

Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 101

bast

Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30

Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

von

Bastian Wacker
Michael Scherkenbach
Rolf Rabe

Referat GS3 - Dimensionierung und Straßenaufbau

Gudrun Golkowski

Referat S2 – Erdbau, Mineralstoffe

Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 101

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt F1100.3413000:
Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30 und Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-267-4

Bergisch Gladbach, Dezember 2016

Kurzfassung – Abstract

Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30

Ein funktionstüchtiges und qualitativ hochwertiges Fernstraßennetz ist für das Transitland Deutschland elementar. Im zusammenwachsenden Europa werden viele Güter über die Straße transportiert. Dabei verlaufen maßgebende transeuropäische Verkehrsachsen über das deutsche Fernstraßennetz. Es gilt, das Fernstraßennetz so auszulegen, dass die Belastungen aus dem Güterverkehr dauerhaft ertragen werden können. Grundlage für die Dimensionierung des Straßenaufbaus bilden dabei wissenschaftliche Erkenntnisse aus Untersuchungen zur Beschreibung des Baustoffverhaltens, sowie langjährige Erfahrungen beim Bau und der Nutzung von Straßenbefestigungen. Einen wichtigen Baustein für Untersuchungen zum Gebrauchsverhalten des gesamten Straßenaufbaus bilden zeittraffende Belastungsversuche im Maßstab 1:1. Dazu betreibt die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) eine Asphaltmodellstraße, die nach anerkannten Dimensionierungs- und Ausführungsregeln gebaut wurde. Für eine realitätsnahe, zeittraffende Belastung wurde der Mobile Load Simulator MLS30 durch die BASt beschafft. Diese Belastungseinrichtung stellt einen Meilenstein für die Dauerbelastung von Straßenkonstruktionen jeglicher Bauweisen im Großversuch dar.

Durch den ersten Einsatz des Mobile Load Simulator MLS30 wurden wertvolle wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen. Hierzu wurden Dehnungs-, Druckspannungs- und Temperatursensoren der instrumentierten Asphaltmodellstraße der BASt verwendet. Deutlich wurde das zueinander proportionale Verhalten der Dehnungen und Druckspannungen zur Temperatur im Straßenaufbau. Die Sensoren detektierten neben der strukturellen Reaktion innerhalb des Belastungsbetriebes auch Veränderungen der Reaktion des Straßenaufbaus auf zerstörungsfreie Prüfungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD). Weitere Erkenntnisse wurden bezüglich einer Überwachung des Mobile Load Simulator MLS30 gewonnen. Die im Versuchsfeld integrierten Sensoren konnten Veränderungen der Lasteinleitung detektieren. Zusätzlich wurden erste Erfahrungen zur Temperaturerhöhung durch den MLS30 gemacht.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem ersten Versuchsbetrieb werden bei zukünftigen Projekten in

der Straßenbauforschung einfließen und die realitätsnahe Simulation von Verkehrsbelastungen weiter prägen. Mithilfe von ausgereiften Sensorkonzepten, entsprechender Messwerterfassung und Software, ist es möglich in Großversuchen das Gebrauchsverhalten von Straßenaufbauten zu analysieren. Seit der technischen Abnahme im Frühjahr 2013 wurden durch den Mobile Load Simulator MLS30 rd. 4,8 Mio. Überrollungen auf Asphalt- und innovativen Betonbauten realisiert.

Loading device mobile load simulator MLS30

As a transit country, Germany needs a fully functional and high-quality interurban road network. In a converging Europe, a significant volume of goods traffic is transported on the road system. In this context, a number of crucial trans-European traffic axes exist on the German interurban road network. It is therefore imperative that the interurban road network be designed to withstand the long-term strain exerted on it by goods traffic. Hence, planning for road construction is based on the findings of academic studies which document the behaviour of building materials as well as experience gathered over many years in the laying of roads and their operational use. One important element in analysing the performance of the whole road structure is provided by accelerated load tests on a scale of 1:1. For this purpose, the Federal Highway Research Institute (BASt) operates a model asphalt test road which has been constructed in accordance with recognised rules on dimensioning and implementation. In order to ensure a realistic, accelerated load test, the BASt has procured a Mobile Load Simulator MLS30. This facility represents a milestone in the large-scale testing of road constructions of all designs and how they respond to continuous load application.

