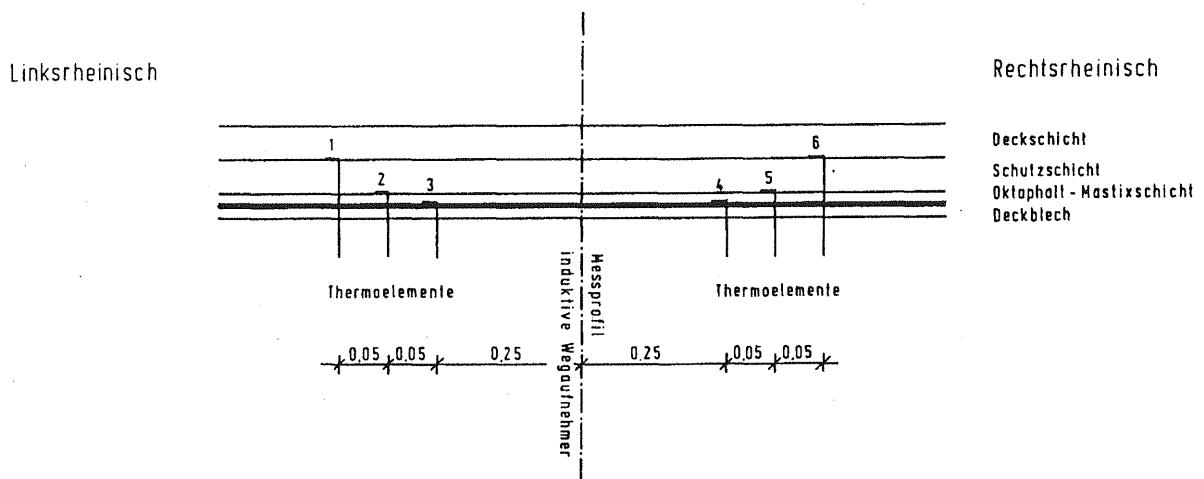


Abb. 7.1: Anordnung der Temperaturmeßstellen

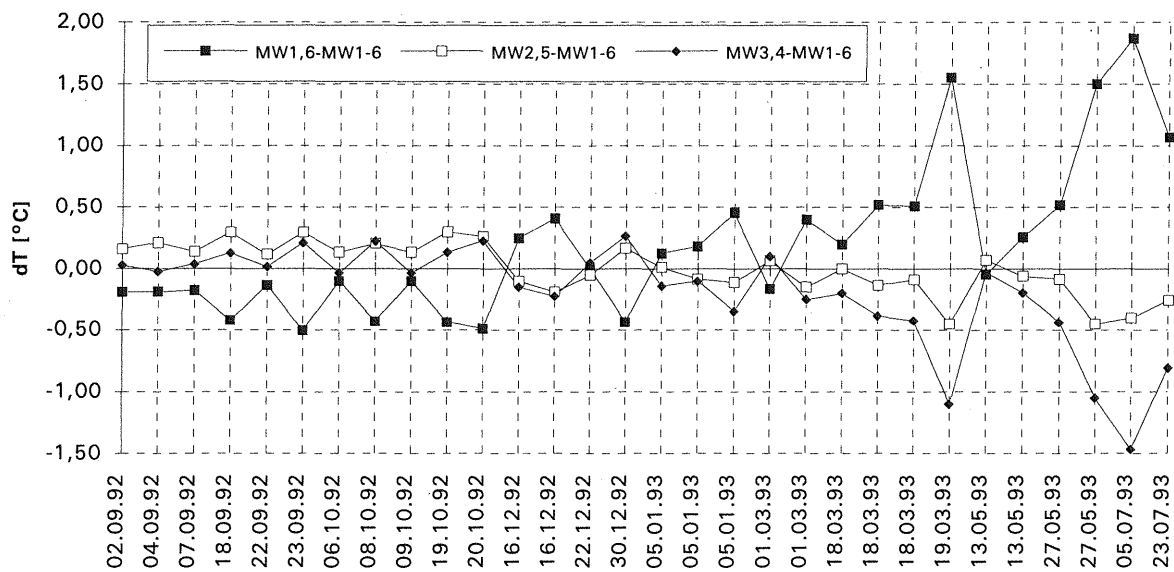


Abb. 7.2: Gemessene Temperaturunterschiede der orthotropen Platte

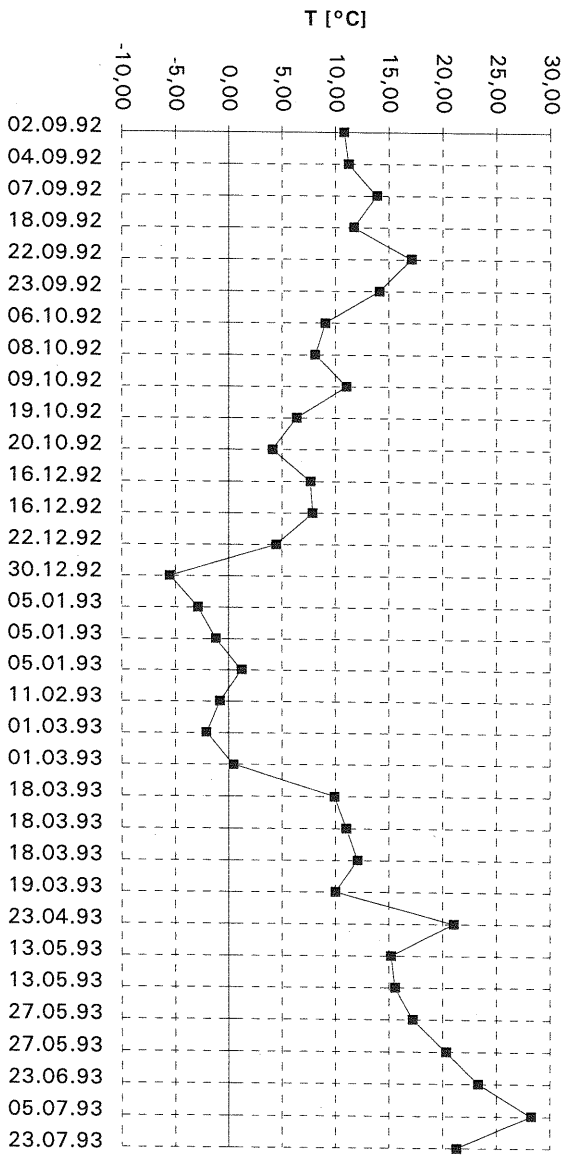


Abb. 7.3: Mittlere Temperaturen der orthotropen Platte

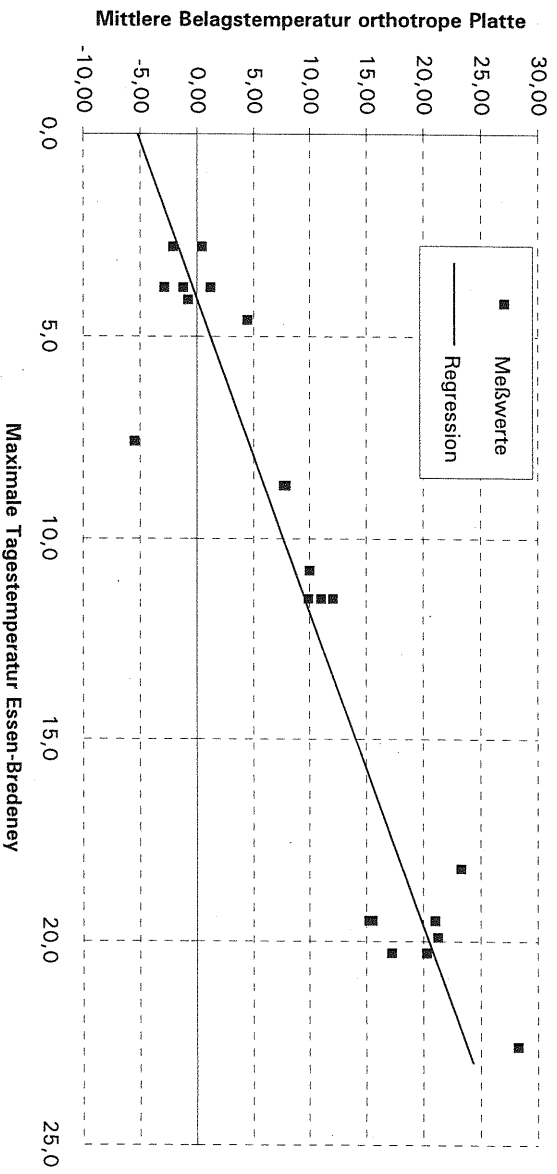


Abb. 7.4: Regressionsrechnung Essen-Bredenev - A42

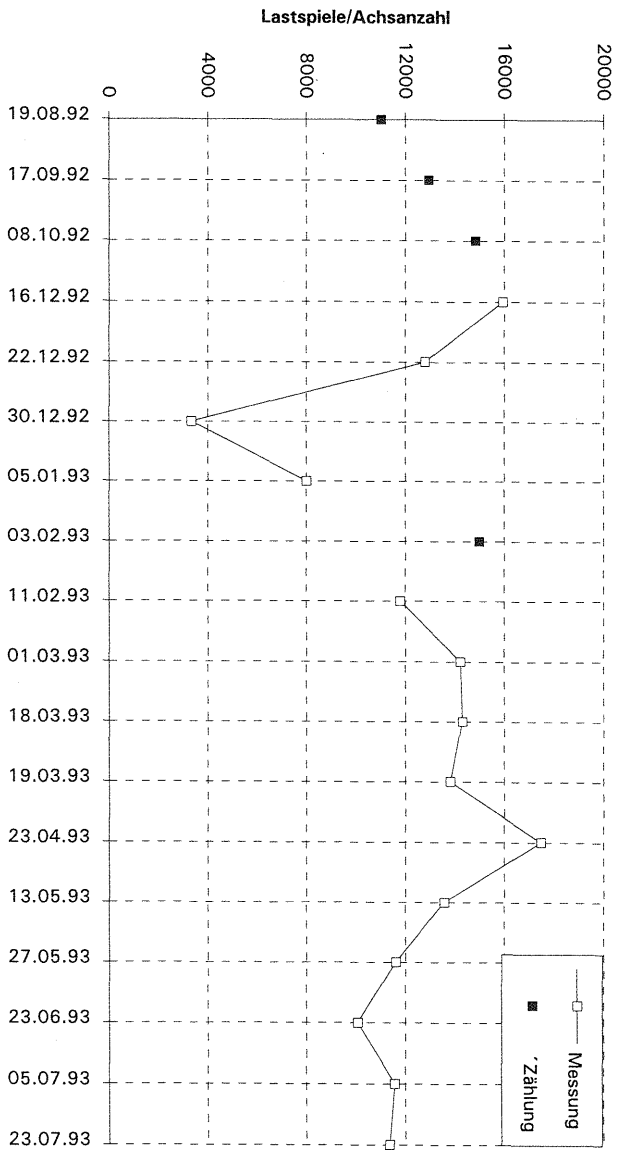


Abb. 8.1: Achsanzahlen, Hochrechnung der Klassierten Pfeilhöhenanzahlen

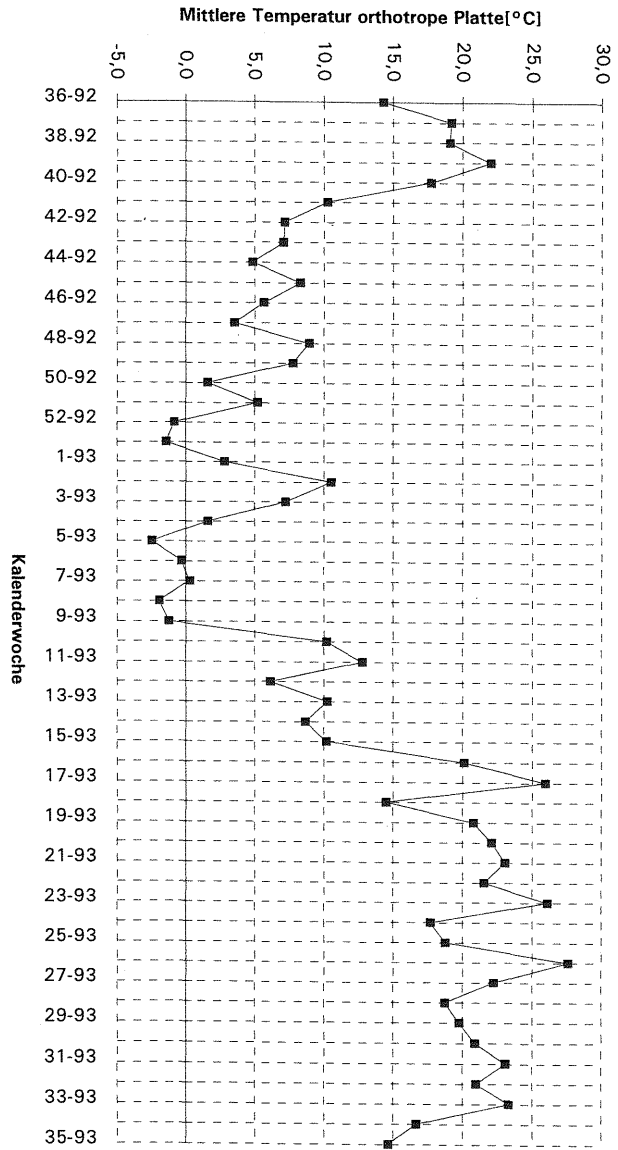


Abb. 7.5: Jahresganglinie der Temperatur an der A42

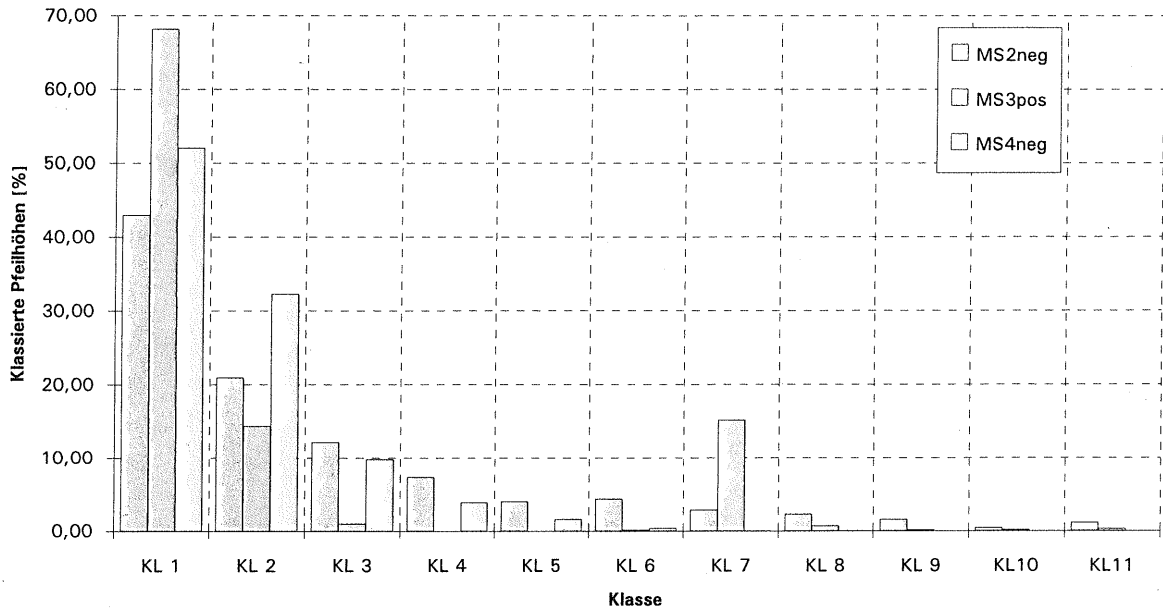


Abb. 8.2: Pfeilhöhenverteilungen, Prozentwerte für die Meßstellen MS2, MS3 und MS4

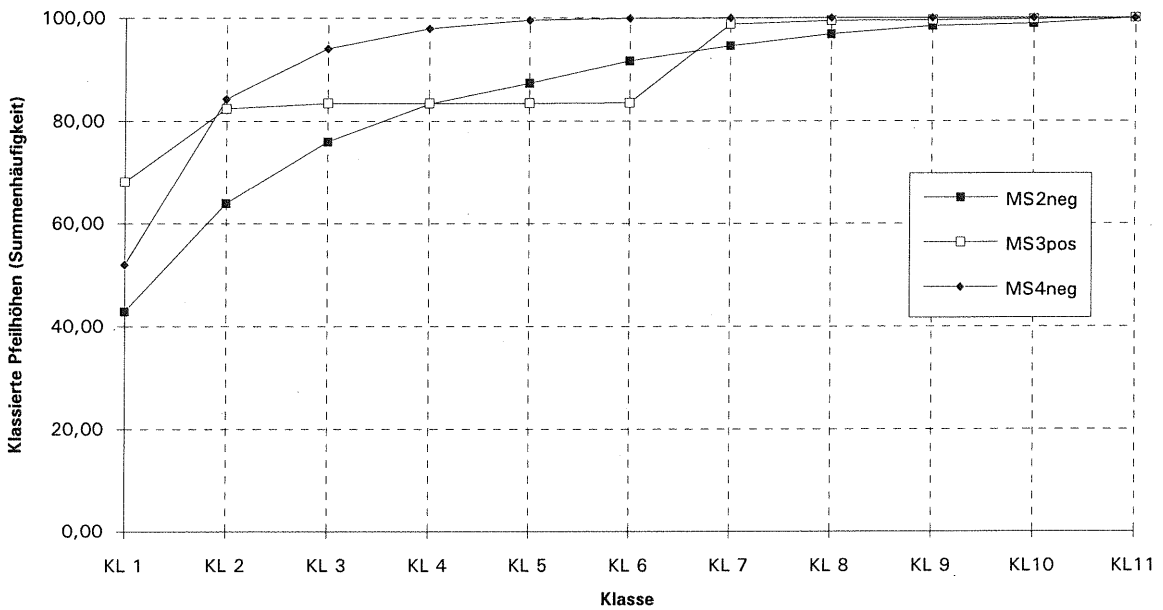


Abb. 8.3: Summenhäufigkeiten klassierter Pfeilhöhen für die Meßstellen MS2, MS3 und MS4

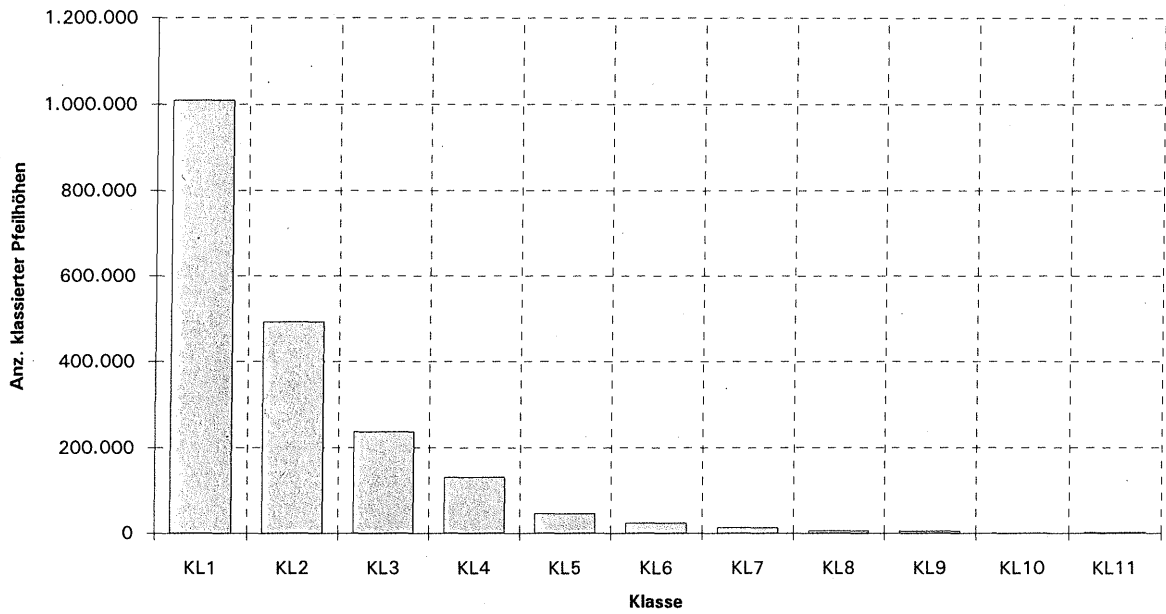


Abb. 8.4: Jahrespfeilhöhenkollektiv, MS2 negativ

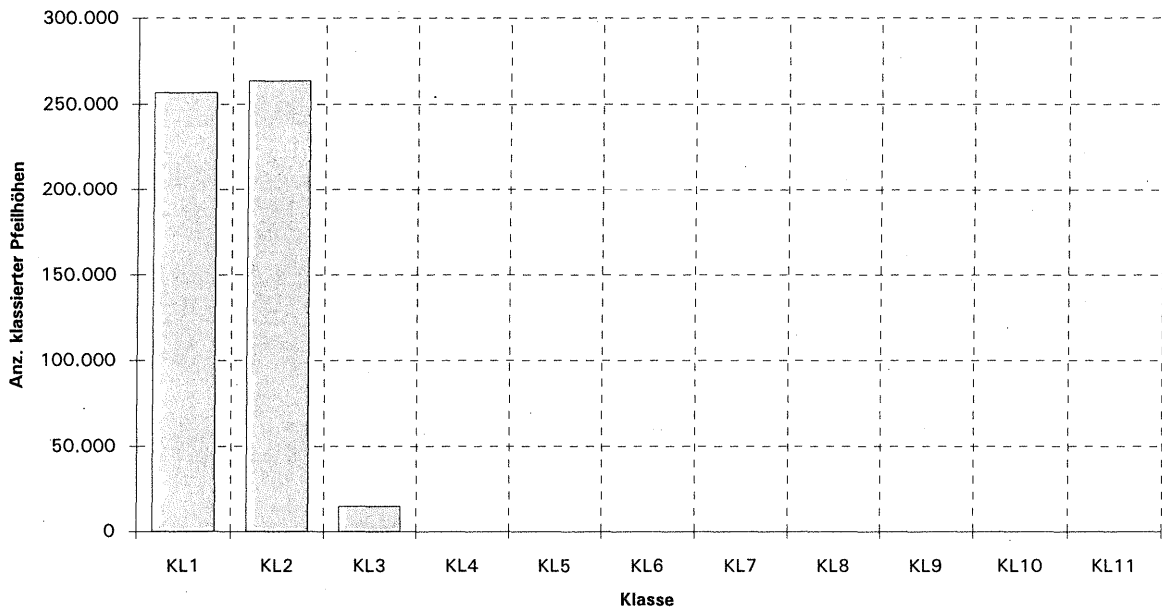


Abb. 8.5: Jahrespfeilhöhenkollektiv, MS3 positiv

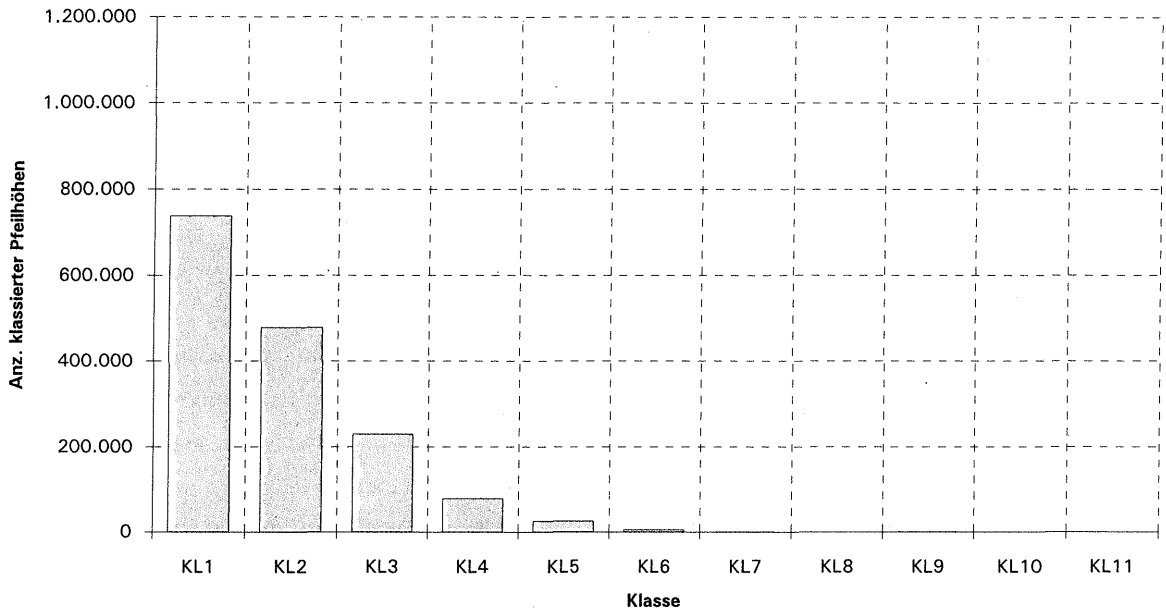


Abb. 8.6: Jahrespfeilhöhenkollektiv, MS4 negativ

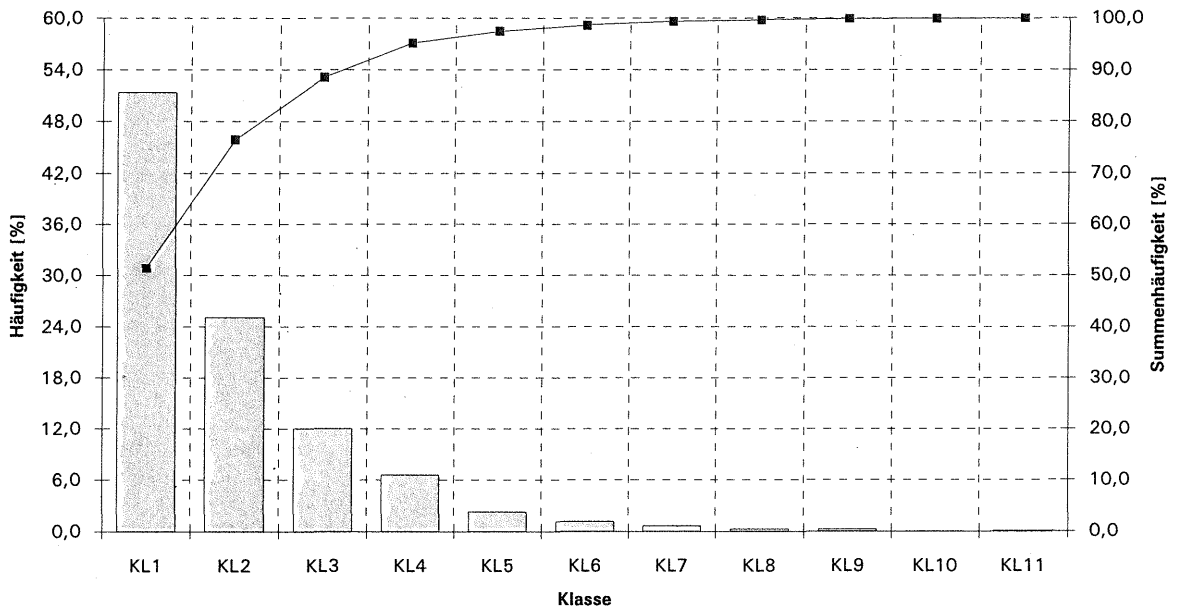


Abb. 8.7: Jahrespfeilhöhenkollektiv, Prozentwerte MS2 negativ

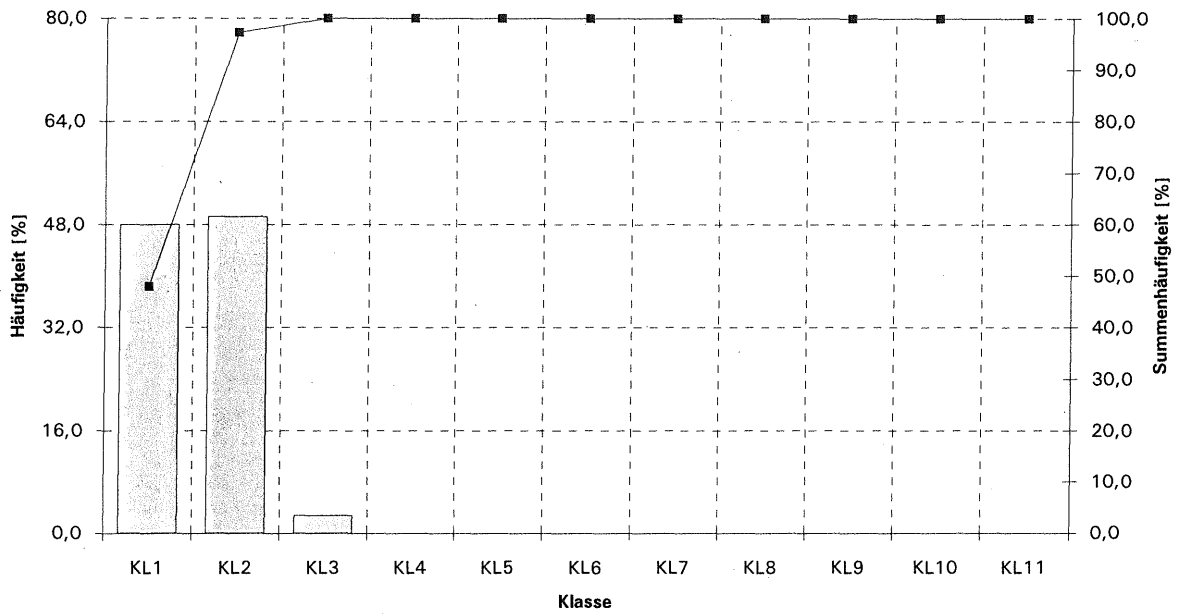


Abb. 8.8: Jahresfeilhöhenkollektiv, Prozentwerte MS3 positiv

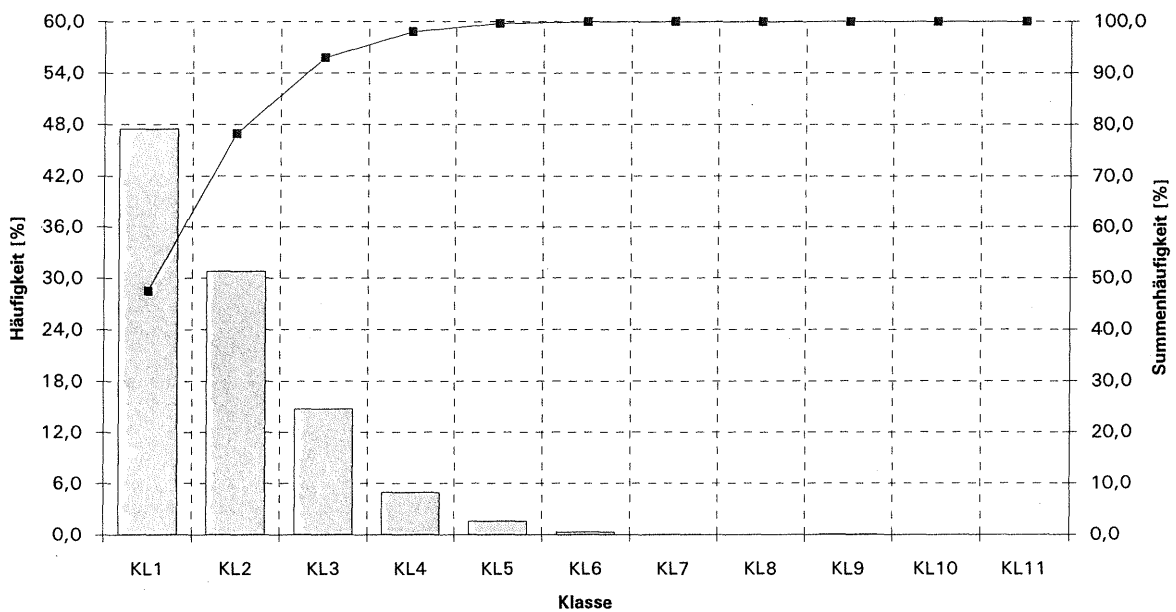


Abb. 8.9: Jahresfeilhöhenkollektiv, Prozentwerte MS4 negativ

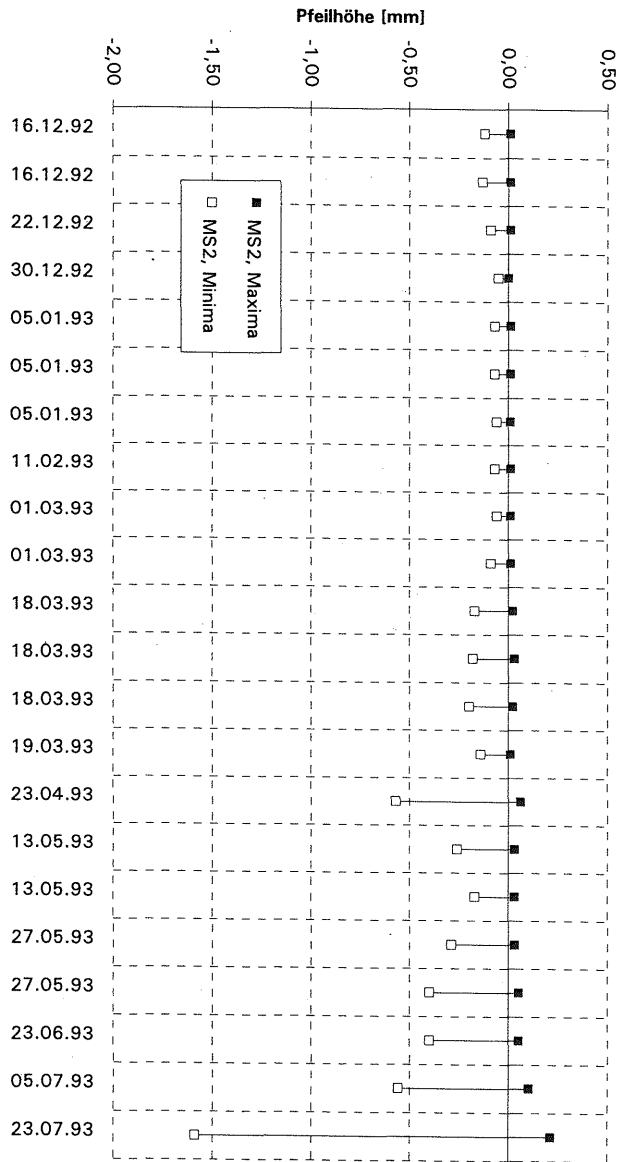


Abb. 8.10: Extremwerte klassierter Pfeilhöhen, MS2 negativ

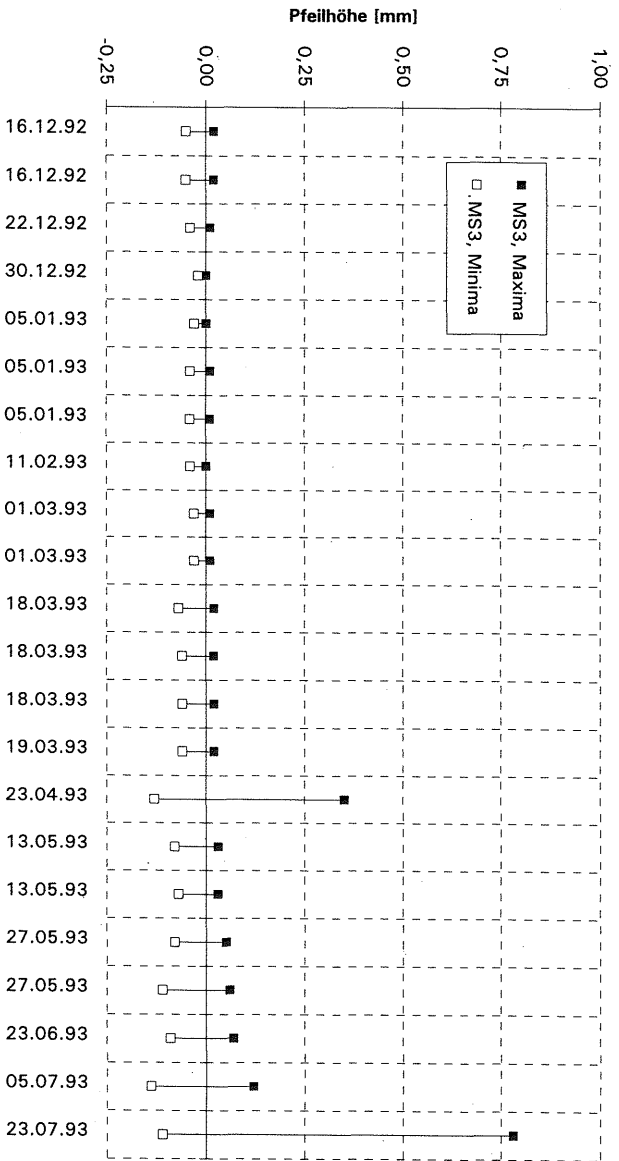


Abb. 8.11: Extremwerte klassierter Pfeilhöhen, MS3 positiv

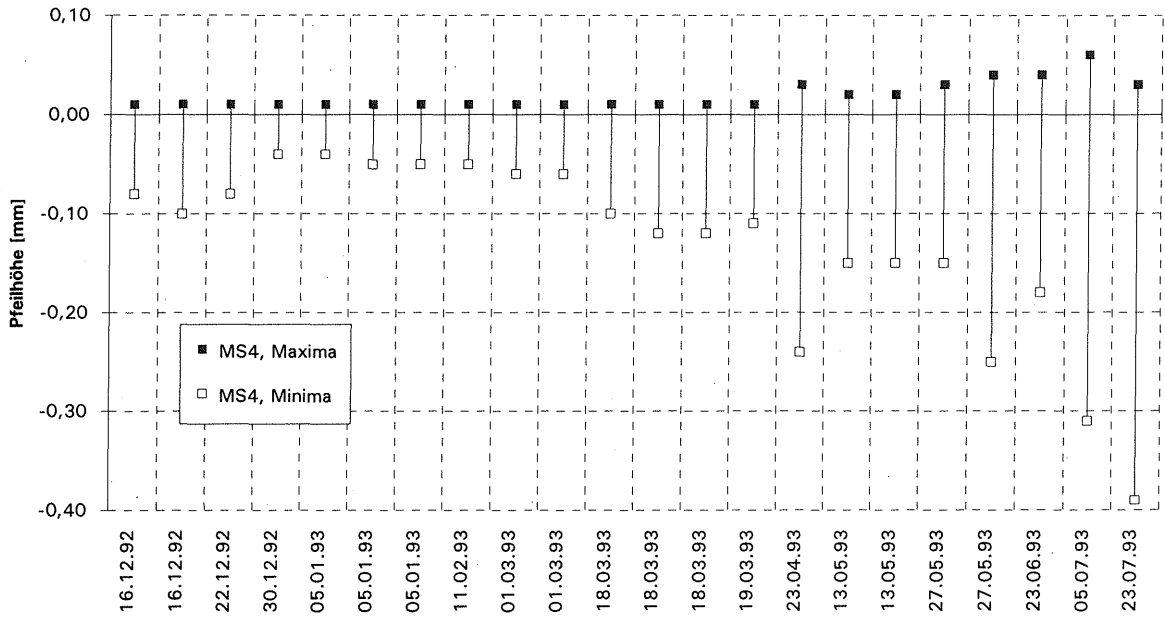


Abb. 8.12: Extremwerte klassierter Pfeilhöhen, MS4 negativ

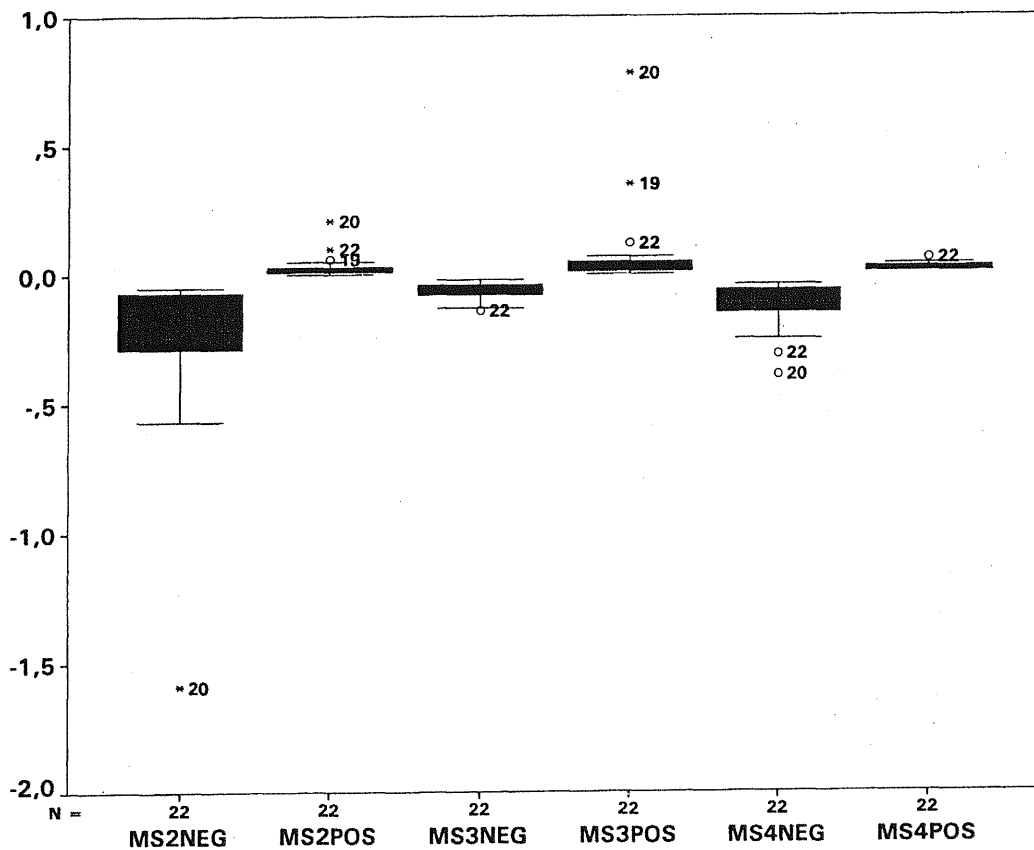