The first time it was deployed, the Mobile Load Simulator MLS30 enabled valuable scientific observations to be made. The test was carried out using sensors for measuring strain, compressive stress and temperature on the BASt instrumented model asphalt test road. The test clearly showed how strain, compressive stress and temperature in the road structure were proportional to each other.

In addition to the structural reaction taking place under load testing, the sensors also detected changes in the way the road construction reacted to non-destructive testing using the Falling Weight Deflectometer (FWD). Further insights were gathered with respect to monitoring the Mobile Load Simulator MLS30 itself. The sensors integrated in the test area were able to detect changes in the introduction of loads, and it was possible to take the first recordings related to temperature increases caused by the MLS30.

The findings from the first trial operations will be included in future research projects on road construction and will continue to influence the realistic simulation of traffic loads. By using refined sensor concepts and corresponding data measurement systems and software, it is possible in large-scale testing to analyse the performance characteristics of road structures. Since it came into service early in 2013, the Mobile Load Simulator MLS30 has applied approx. 4.8bn axle loads to asphalt and innovative concrete road surfaces.

Inhalt

Abkürzungen	6	5.2	FWD-Messungen	29
1 Einleitung	7	5.2.1	Sensorauswertungen zum FWD-Impuls	30
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	7	5.3	Querebenheit	35
1.2 Vorgehen	7	5.3.1	Beschreibung des Messgerätes und der Messpunkte	35
2 Mobile Load Simulator MLS30	8	5.3.2	Auswertung der Messdaten	36
2.1 Allgemein	8	6	Praktische Erkenntnisse und Analysen aus den Messdaten	37
2.2 Beschreibung des MLS30	9	6.1	Sensoren zur Kontrolle des MLS30 ..	37
2.3 Radlasten	10	6.2	Sensorreaktionen auf unter- suchungsspezifische Belastungen ...	37
2.3.1 Einstellung und Kontrolle der Radlast	11	6.3	Einsatz des MLS30	40
2.3.2 Linearer Bereich der Belastung	13	7	Zusammenfassung und Ausblick ..	41
2.3.3 Eigenschwingung der Maschine	13	7.1	Auslastung und weitere Forschungen	40
2.4 Betriebskosten der Maschine	14	7.2	Materialuntersuchungen	41
2.5 Umbauten MLS	15	7.3	Weiterentwicklung der Sensoren	41
3 Die Modellstraße der BASt	15	8	Literatur	42
4 Untersuchungsfeld und die straßenseitige Sensorik	17	Anlagen		44
4.1 Feldaufbau und Instrumentierung	17	1.A	Kalibrierung WIM-Sensoren	44
4.2 Sensorik	19	2.A	Bestimmung des linearen Bereichs der Belastung durch den MLS30	47
4.2.1 Druckspannungssensor (D)	19	3.A	Erfassung der Position der Lateraleinheiten	48
4.2.2 Dehnungssensor (S)	20	4.A	Druckspannungen während der FWD-Messungen – ges. Versuchsdauer	50
4.2.3 Temperatursensor (T)	21	5.A	Druckspannungen während der FWD-Messungen – Einzelschlaganalyse	52
4.2.4 Geofon (Geo)	22	6.A	Geofon, oberflächennah eingeklebt vs. aufgesetzt (FWD)	54
4.3 Messwerterfassung	23	7.A	Querebenheitsmessungen	55
5 Versuchsdurchführung und Messwertauswertung	25			
5.1 MLS30-Belastung	25			
5.1.1 Temperatur im Asphaltaufbau während der MLS30-Belastung	25			
5.1.2 Dehnung und Druckspannung während der MLS30-Belastung	26			
5.1.3 Geofonsignale während der MLS30-Belastung	27			