Abb. 8.13: Stem and Leaf-Plot, Meßstellen MS2, MS3 und MS4

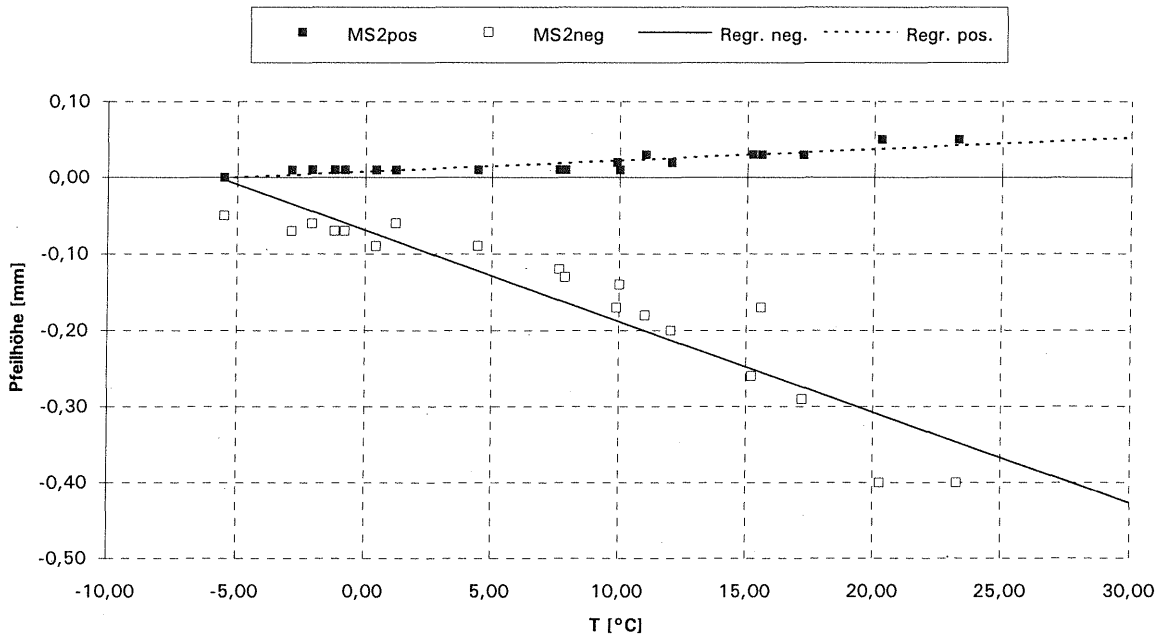


Abb. 8.14: Regressionsrechnung Pfeilhöhe - Temperatur, MS2

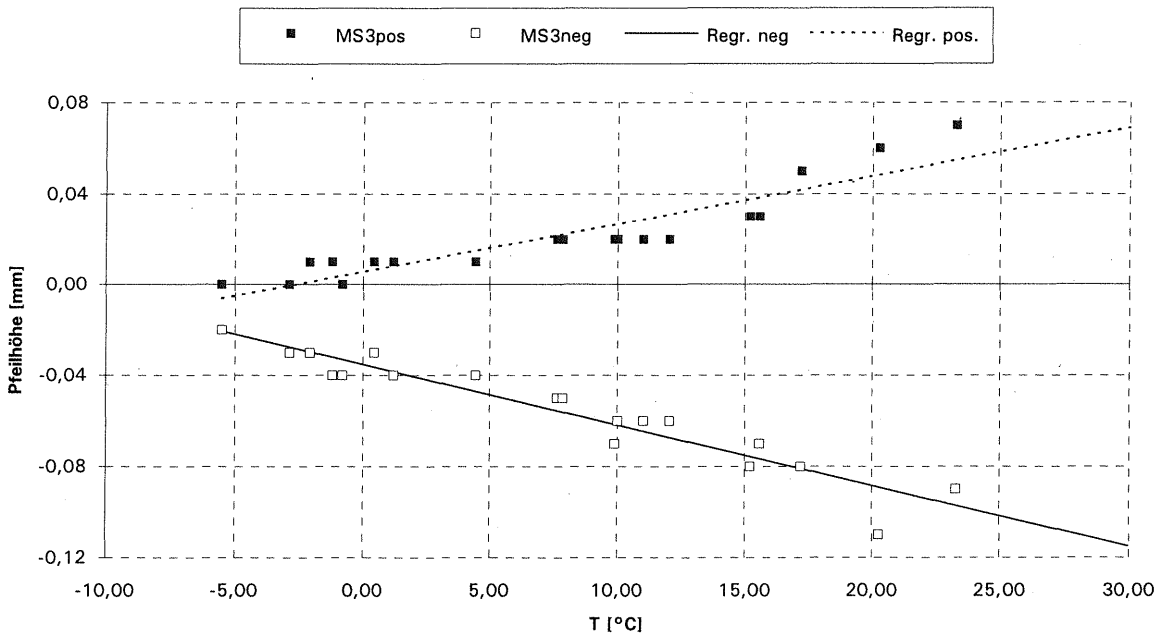


Abb. 8.15: Regressionsrechnung Pfeilhöhe - Temperatur, MS3

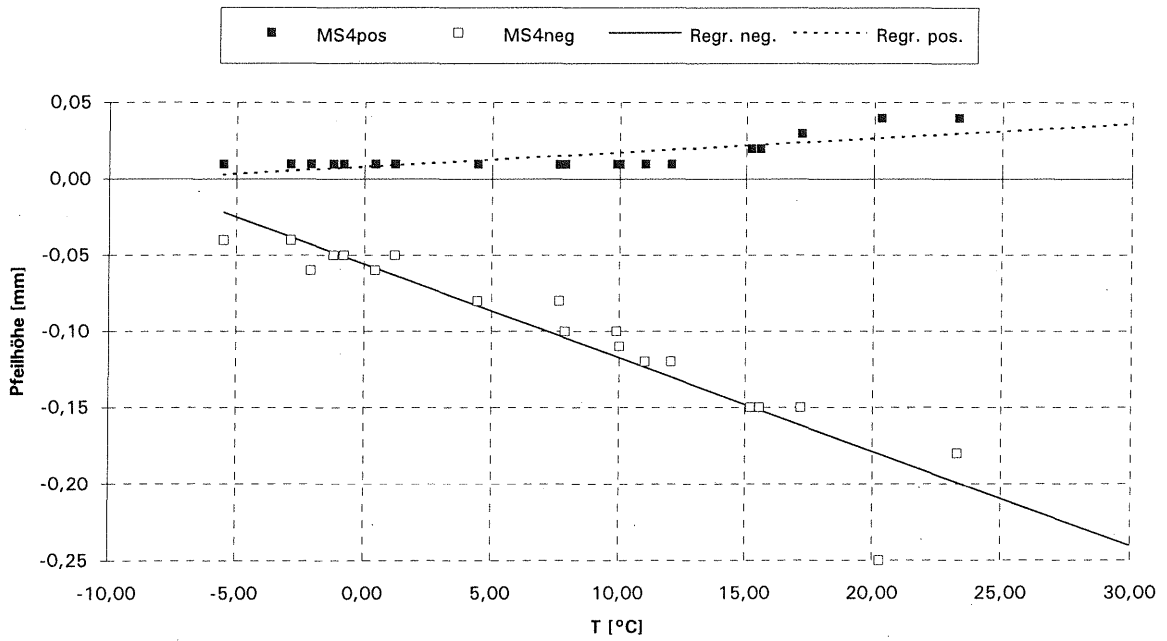


Abb. 8.16: Regressionsrechnung Pfeilhöhe - Temperatur, MS4

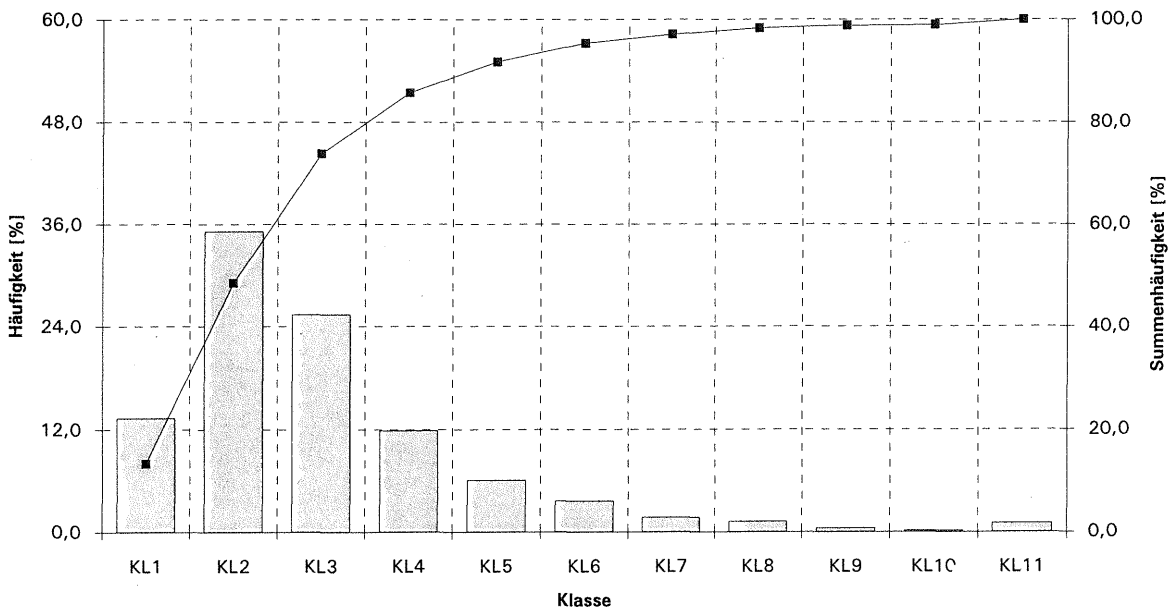


Abb. 8.17: Jahrespfeilhöhenkollektiv für $T = 20\text{ °C}$, Prozentwerte, MS2 negativ

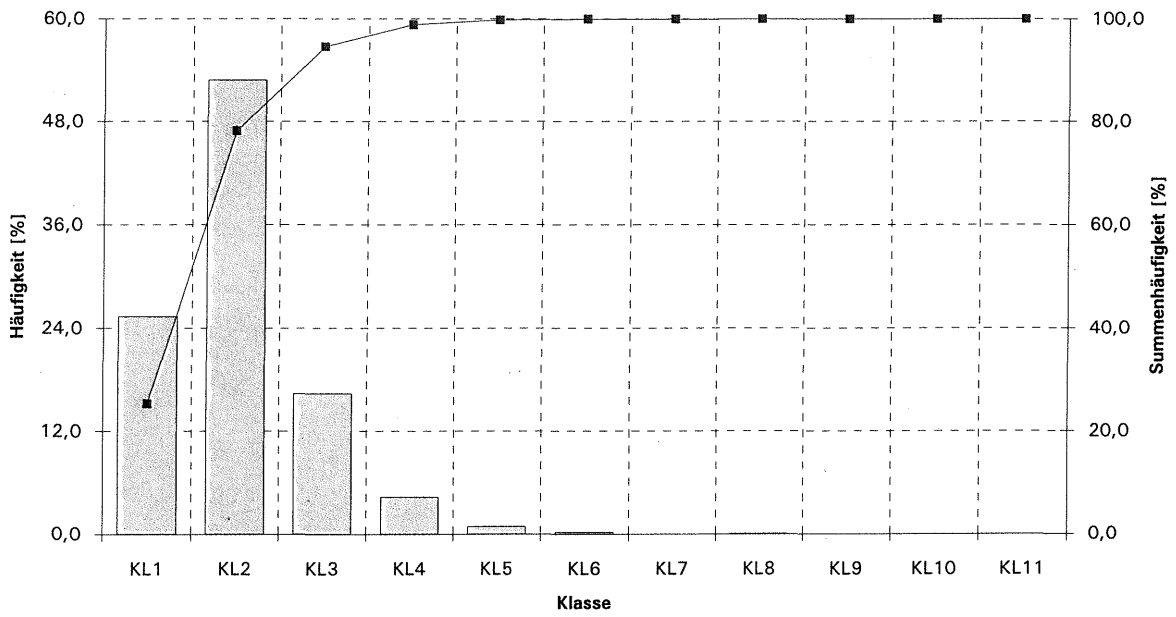


Abb. 8.18: Jahresfeilhöhenkollektiv für T = 20 °C, Prozentwerte, MS4 negativ

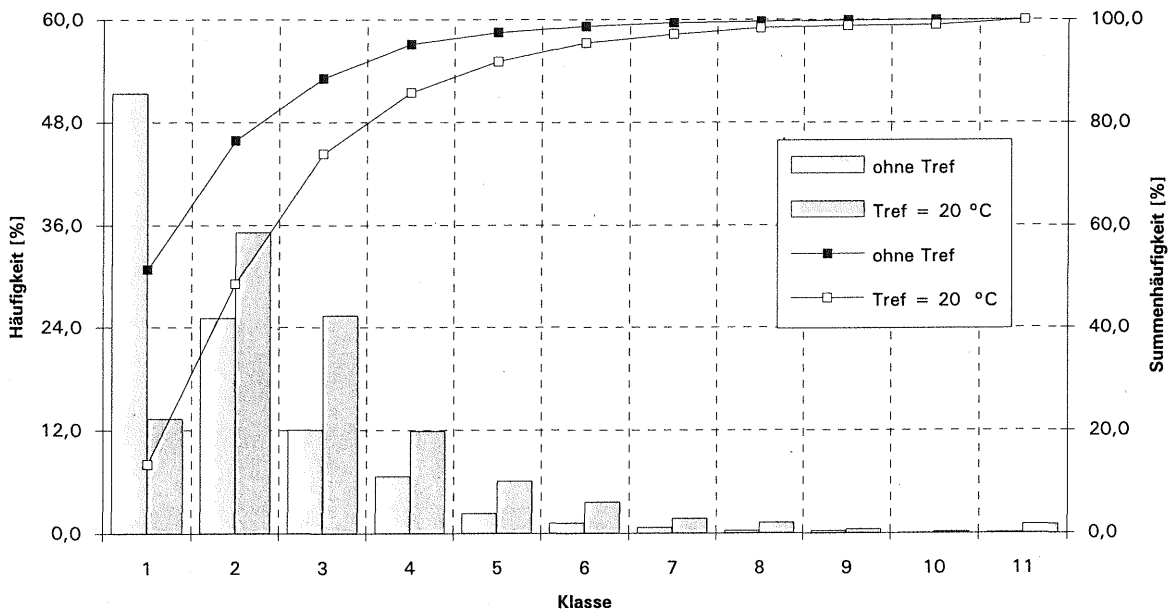


Abb. 8.19: Vergleich der Jahresfeilhöhenkollektive mit und ohne Temperaturkorrektur, Prozentwerte, MS2 negativ

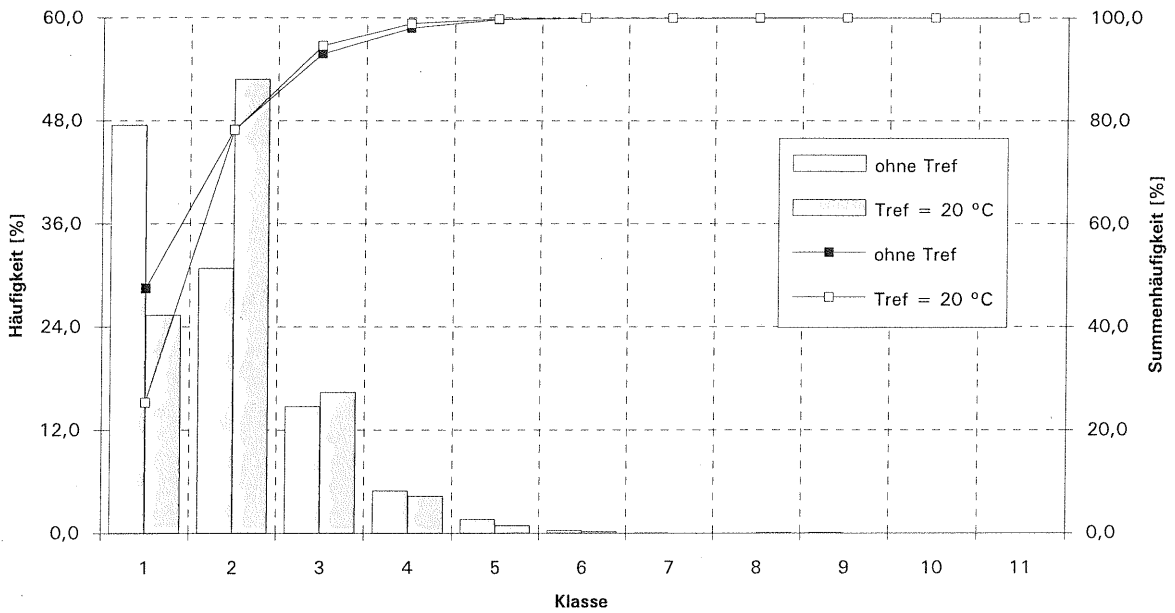


Abb. 8.20: Vergleich der Jahresfeilhöhenkollektive mit und ohne Temperaturkorrektur, Prozentwerte, MS4 negativ