Abkürzungen

APT	Accelerated Pavement Testing
DMD	Druckmessdose
DMS	Dehnungsmessstreifen
FSS	Frostschuttschicht
FWD	Falling Weight Deflectometer
MA	Mastixasphalt (Gussasphalt)
MLS30	Mobile Load Simulator
MP	Messpunkt
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
OPB	Offenporiger Beton
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
SMA	Splittmastixasphalt
ToB	Tragschicht ohne Bindemittel
VF	Versuchsfeld
WIM	Weigh in Motion

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Innerhalb der nächsten Jahre und Jahrzehnte wird es immer wichtiger, die vorhandene Infrastruktur funktional und strukturell zu erhalten und für die steigenden Belastungen durch den Schwerverkehr zu ertüchtigen. Für einen ungestörten Lastabtrag ist eine strukturelle Unversehrtheit existenziell. Eine frühzeitige Detektion von Schad- und Schwachstellen ist somit elementar. Daher sind Verfahren erforderlich, um die strukturelle Substanz, insbesondere der tieferliegenden Schichten, messtechnisch und zerstörungsfrei zu erfassen und zu bewerten. Um dies zu ermöglichen, ist es für die Forschung notwendig, Daten über das mechanische Verhalten von Straßenaufbauten zu erhalten, die eine Veränderung der strukturellen Substanz erkennen lassen.

In der Regel werden Straßenkonstruktionen nach den RStO auf 30 Jahre dimensioniert. Um zeitnah Erkenntnisse gewinnen zu können, ist es wichtig, die Verkehrsbelastung in Versuchen zeitraffend zu simulieren.

Zeitraffende Belastungsversuche an Straßenaufbauten sind international unter dem Begriff des Accelerated Pavement Testing (APT) bekannt. Hierzu wird in Forschungseinrichtungen weltweit eine Reihe von stationären und mobilen Belastungseinrichtungen verwendet (ARRAIGADA et al., 2009; COST, 2004; GOLKOWSKI et al., 2007; NCHRP, 1996; NCHRP, 2004). In vergangenen Forschungsprojekten wurden hierzu in der

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hydraulische Impulsgeber eingesetzt (RITTER, 2010). Die Impulsgeber ermöglichen eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Straßenkonstruktionen im Großversuch. Eine direkte Übertragung auf die reale Verkehrsbelastung innerhalb eines Nutzungszeitraumes ist aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik der Impulsbelastung und einer Radüberrollung nicht möglich. Vor diesem Hintergrund wurde der MLS30 für die BASt beschafft. Dieser wurde an der Universität Stellenbosch, Südafrika, entwickelt und bringt die Belastung eines Lkw-Rades mit Doppel- oder Einzelbereifung auf die Straßenkonstruktion auf.

Der vorliegende Bericht beschreibt die ersten Erfahrungen mit dem Wirkbetrieb und der Wartung des Mobile Load Simulator (MLS30) in der BASt. Die straßenseitige Erfassung der mechanischen Beanspruchung im Straßenaufbau durch den MLS30 erfolgt idealerweise mit in den Straßenaufbau eingebauten Sensoren. Hierzu wurde der MLS30 für diesen ersten Testbetrieb auf einem Asphaltstraßenaufbau der instrumentierten und klimatisierten Modellstraße der BASt eingesetzt.

1.2 Vorgehen

Die 2003 mit acht Versuchsfeldern aufgebaute, klimatisierte Modellstraße der BASt, siehe Bild 1-1, wurde für die Durchführung des Wirkbetriebes ausgewählt. Diese Felder sind mit verschiedenen Aufbauten nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 01) (FGSV Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn,

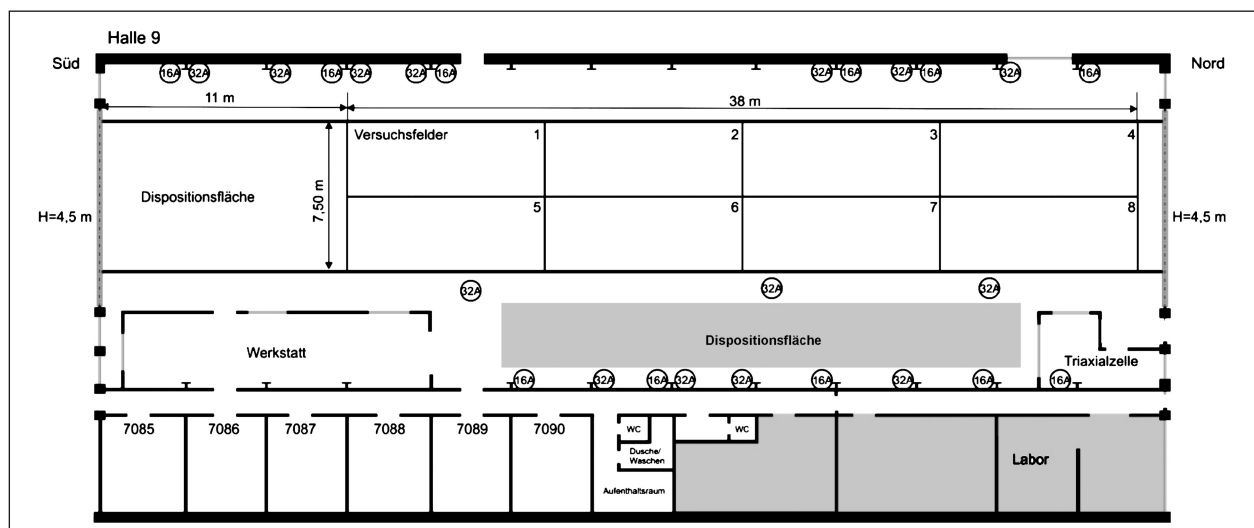


Bild 1-1: Versuchshalle der BASt, Modellstraße mit acht Versuchsfeldern

2001) und nach den Regeln der zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 01) (FGSV Arbeitsgruppe Asphaltstraßen, 2001) konstruiert. In diesem Bericht wird daher von Bauklassen (alte Bezeichnung nach RStO 01) anstelle von Belastungsklassen (nach RStO 12) gesprochen. Die Auswahl der Aufbauten erfolgte derart, dass ein repräsentativer Querschnitt durch die üblichen Aufbauten im deutschen Straßennetz gegeben ist (RABE, 2004).

In verschiedenen Forschungsvorhaben wurden einzelne Felder zum Teil bis zur Zerstörung belastet. Als Belastungseinrichtung kamen bis zur Beschaffung des MLS30 auf der Modellstraße ausschließlich hydraulische Impulsgeber zum Einsatz. Dabei wurde die Verkehrsbelastung mittels eines pulsierenden Laststempels mit einer Latschfläche (Aufstandsfläche) mit \varnothing 300 mm simuliert. Bei Dauerbelastungsversuchen wurden die Versuchsfelder vier und fünf belastet und strukturell zerstört (RITTER, 2010). Dabei wurden relevante Erkenntnisse zum Gebrauchsverhalten von Asphaltstraßen gesammelt.

Mit den durchgeführten Versuchen wurde das Versuchsfeld vier derart zerstört, dass der Asphalt oberbau neu aufgebaut werden musste. Für die Inbetriebnahme des MLS30 wurde dort ein Untersuchungsfeld neu angelegt, um erste Erfahrungen mit der Belastungseinheit sammeln zu können. Für die Untersuchungen erfolgte eine Instrumentierung um Druckspannungen, Dehnungen, Beschleunigungen, Verformungen und Temperaturen während der Belastung kontinuierlich zu messen. Dazu wurde ein Programm erstellt, das alle 15 min die Signale der Sensoren abgreift und zur weiteren Auswertung aufbereitet und speichert. Die genaue Beschreibung der Sensoren und des Messprogramms wurde im Bericht „Sensortestfeld – Analyse neuer und alter Sensoren“ (SCHERKENBACH, 2013) vorgestellt und wird in Kapitel 3 zusammengefasst.