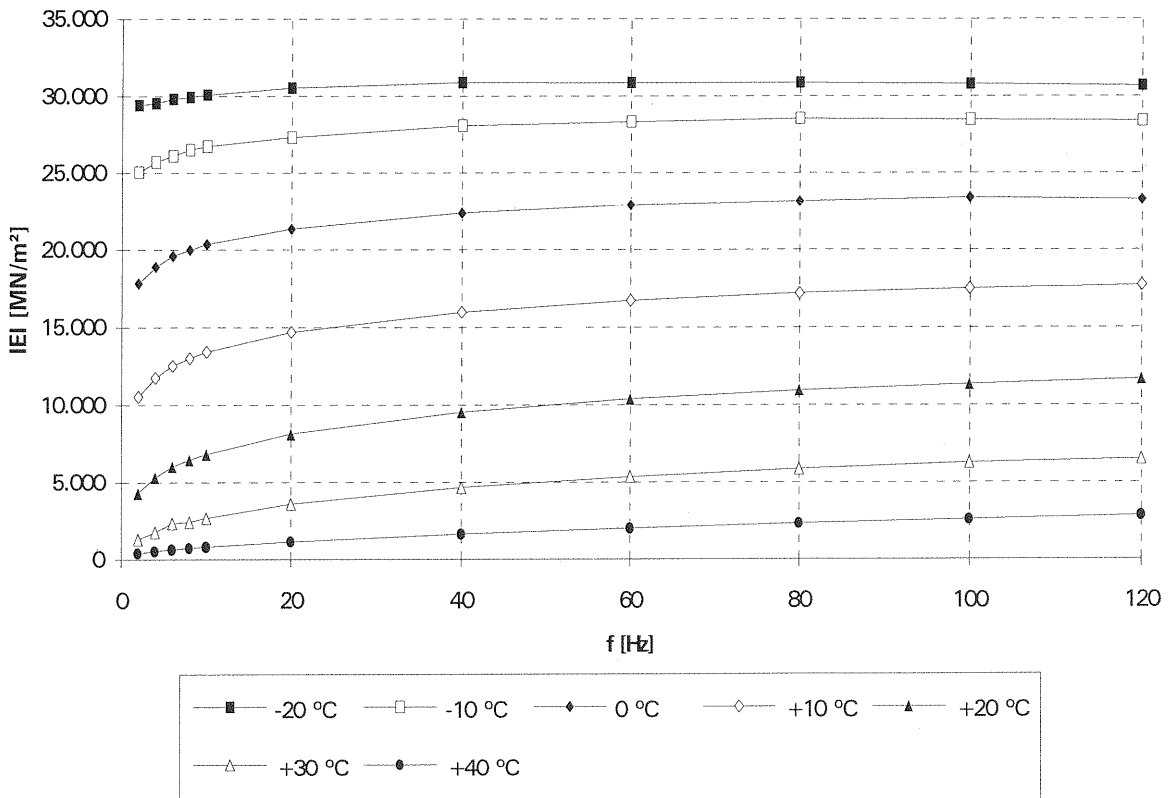


Abb. 9.1: Modul |E| für Gußasphalt 0/11 mm

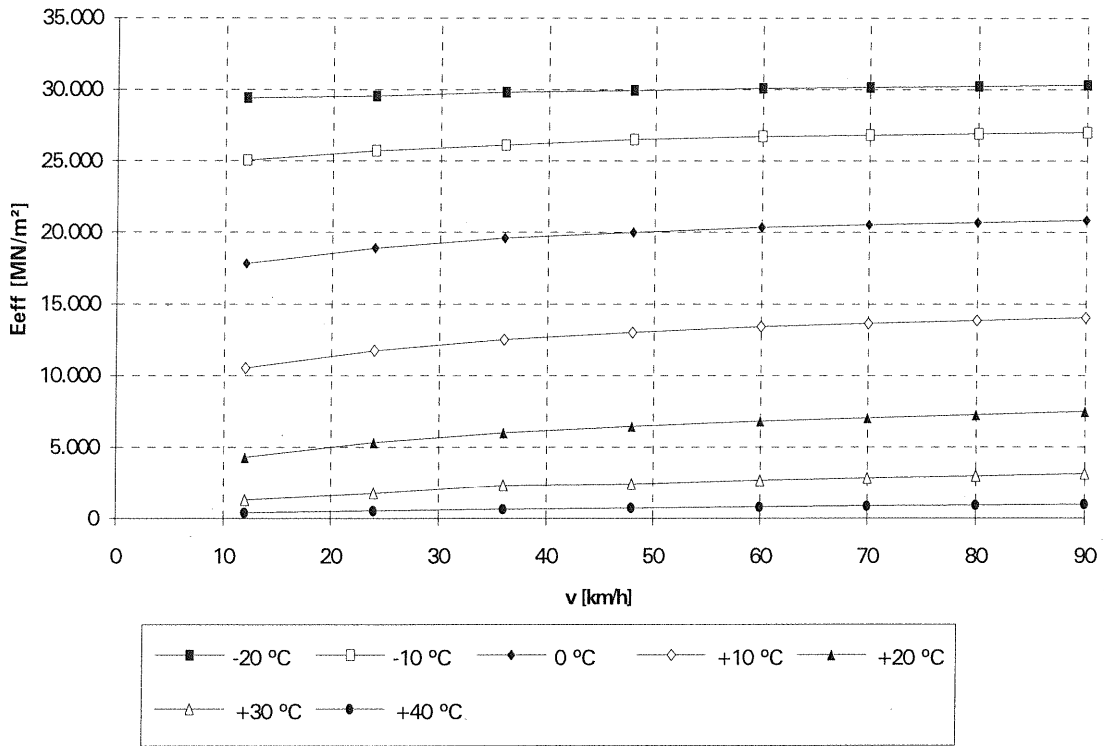


Abb. 9.2: Modul E_{eff} für Gußasphalt 0/11 mm

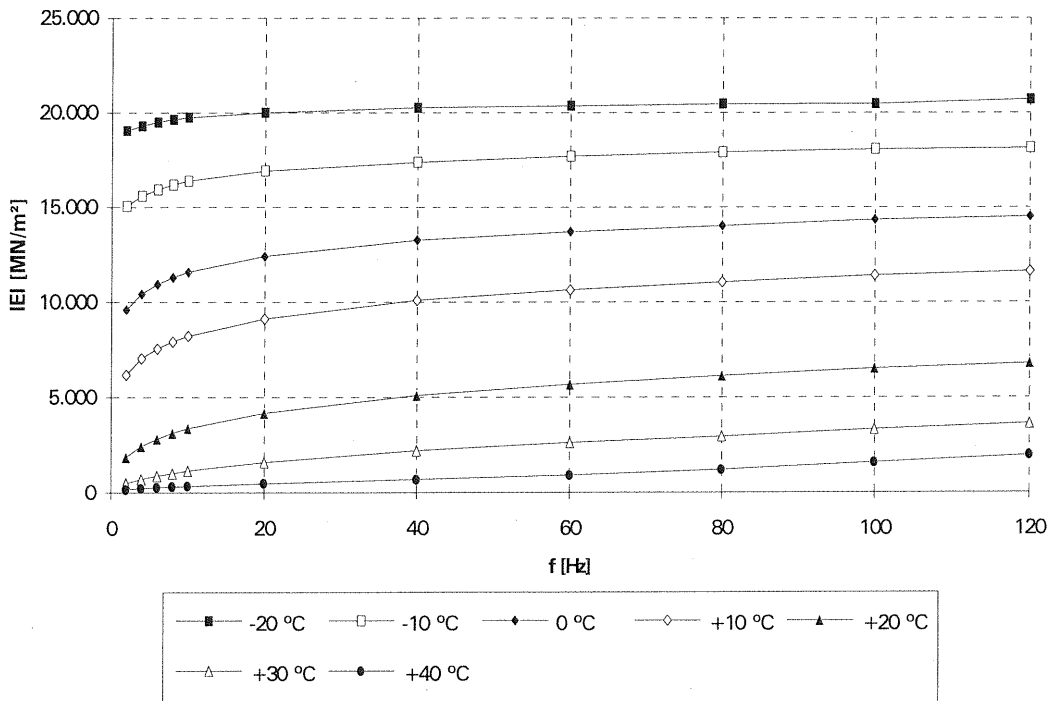


Abb. 9.3: Modul $|E|$ für Oktaphalt 0/5 mm

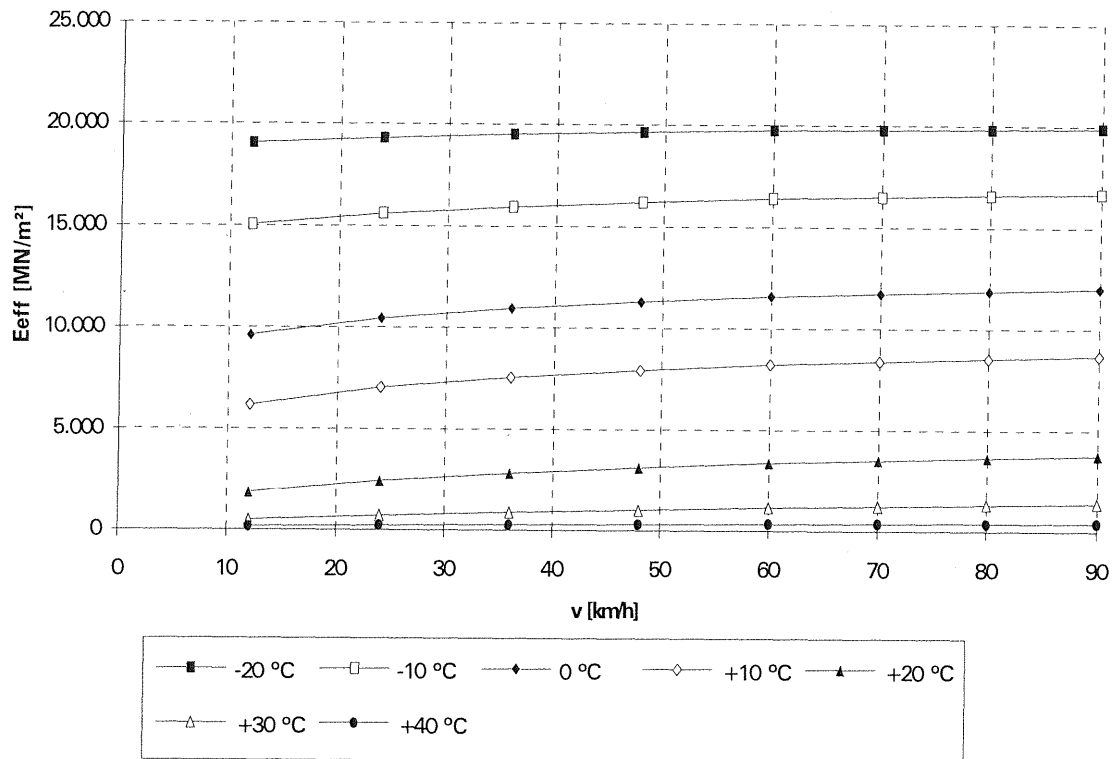


Abb. 9.4: Modul E_{eff} für Oktaphalt 0/5 mm

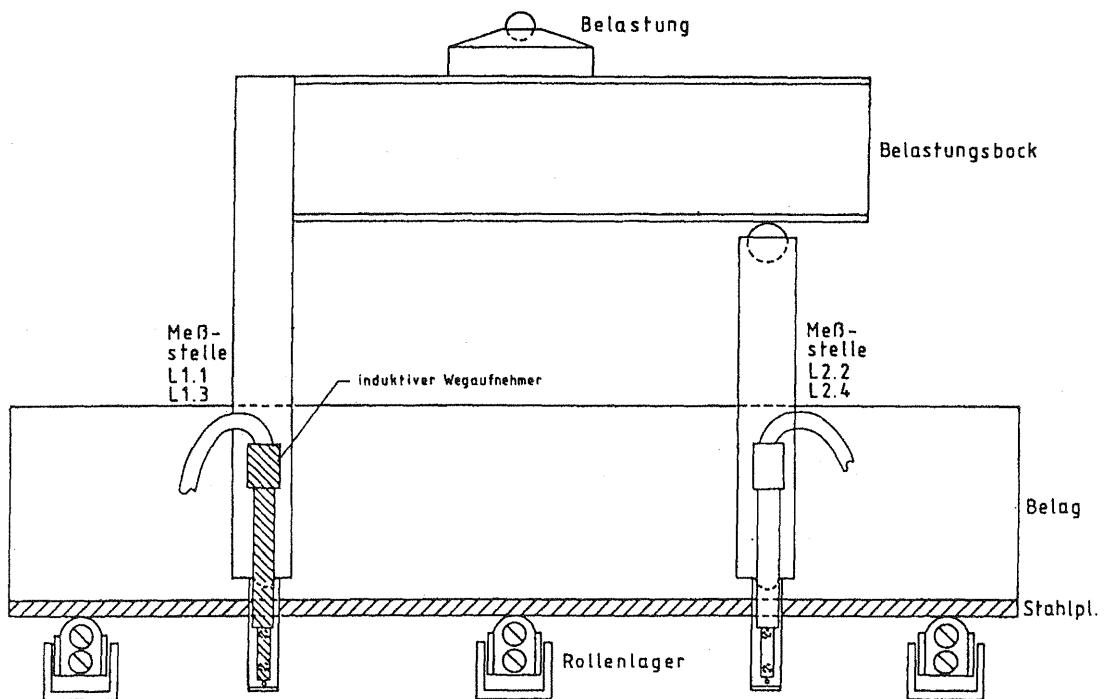
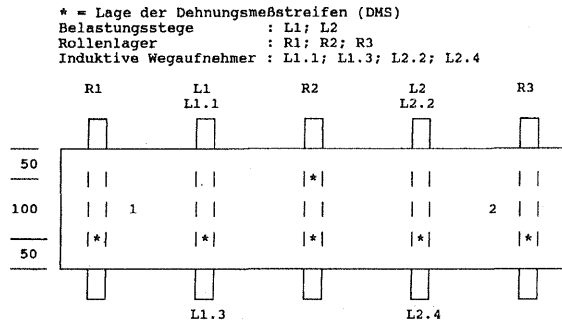


Abb. 9.5: Versuchsaufbau, Dauerschwellbiegeprüfung



* = Lage der Dehnungsmeßstreifen (DMS)
 Die DMS befinden sich auf der Oberseite der Stahlplatte sowie auf der Oberseite der jeweiligen Belagsschicht.
 Belastungsstege : L1; L2
 Rollenlager : R1; R2; R3

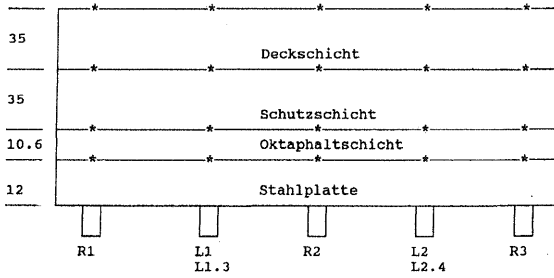


Abb. 9.6: Anordnung der Dehnungsmeßstreifen und induktiven Wegaufnehmer

FBM Dehnungsmeßstreifen
Strain Gauges
Jauges d'extensométrie

Widerstand
Resistance
Résistance: 350.0 [Ω] ± 0.35 %

k-Faktor
Gauge factor
Facteur k: 2,05 ± 1 %

Querempfindlichkeit
Transverse Sensitivity
Sensibilité transversale: -0,5 %

Temperaturkompensation: Angepaßt für
Temperature Compensation: Compensated for
Compensation de température: Compensation pour
 $\alpha = 10.9 [10^{-6} / ^\circ\text{C}]$

Stahl
Steel
Acier Alumi-
num Sonstige
Other
Autre

Typ **10/350LY11**

Stückzahl
Quantity
Quantité: 10 mit
with
avec ohne
without
sans Applikationshilfe
Application aid
Support d'aide à
l'application

Temperaturkoeffizient
des k-Faktors
Temperature coefficient
of gauge factor: 104 ± 10 [$10^{-6} / ^\circ\text{C}$]

Koeffizient de température
du facteur k: (-10...+45 $^\circ\text{C}$)

Artikel Nr.
Part No.
No. de Réf.: 1-LY11-10/350

Folienlos
Lot
Lot de la feuille: A257/24

Herstellungsjahr
Batch
Lot de fabrication: BV6653200/2

Alle technischen Daten nach OML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2835. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an.
 All technical data in accordance with OML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2835 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number.
 Toutes caractéristiques techniques selon OML IR 62 et VDI/VDE 2835 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jaugé ainsi que le lot de fabrication.

Temperaturgang der Dehnungsmeßstreifen bei Applikation auf Werkstoffen mit unmaßig angelegtem Wärmeeinwirkungskoeffizienten α . Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.
 Kennlinie 1: DMS ohne Anschlußbändchen
 Kennlinie 2: DMS mit Anschlußbändchen (20 mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen.
 T = Temperatur in $^\circ\text{C}$ L = einfache Bändchenlänge in mm

The thermal output refers to strain gauges when bonded to materials with the coefficient of thermal expansion α given overhead. Values are measured at a continuous temperature progression.
 Curve 1: Gauges without connecting leads
 Curve 2: Gauges with connecting leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, than the thermal output lies between curve 1 and 2. The numeric approximation allows the calculation of the thermal output for any lead length.
 T = temperature in $^\circ\text{C}$ L = simple lead length in mm

Comportement en température des jauges d'extensométrie appliqués sur des matériaux dont les coefficients de dilatation thermique α sont indiqués au verso. Mesuré au cours d'une variation continue de la température.
 Courbe 1: Jauges sans fils de sortie
 Courbe 2: Jauges avec fils de sortie (longueur unitaire du fil de 30 mm). Lorsque les fils sont plus courts, le comportement en température se trouve entre les deux courbes 1 et 2. Le dernier terme de l'équation ci-dessous avec exactitude l'influence des fils de sortie.
 T = température en $^\circ\text{C}$ L = longueur unitaire des fils en mm

$\epsilon_s(T) = -13.9 + 1.57 T - 5.04 \cdot 10^{-2} T^2 + 2.34 \cdot 10^{-4} T^3 + 0.0114 L (T-20) \mu\text{m/m} = 0.3 (\mu\text{m/m}) \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Abb. 9.7: Technische Daten der verwendeten DMS