Der neue Aufbau des Versuchsfeldes besteht aus zwei Lagen Gussasphalt (MA) und entspricht ca. einer Bauklasse V (Bk0,3 nach RStO12) Zeile 1, im Versuchsaufbau wurden ca. 2,0 cm weniger Asphalt und keine Tragschicht sondern das selbe Asphaltmaterial über den kompletten gebundenen Oberbau verwendet. Die Bauklasse V (Bk0,3 nach RStO12) kann in etwa einer Anliegerstraße bzw. einem Wohnweg gleich gesetzt werden. Die

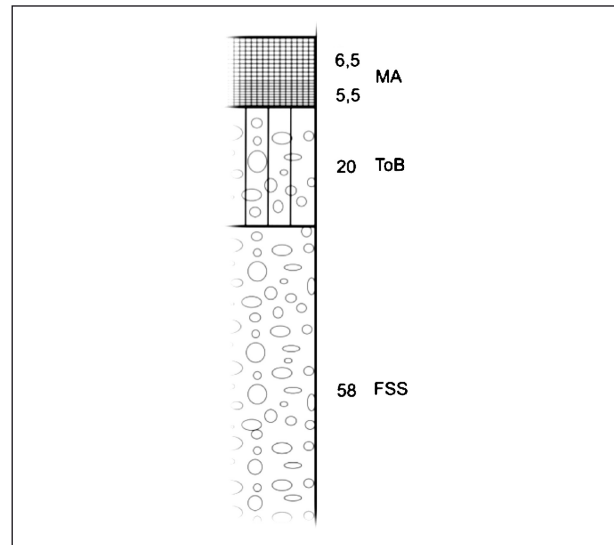


Bild 1-2: Schematischer Aufbau Versuchsfeld 4 Modellstraße BAST, Halle 9

Konstruktion ist für eine Belastung von 300.000 äquivalenten 10-t-Achsen, nach RStO 01 (FGSV Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, 2001) dimensioniert.

Der Testbetrieb mit dem MLS30 wurde bis zu einer Belastung von 300.000 Überrollungen durchgeführt und wird im Anschluss an die Auswertung wieder aufgenommen, wenn nach dieser Auswertung keine strukturelle Schädigung ermittelt werden konnte.

2 Mobile Load Simulator MLS30

2.1 Allgemein

Mittels Großversuchsanlagen werden Aufbauten im Maßstab 1:1 untersucht und bewertet. Um die Belastung innerhalb eines kurzen Zeitraums aufbringen zu können, werden beschleunigte Belastungsversuche gefahren. Dadurch ist es möglich, die prognostizierte Nutzungsdauer einer Befestigung (in der Regel 30 Jahre) zeitraffend zu simulieren und durch Versuche am realen Material und Aufbau aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen. Bislang wurden in der BAST Verfahren eingesetzt, bei denen durch hydraulische Impulsgeber zyklische Kraftstöße mit Maximalwerten zur äquivalenten 10-t-Achsenüberrollung in die Konstruktion eingeleitet wurden, um dadurch eine strukturelle Veränderung zu erreichen. Diese Kraftstöße sind einer Überfahrt durch einen Lkw nur nachempfunden und in Fachkreisen umstritten. Neben den Belastungen durch Impulsgeber sind weltweit auch Anlagen mit rollen-

den Rädern in Betrieb. Dazu zählen mobile Belastungseinrichtungen wie der Heavy Vehicle Simulator (HVS) oder die Accelerated Loading Facility (ALF) (COST, 2004; NCHRP, 1996; NCHRP, 2004; ARRAIGADA et al., 2009). Stationäre Anlagen wie Rundlaufanlagen beinhalten systembedingt einen ungewollten Einfluss durch die winkelbehafte Kraffteinleitung. Im Gegensatz zu einer uni-direktionalen Belastung werden andere Wirkmechanismen bei bi-direktionalen Belastungen erwartet, dabei wird das Belastungsrad vor und zurück über die Versuchsstrecke geführt.

Beim MLS30 werden vier Fahrgestelle mit jeweils einem Belastungsrad innerhalb der Maschine unidirektional an einer geschlossenen Kette geführt. Diese komplette Einheit wird von Linearmotoren angetrieben. Der Vorteil des MLS30 gegenüber anderen Belastungseinrichtungen liegt in der hohen Anzahl an uni-direktionalen Überrollungen und somit einer zeitraffenden Dauerbelastung von Straßenaufbauten.

Der Mobile Load Simulator (MLS) wurde an der Universität Stellenbosch in Südafrika entwickelt. Im Vorfeld standen Überlegungen und Konstruktionen die kleiner als auch deutlich größer waren. Schon 1955 wurden Überlegungen angestellt, eine Belastungseinrichtung zu konstruieren, in der das rollende Rad die Versuchsfläche realitätsnah belastet. Dazu wurde eine Halle geplant, in der die Maschine eine Fläche von 18,0 m mal 4,0 m belasten sollte. In der Überlegung waren 20 Fahrwerke (vier Doppelreifen und 16 Single Reifen), die an einer Kette befestigt und in einer vertikalen, ovalen Bewegung die Belastung auf die Untersuchungsfläche bringen sollten. Die Geschwindigkeit der Anlage sollte 15 bis 60 km/h betragen.

Kleiner aber mit der gleichen Grundidee aus 1955 wurde 1997 der mmls3 (Model Mobile Load Simulator) (RAAB et al., 2013) in Südafrika entwickelt. Dieses transportable Gerät ist quasi der kleine Bruder des MLS30, allerdings nicht selbstfahrend.

Der MLS30 (Bild 2-1) mit einem Gesamtgewicht von 40 t, ist selbstfahrend „mobile“. Er lässt sich dadurch über kleine Strecken eigenständig manövrieren. Es ist dadurch einfacher, variabel auf versuchstechnische Gegebenheiten zu reagieren. Bei weiten Strecken erfolgt der Transport mittels Tief-lader. Ein Einsatz ist auf Asphalt- und Betonkonstruktionen, als auch auf Pflaster und ungebundenen Aufbauten prinzipiell möglich.



Bild 2-1: Mobile Load Simulator (MLS30) der BAST

2.2 Beschreibung des MLS30

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) hat sich für den MLS30 als Großversuchsanlage entschieden und wird diesen in Versuchshallen für dynamische Untersuchungen sowie in Feldversuchen u. a. auf dem zukünftigen Untersuchungs-gelände duraBAST einsetzen.

Die Abmessungen der gesamten Einheit betragen 10,7 x 2,4 x 3,1 m (L x B x H). Die Länge der linearen Belastung mit konstanter Radlast kann mit 3,5 m angegeben werden.

Antrieb und Steuerung des MLS30 arbeiten elektrisch, daher kann insbesondere im Hallenbereich der Anschluss an eine Starkstromleitung (400 V/125 A) erfolgen. Diese Betriebsart vermeidet Schadstoffausstoß vor Ort bei gleichzeitig reduzierter Geräuschkulisse. Für einen universellen Einsatz wird der Betrieb zusätzlich durch einen Dieseldieselmotor ermöglicht. Bei Dieseldieselmotor werden die beiden vorbereiteten Tanks mit je 1.100 Litern Diesel gefüllt, um für ca. einen Monat Belastungsversuche durchführen zu können. In der Belastungseinheit wirken vier Belastungsräder mit Zwillingsbereifung, die jeweils in einem Fahrgestell (sog. Bogie) in einer geschlossenen Kette montiert sind, siehe Bild 2-2. Die Zwillingsbereifung kann gegen eine Super-Single Einzelbereifung ausgetauscht werden und bildet dabei jeweils eine halbe Achse eines Schwerverkehrsfahrzeugs ab.

Die Bogie werden dabei mit ihren seitlichen Führungsrädern über Schienen in einer vertikalen, ovalen Bewegung geführt. Unidirektional angetrieben wird die Kette über 24 Linearmotoren, siehe Bild 2-3. Mit diesen Motoren werden Magnetfelder erzeugt, die von den Aluminiumplatten (Reaktions-