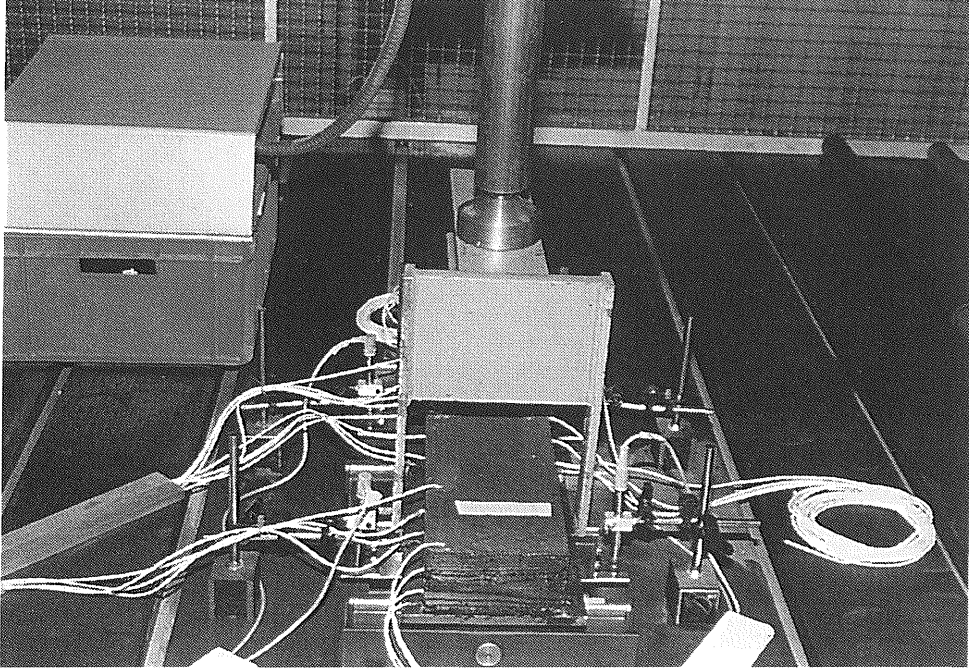


Abb. 9.8: Hydropulsanlage mit eingebautem Versuchsprobekörper

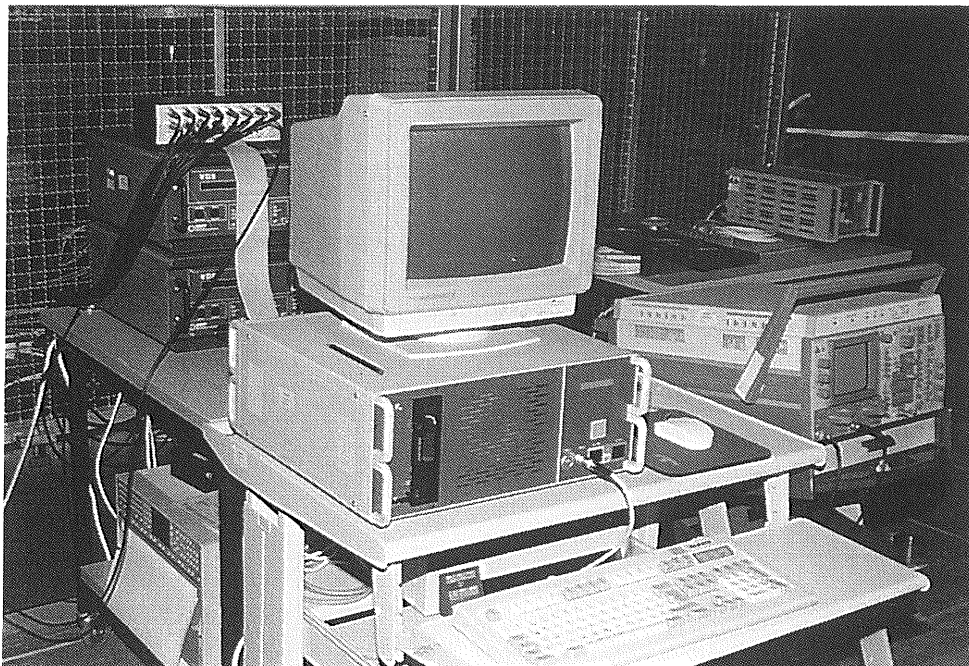


Abb. 9.9: Meßwert erfassungsanlage

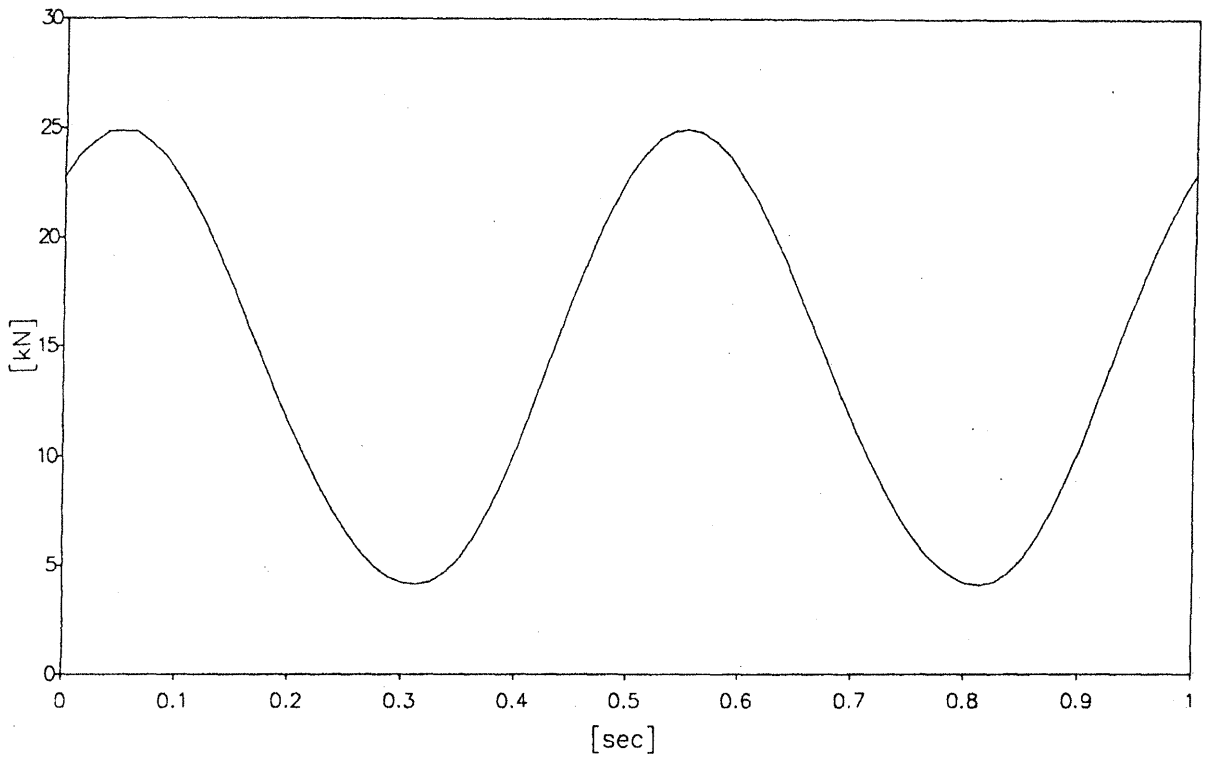


Abb. 9.10: Belastungsamplitude, Versuchsprobekörper 1

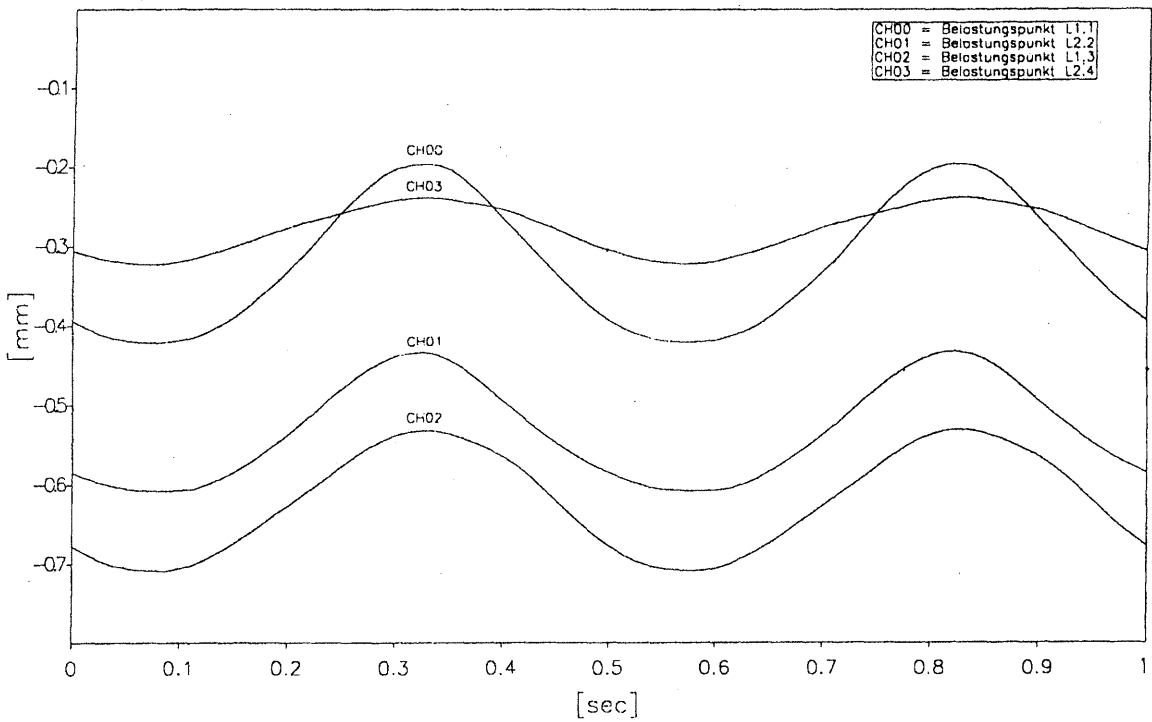


Abb. 9.11: Durchbiegungen, Versuchsprobekörper 1

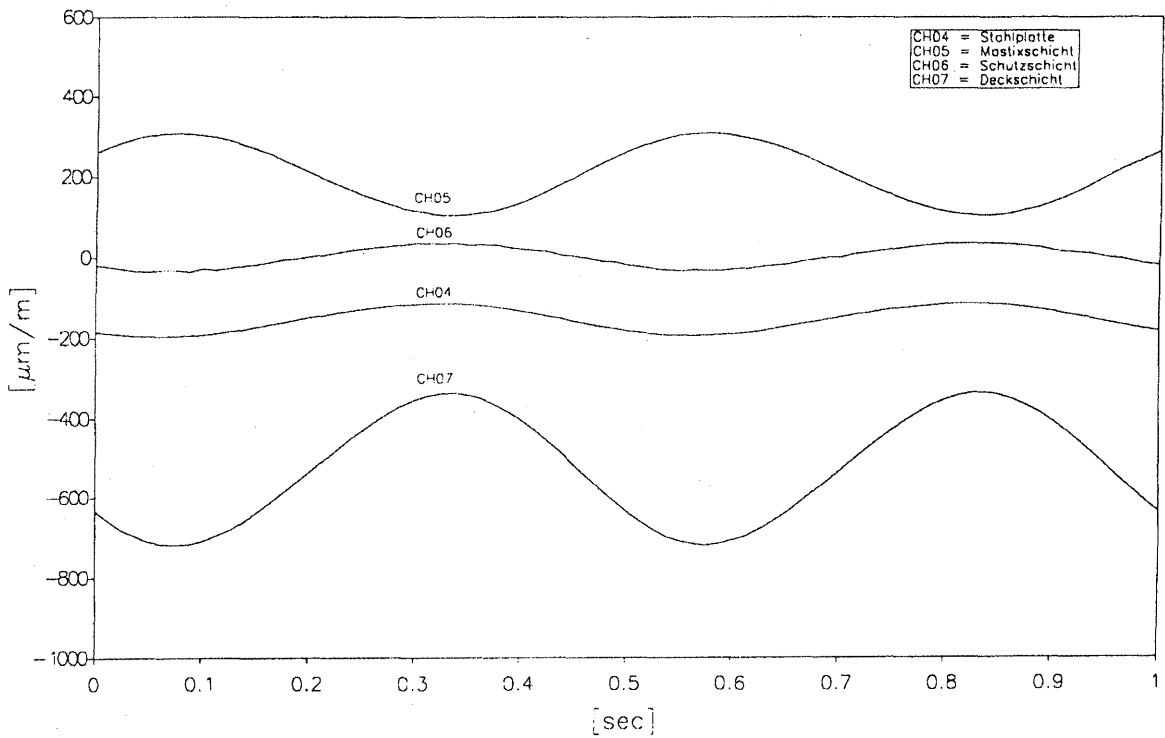


Abb. 9.12: Dehnungen über dem Belastungssteg L2, Versuchsprobekörper 1

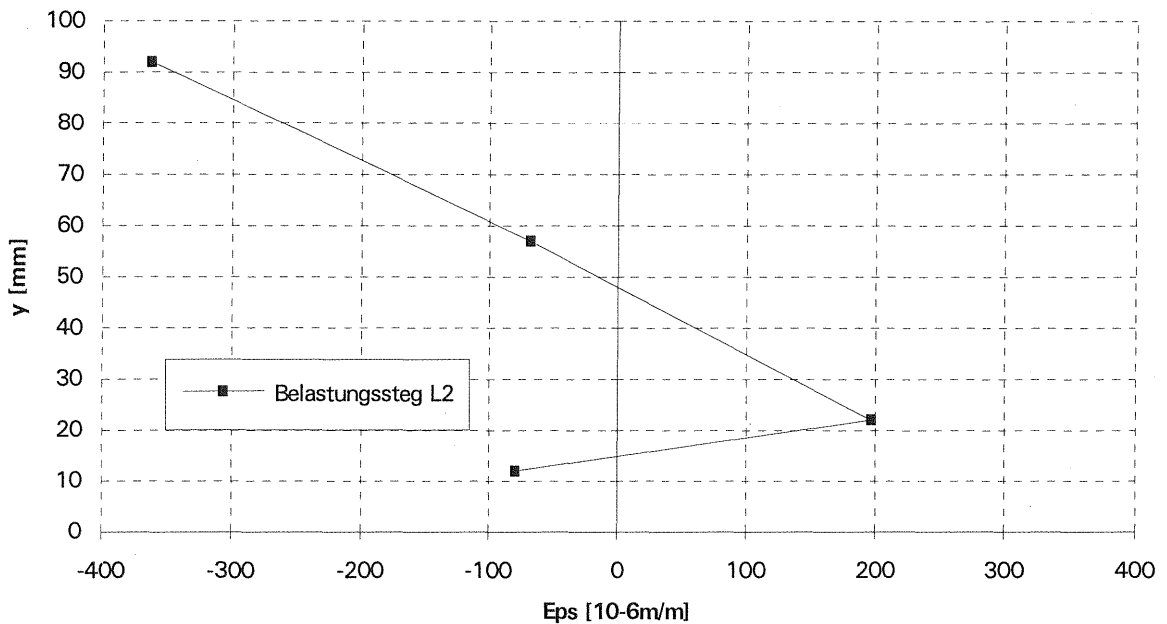


Abb. 9.13: Dehnungsverlauf, Belastungssteg L2, Versuchsprobekörper 1

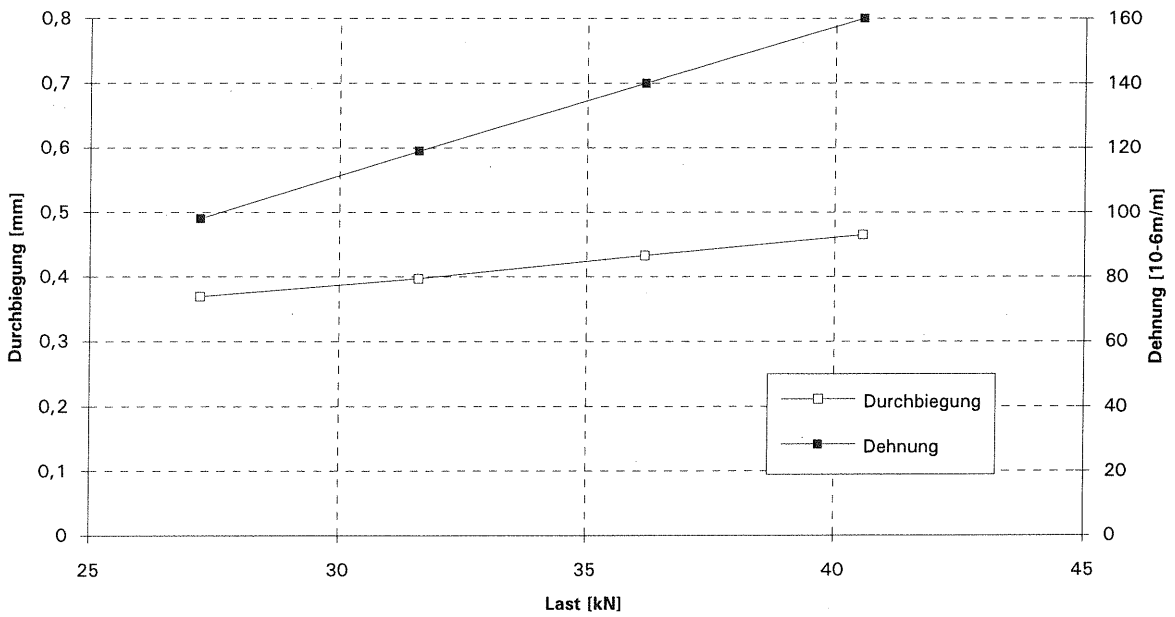


Abb. 9.14: Dehnungen und Durchbiegungen als Funktion der Last, Versuchsprobekörper 1