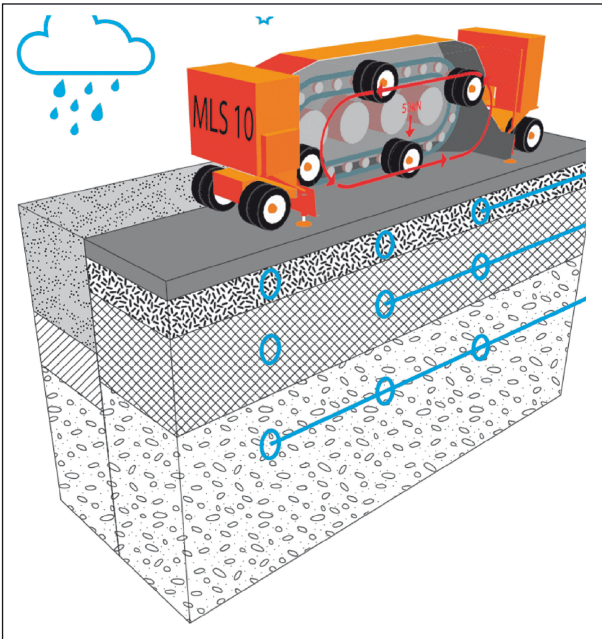


Bild 2-2: Darstellung des MLS30 und Radsatzzuges (LMT Products 2013)

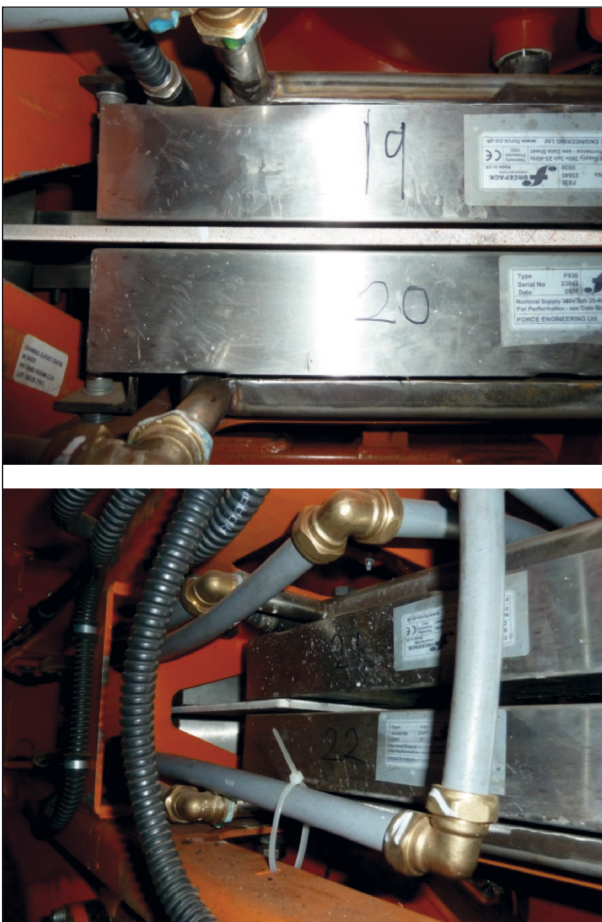


Bild 2-3: Linearantriebsmotoren (19 und 20) für den Antrieb inkl. Reaktionsplatte

platten), die auf den Radsatzzügen montiert sind, durchlaufen werden und dabei die Fahrgestelle be-

Element	Einheit	MLS30
Abmessungen der Anlage (L x B x H)	m	10,7 x 2,4 x 3,1
Länge lineare Belastung	m	3,50
Anzahl Belastungsräder	-	4
Art der Bereifung	-	Einzel- & Zwillingsbereifung
Radlast	kN	40-75
Belastungsgeschwindigkeit	Km/h	6,5-21,0
Belastungsfrequenz	Ü/h	1.500-6.000
Breite (Querverteilung der Lastenleitung)	mm	± 500
Art der Querverteilung		nach Gauß, Stufenfunktion oder kanalisiert

Tab. 2-1: Technische Daten des MLS30 (GOLKOWSKI et al., 2012)

rührungsfrei antreiben. Mit dieser Technik wird im MLS30 eine Höchstgeschwindigkeit von 21 km/h erreicht, dies entspricht 6.000 Überrollungen pro Stunde. Die Minimalgeschwindigkeit liegt bei ca. 6 km/h.