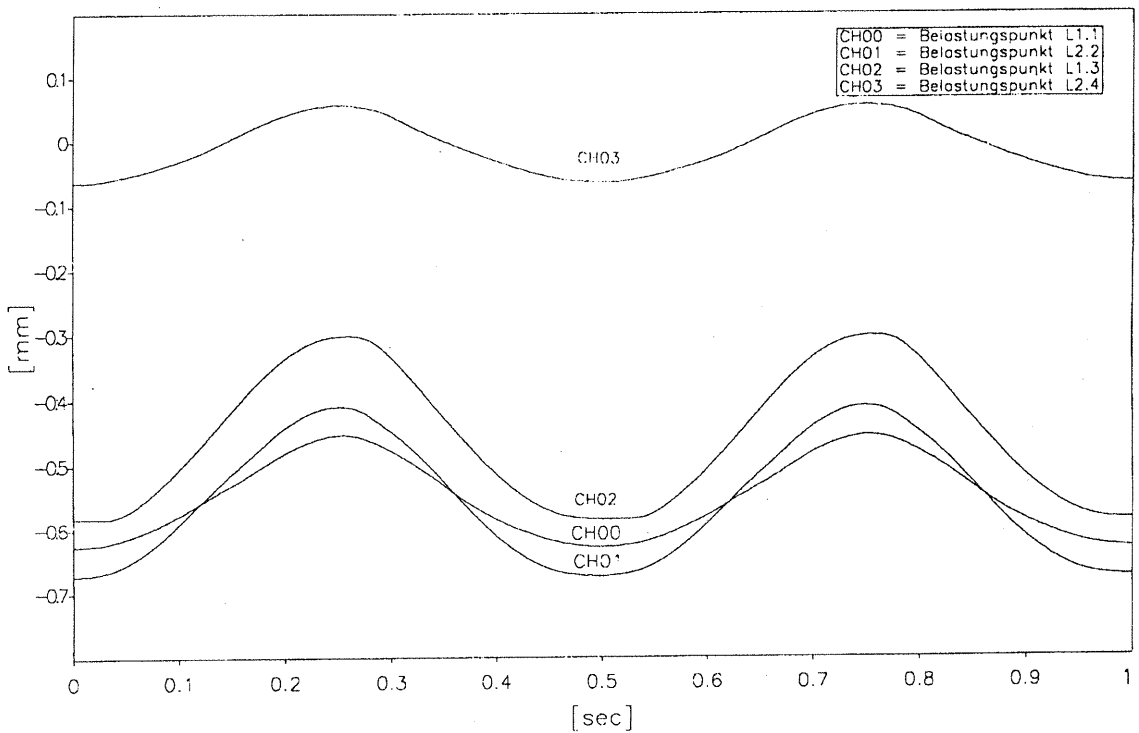


Abb. 9.15: Durchbiegungen, Versuchsprobekörper 2

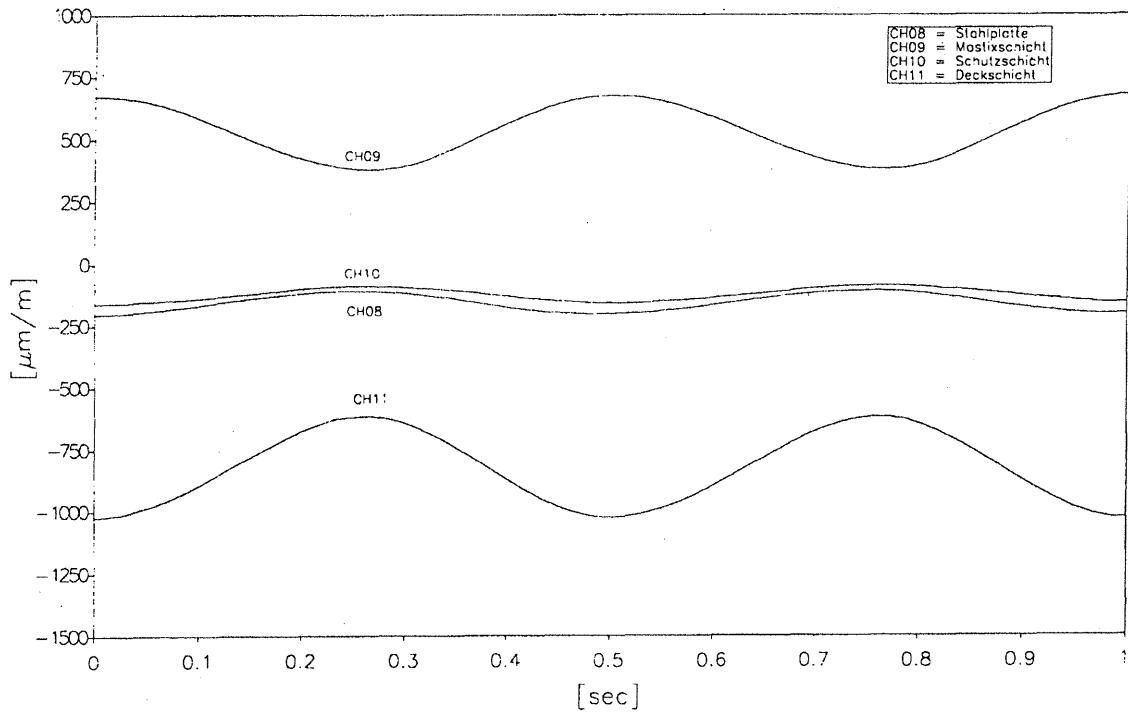


Abb. 9.16: Dehnungen über dem Belastungssteg L2, Versuchsprobekörper 2

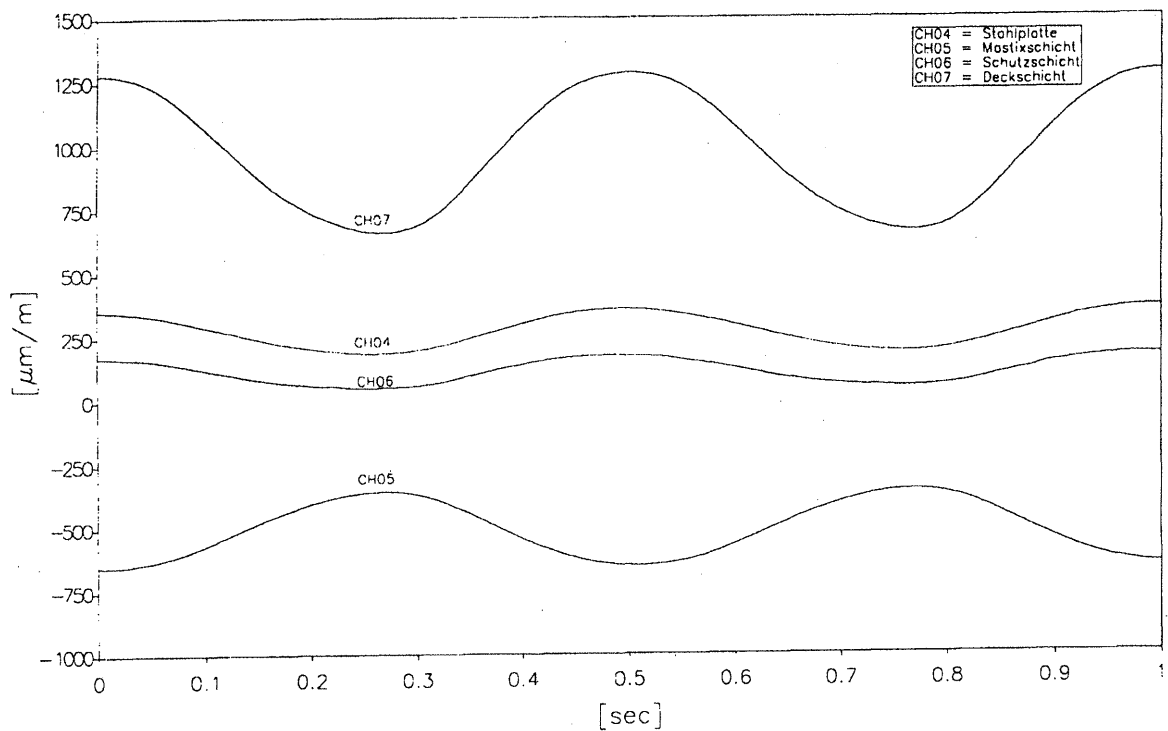


Abb. 9.17: Dehnungen über dem Rollenlager R2, Versuchsprobekörper 2

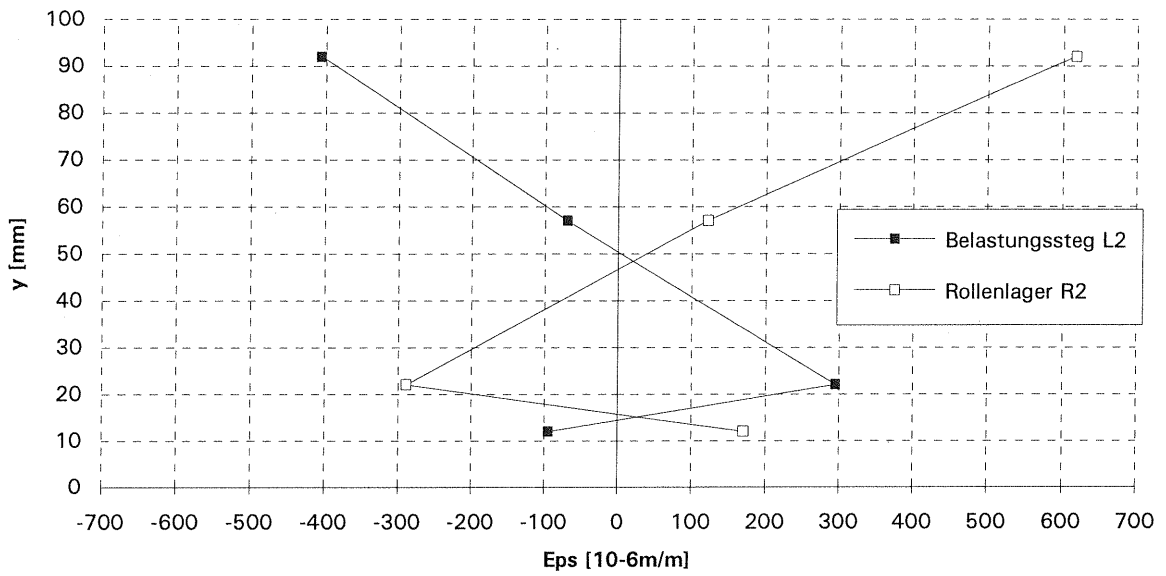


Abb. 9.18: Dehnungsverlauf Belastungssteg L2 und Rollenlager R2, Versuchsprobekörper 2

y

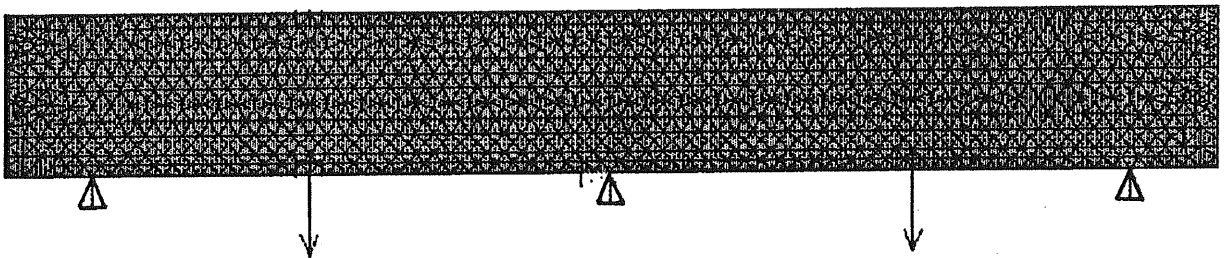


Abb. 10.1: FEM-Modell, Randbedingungen und Belastung

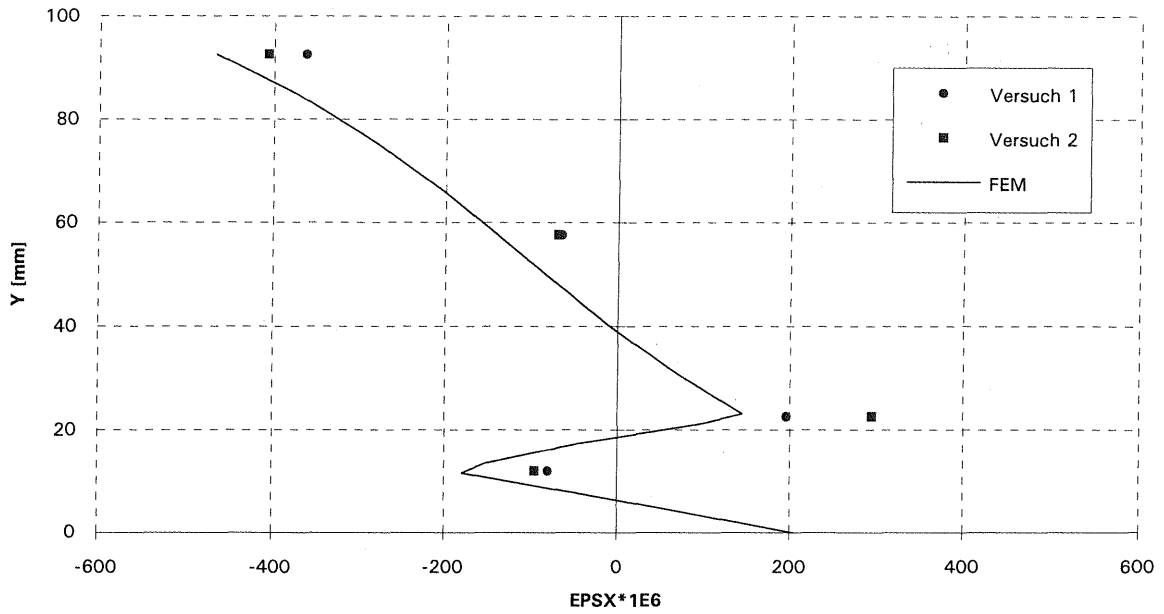


Abb. 10.2: Gegenüberstellung Versuch-Rechnung, Dehnungen Feld

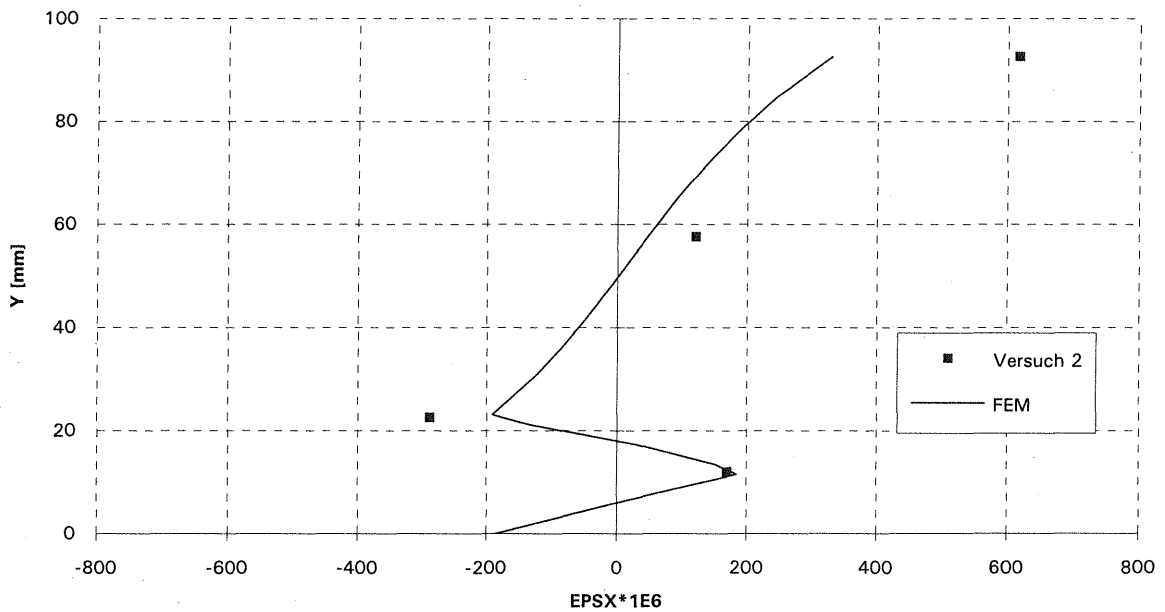


Abb. 10.3: Gegenüberstellung Versuch-Rechnung, Dehnungen Lager

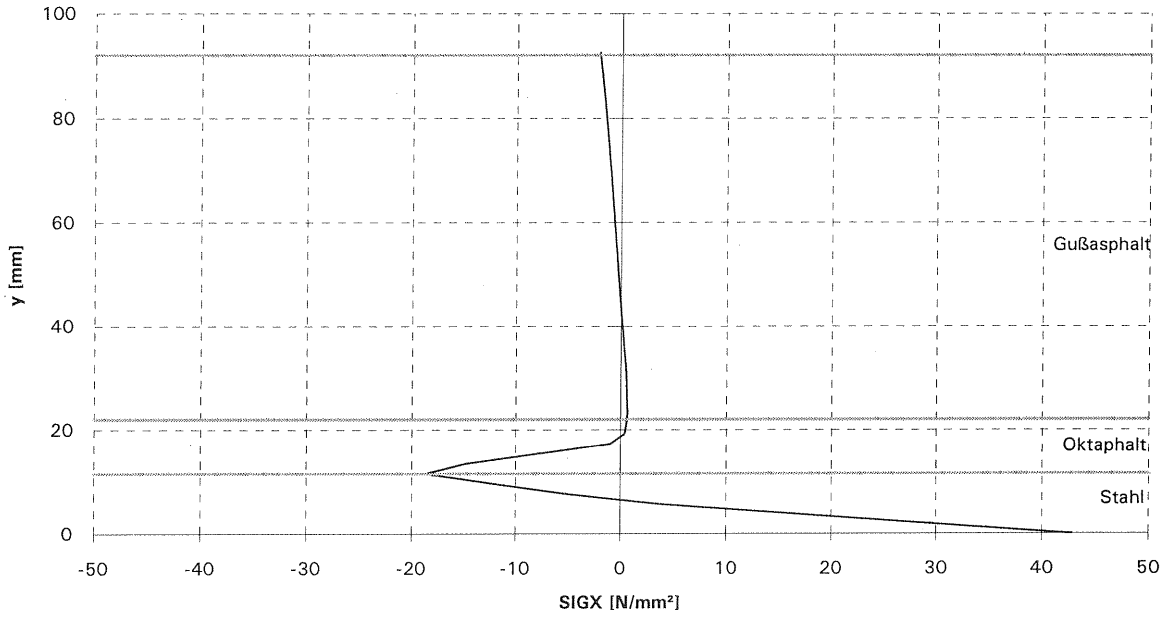


Abb. 10.4: Gegenüberstellung Versuch-Rechnung, Spannungen Feld

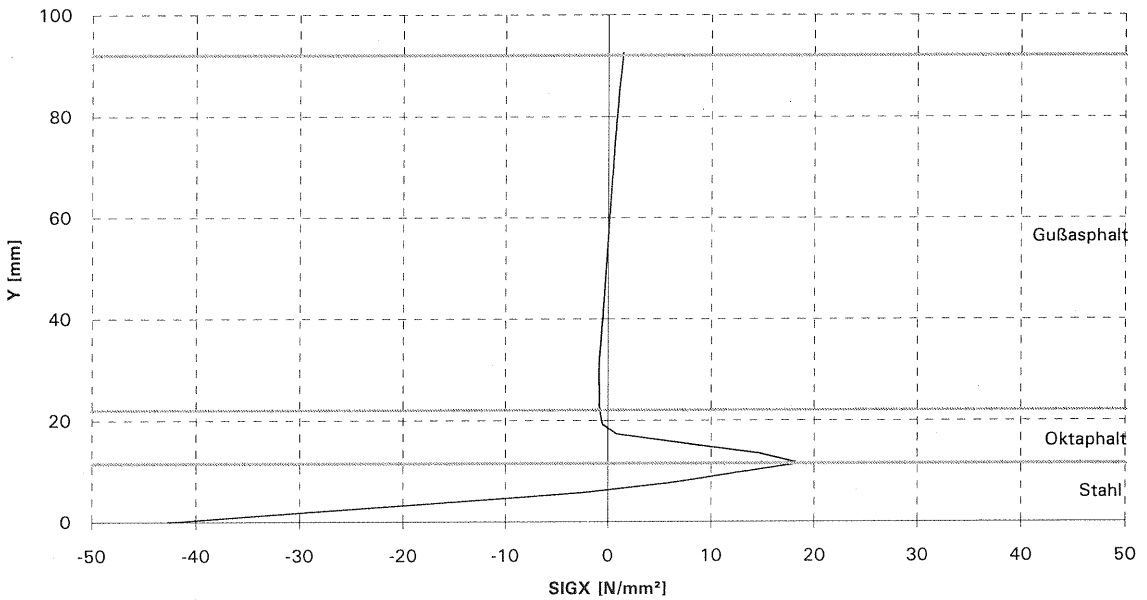


Abb. 10.5: Gegenüberstellung Versuch-Rechnung, Spannungen Lager

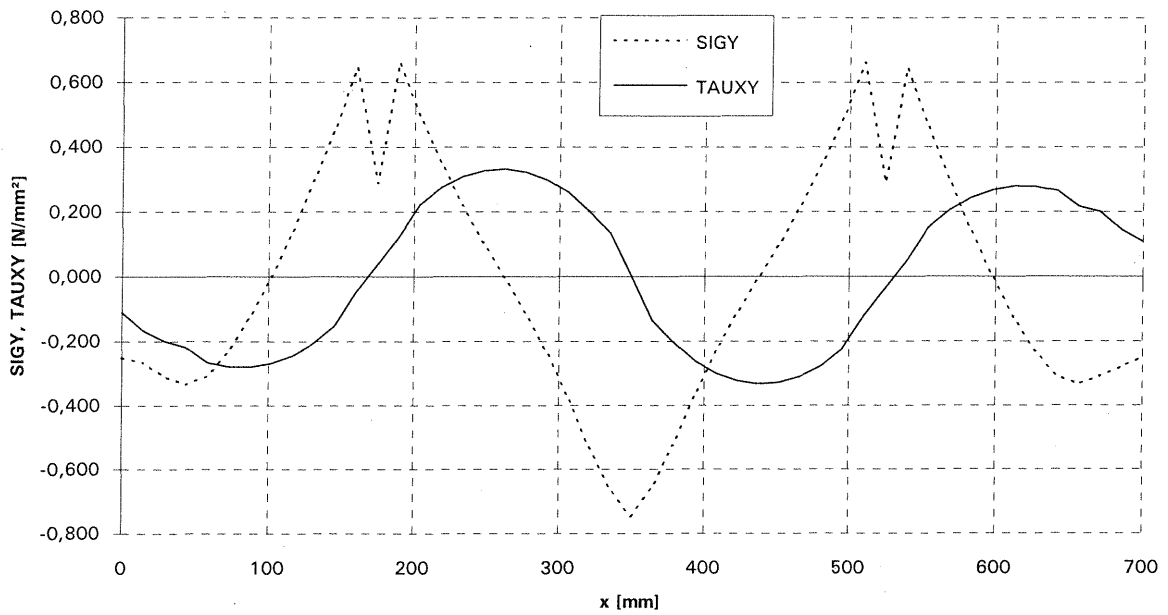


Abb. 10.6: Vertikal- und Schubspannungen in der Oktaphaltschicht

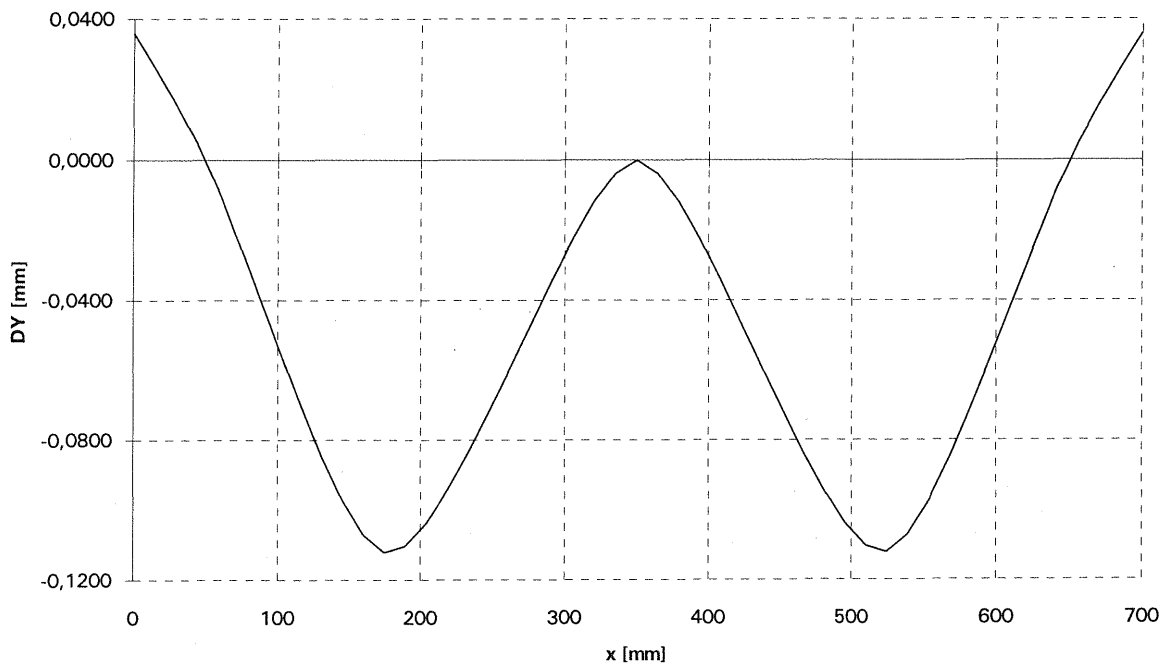


Abb. 10.7: Verschiebungen Unterkante Stahlplatte

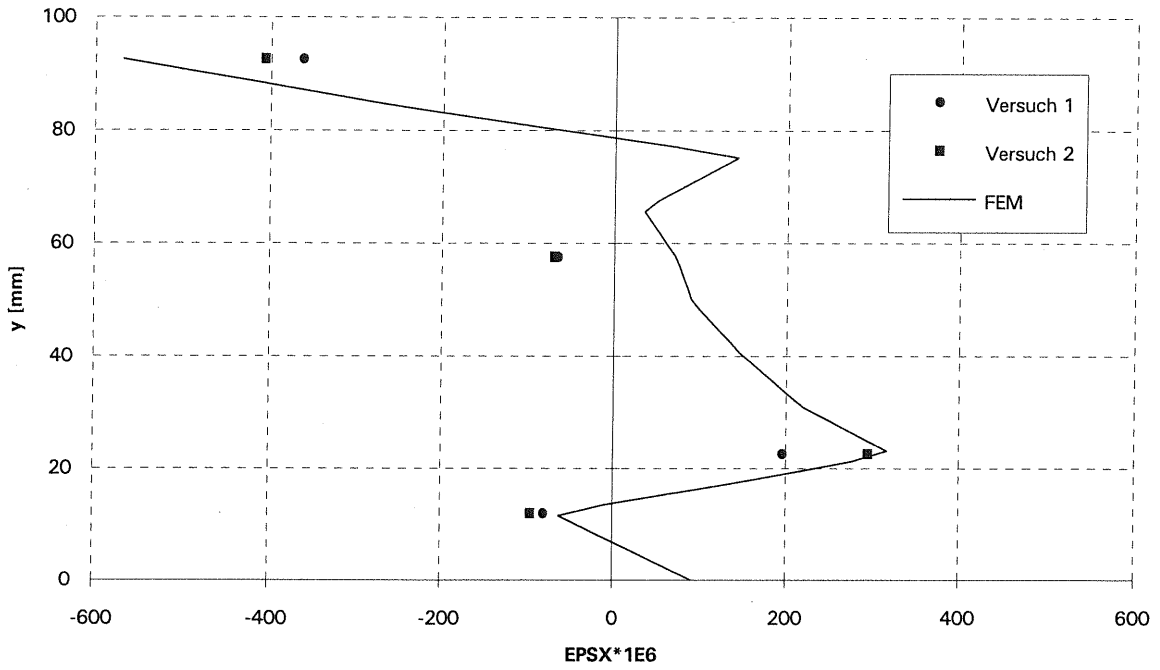


Abb. 10.8: Lasteinleitung auf Gußasphalt, Dehnungen Feld

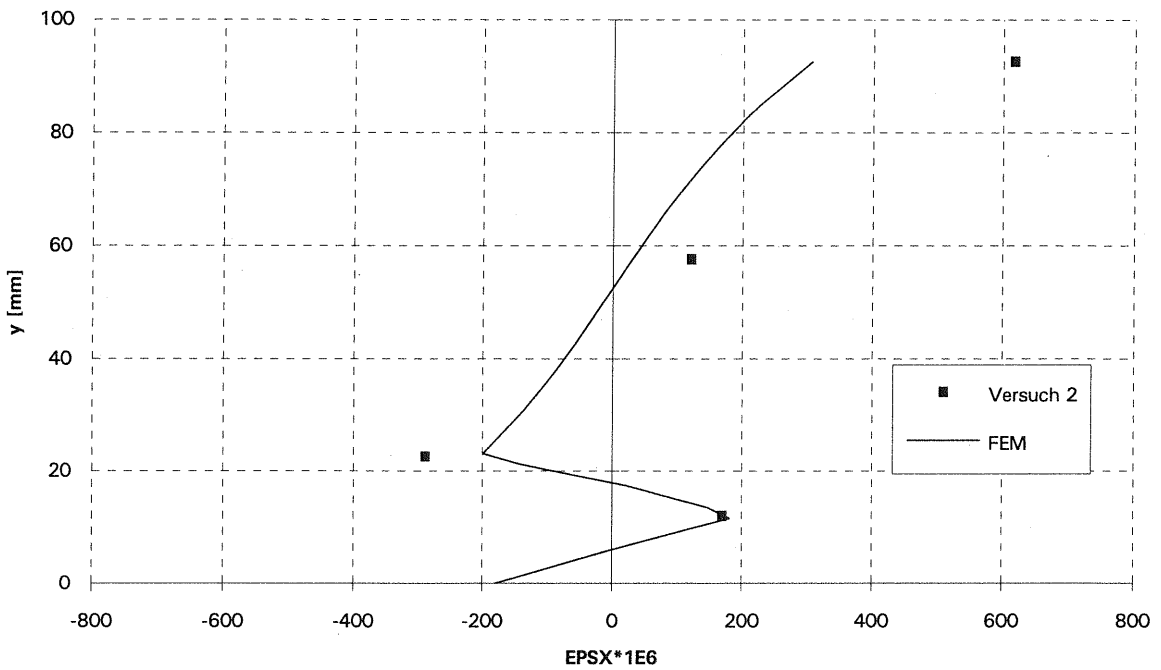


Abb. 10.9: Lasteinleitung auf Gußasphalt, Dehnungen Lager

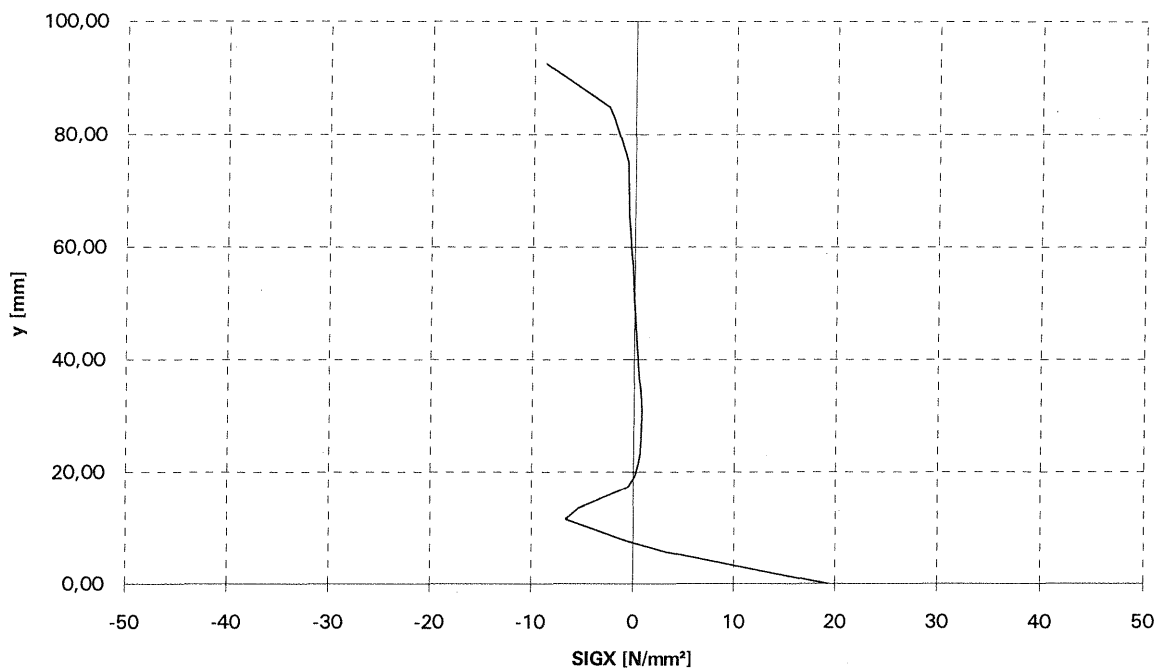


Abb. 10.10: Lasteinleitung auf Gußasphalt, Spannungen Feld

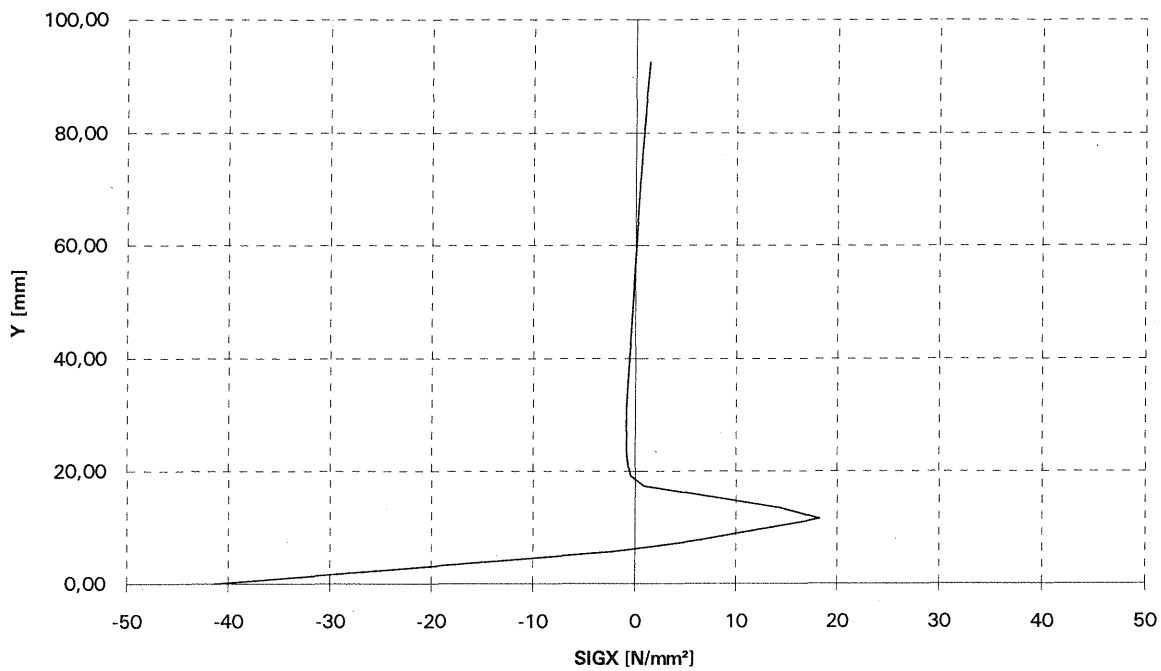


Abb. 10.11: Lasteinleitung auf Gußasphalt, Spannungen Lager

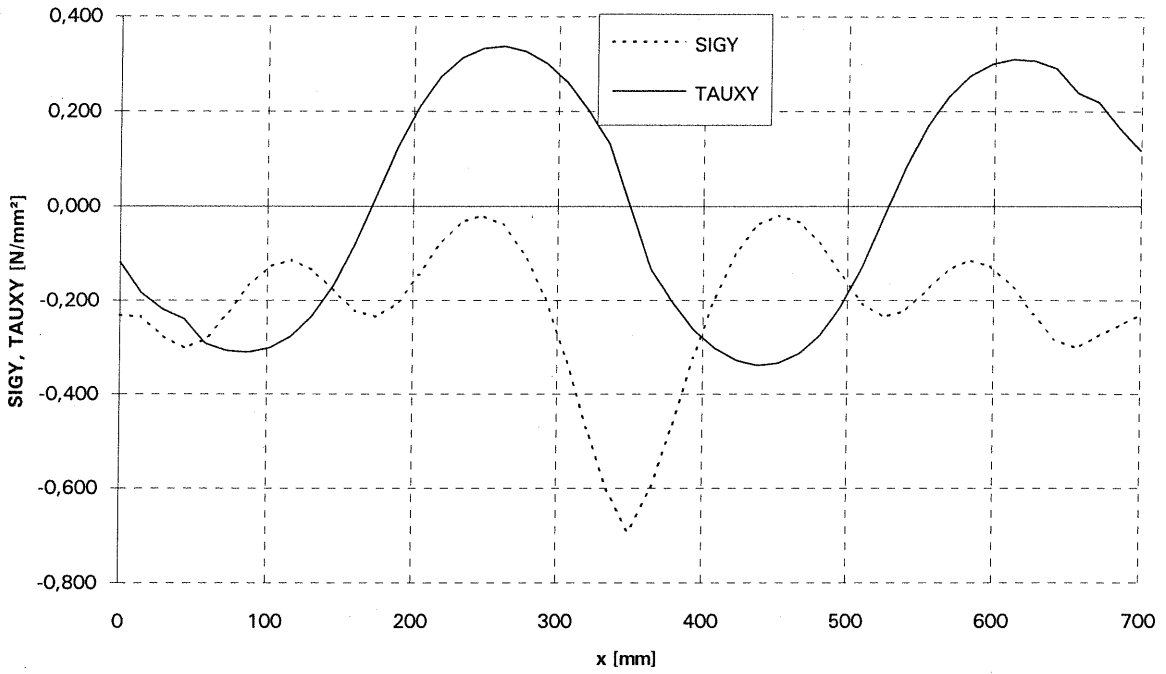


Abb. 10.12: Lasteinleitung auf Gußasphalt, Vertikal- und Schubspannungen in der Oktaphaltschicht

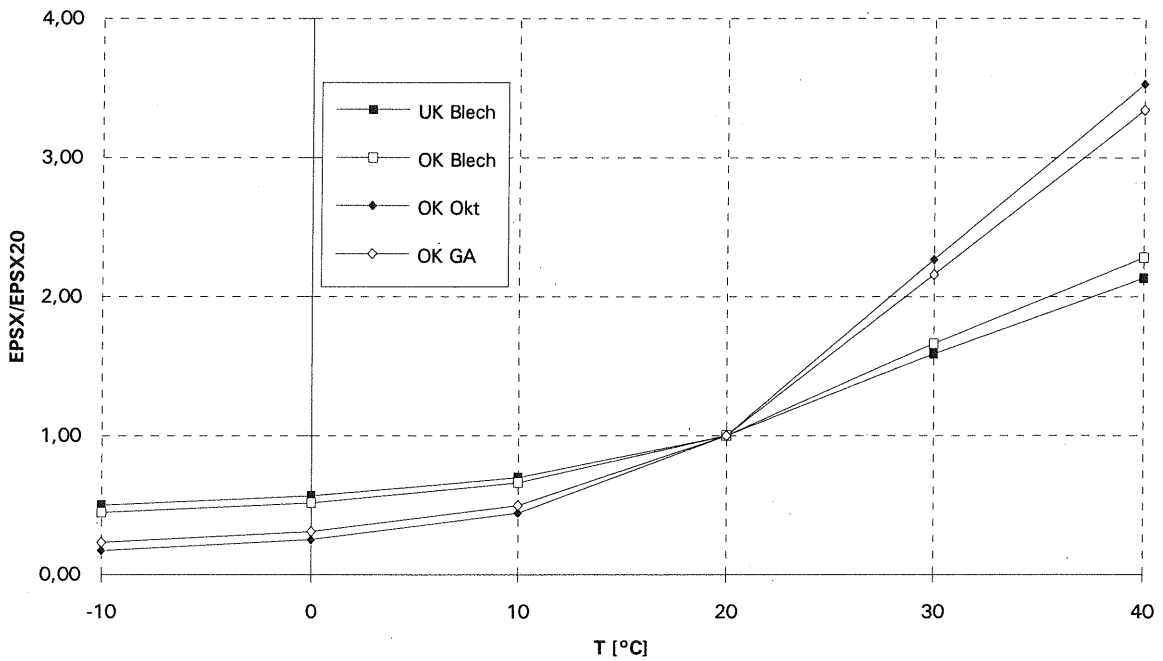


Abb. 10.13: Einfluß der Temperatur, Dehnungen Feld

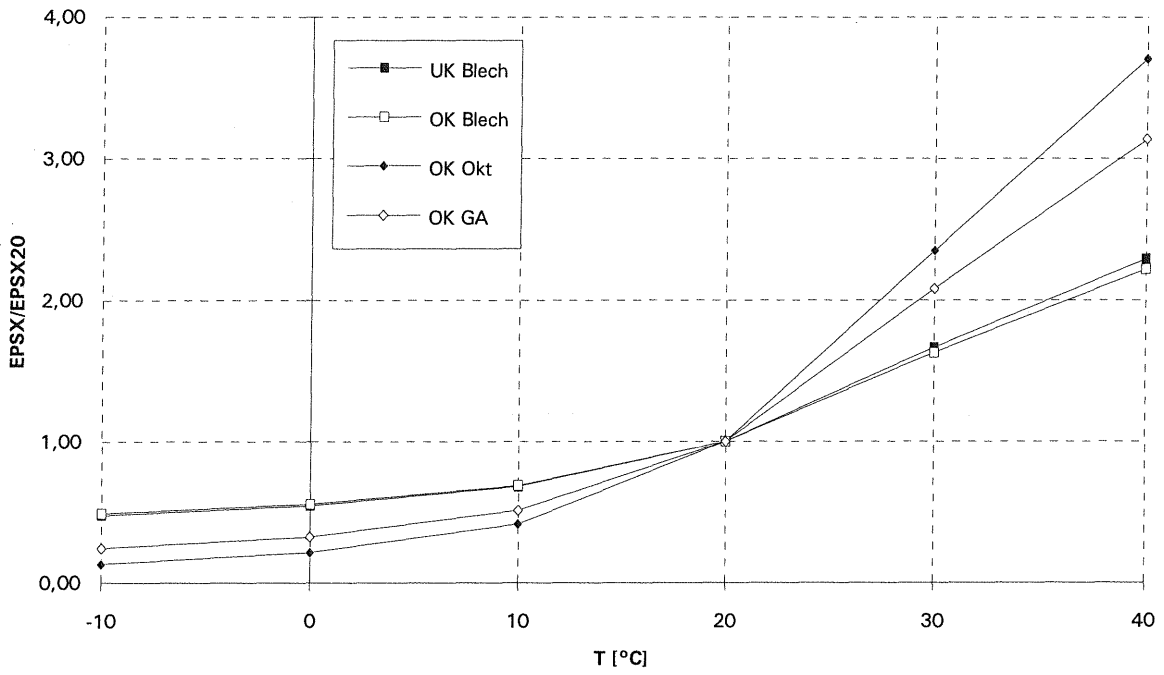


Abb. 10.14: Einfluß der Temperatur, Dehnungen Lager

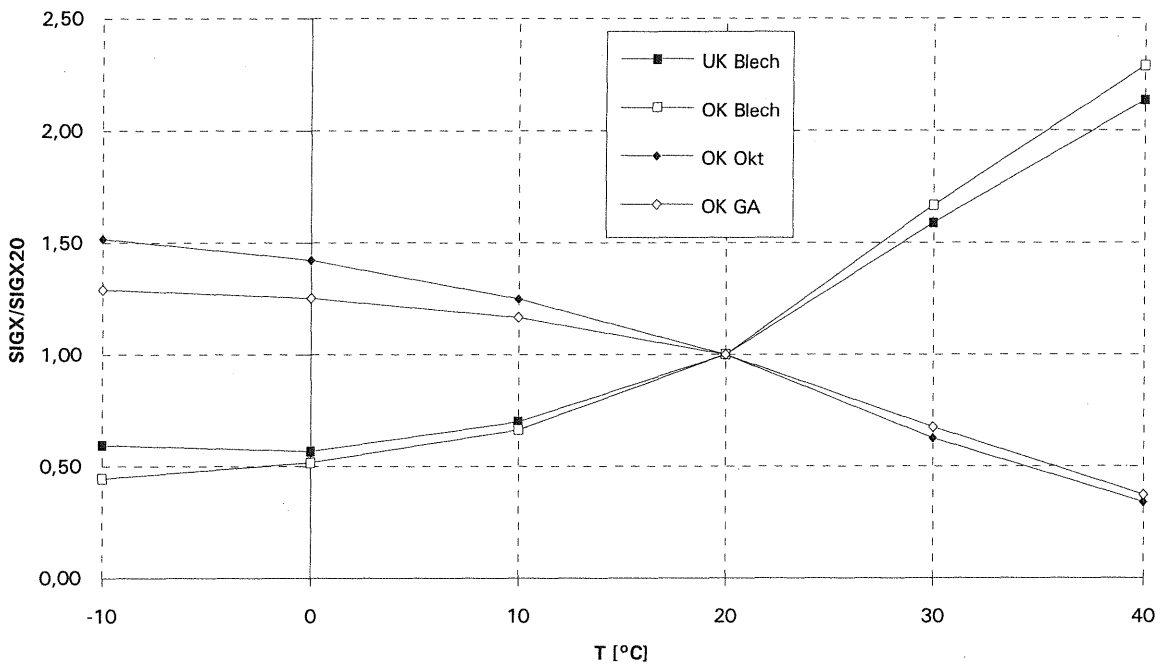


Abb. 10.15: Einfluß der Temperatur, Spannungen Feld

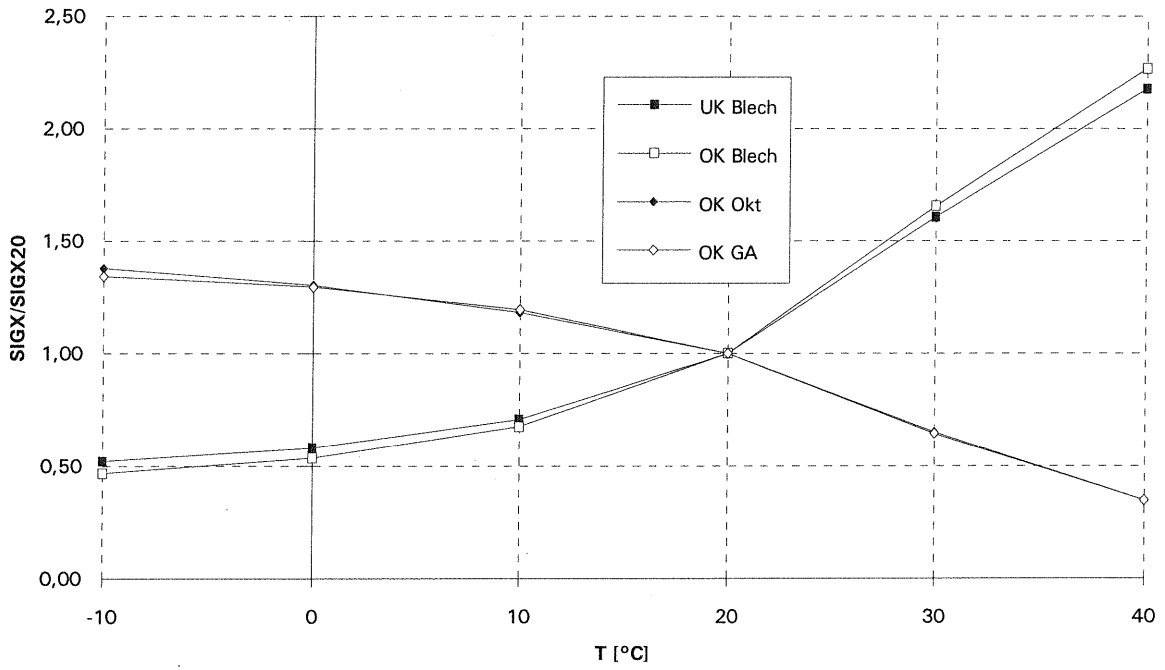


Abb. 10.16: Einfluß der Temperatur, Spannungen Lager

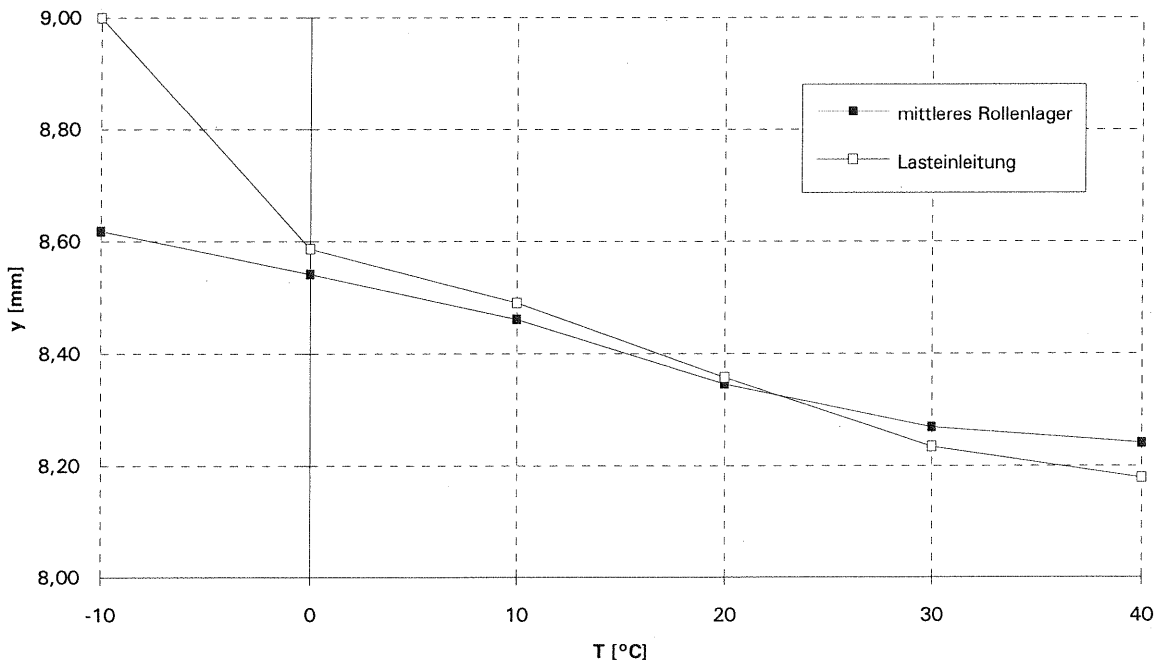


Abb. 10.17: Einfluß der Temperatur, Lage der neutralen Faser

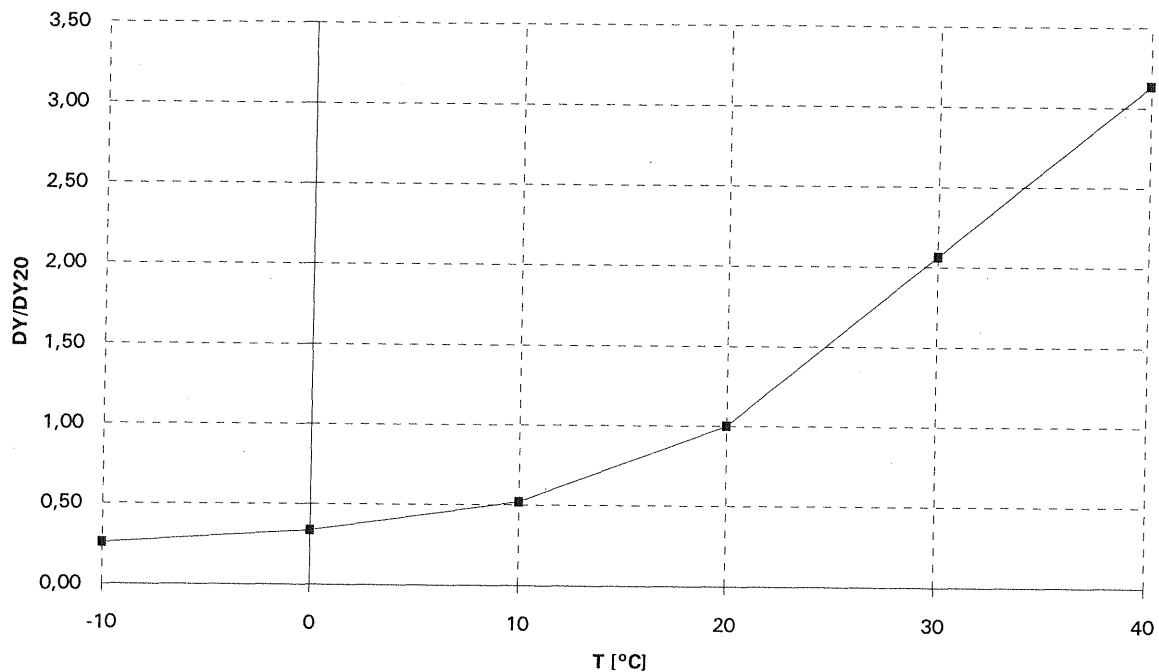


Abb. 10.18: Einfluß der Temperatur, Verschiebungen Feld

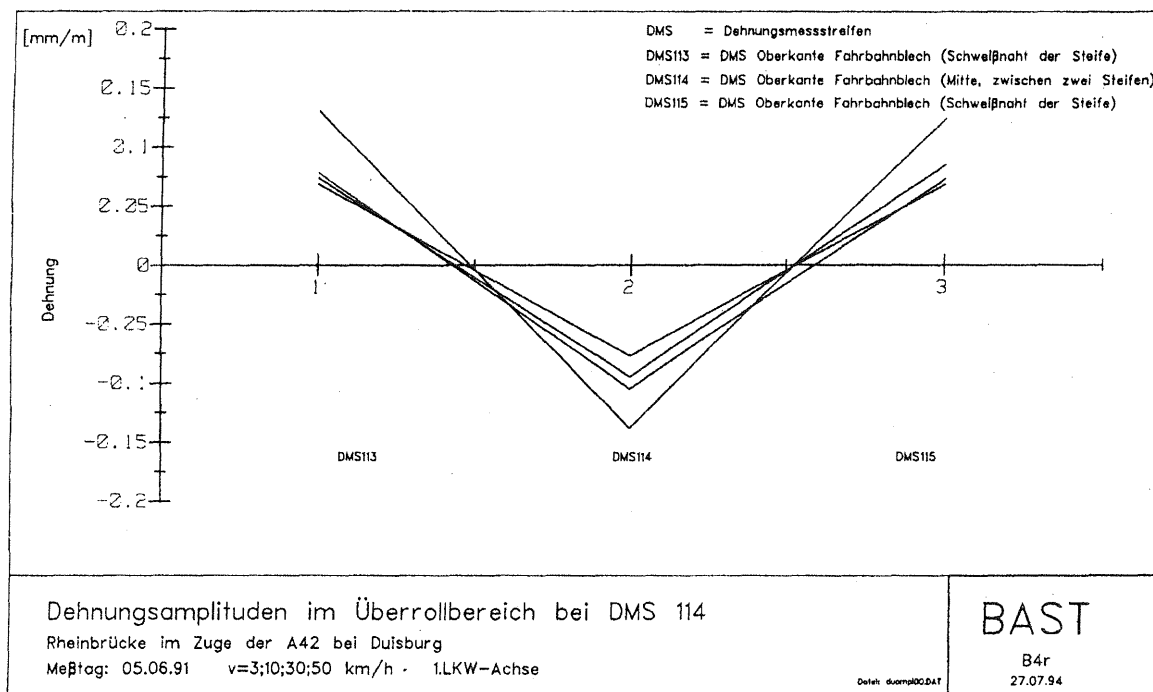


Abb. 11.1: Dehnungen des Fahrbahnbleches, Rheinbrücke im Zuge der A42

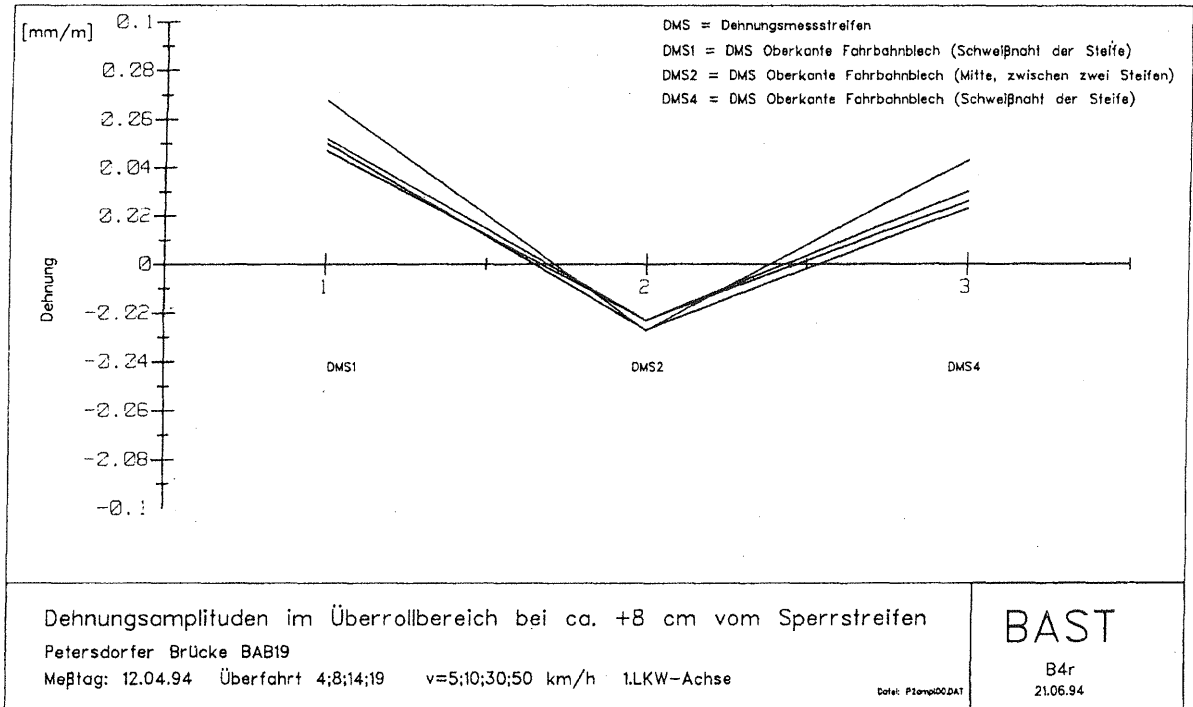


Abb. 11.2: Dehnungen des Fahrbahnbleches, Brücke über den Petersdorfer See im Zuge der A19

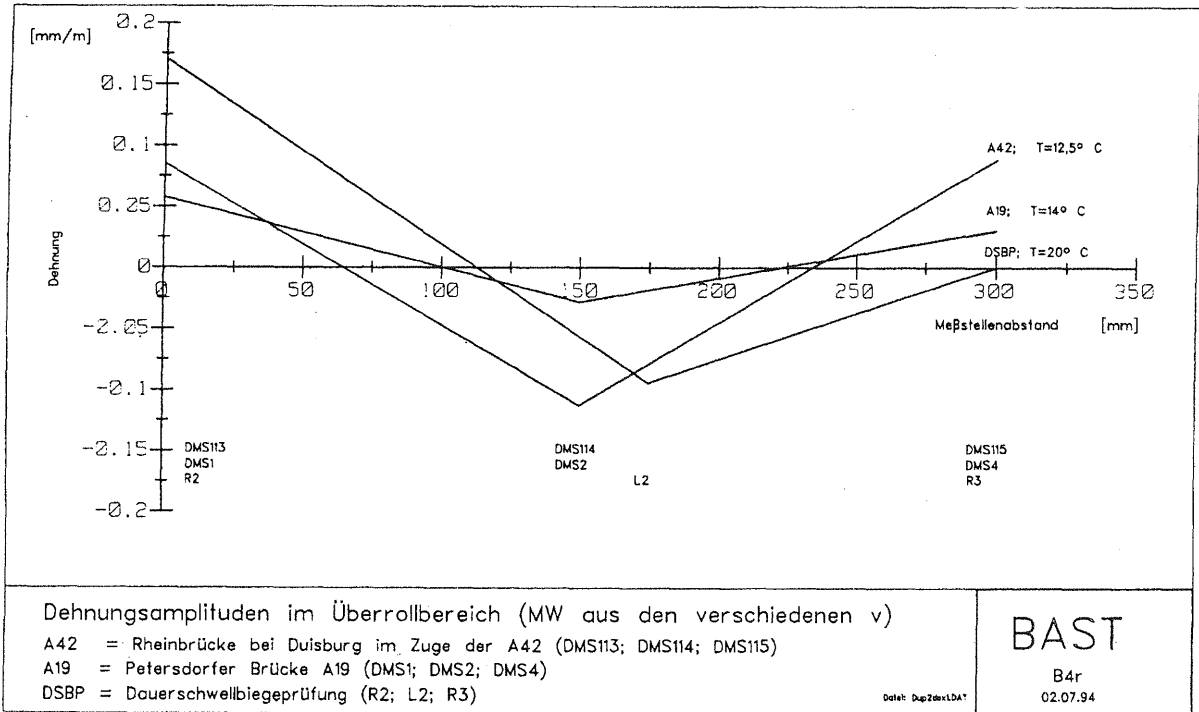


Abb. 11.3: Dehnungen des Fahrbahnbleches, Vergleich Bauwerksmessungen - Dauerschwellbiegeprüfung