Die Belastungseinrichtung ist eingehaust und bietet durch die umgebende Hülle einen Lärmschutz. Gleichzeitig schützt die Einhausung auch die Maschine vor Witterungseinflüssen und ermöglicht so Belastungsversuche unter tatsächlicher Witterungslage durchzuführen. Für eine simulierte Spurverteilung ist es möglich, das Gesamtgerät (ca. 40 t) mittels hydraulischer Lateralschienen im laufenden Betrieb beidseitig um bis zu 500 mm quer zur Belastungsrichtung programmierbar zu versetzen. Diese Variante wurde während dieser ersten Testreihe noch nicht in Betrieb genommen sie wird bei den in Tabelle 21 aufgeführten Testreihen getestet.

2.3 Radlasten

Beim MLS30 handelt es sich um eine Belastungseinrichtung bei der die entsprechende Radlast flexibel eingestellt werden kann. Des Weiteren sind die Abmessungen der Versuchsfläche für eine entsprechende Versuchsanordnung wichtig, damit die konstante Radlast wirken kann. Ein weiterer Untersuchungspunkt innerhalb dieses Abschnitts liegt in der Beantwortung der Frage von dynamischen Lasten die sich aus dem Betrieb des MLS30 ergeben.

2.3.1 Einstellung und Kontrolle der Radlast

Die Radlast wird für jedes Rad am jeweiligen Bogie über einen Stützdruck eingestellt. Aufgebaut wird dieser Stützdruck durch die Einstellung eines Gasdrucks (Stickstoff) im Steuerzylinder (siehe Bild 2-4). Die richtige Gasdruckhöhe wird dabei einer Tabelle entnommen. So sind z. B. für eine maximale Radlast von 75 kN 144 bar notwendig. Zur korrekten Einstellung muss die Temperaturänderung der Maschine während des Betriebs berücksichtigt werden. Entsprechende Formeln sind im Benutzerhandbuch (LMT PRODUCTS (Pty) Ltd, 2013) enthalten. Vorausgesetzt wird bei diesen Einstellarbeiten, dass der Reifenfülldruck für den jeweiligen Reifen passend eingestellt ist, nur dann kann die eingestellte Last auf die Konstruktion wirken.

Für die Kontrolle der Radlast sind verschiedene Verfahren möglich. Ein Verfahren ist die statische

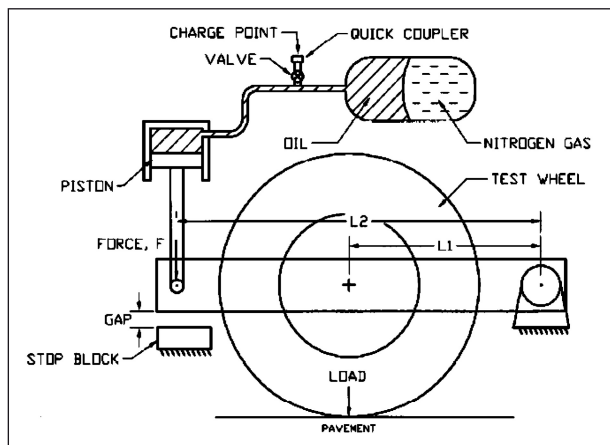


Bild 2-4: Darstellung des hyd. Radsatzbaus (LMT PRODUCTS (Pty) Ltd, 2013)

Kontrolle, ein weiteres das sog. „Weigh-in-Motion-Prinzip“ mit mehreren Achslastwaagen hintereinander. Die dritte und flexibelste Variante ist die ständige Kontrolle über die Bluetooth-Schnittstelle jedes einzelnen Bogie. Im Folgenden werden die verschiedenen Verfahren erläutert.

Vom Hersteller wird empfohlen die Last statisch zu kontrollieren. Dazu wird der einzustellende Bogie in mittlerer Position unter dem MLS30 fixiert (stehende Maschine) und der MLS30 so eingestellt, dass eine statische Achslastwaage positioniert werden kann. Auf diese Weise lassen sich auch die Überwachungssysteme kalibrieren. Jeder Bogie ist mit einer Kontrollbox ausgestattet, welche die Radlast, aber auch die Batteriespannung und die Größe des Aufhängungsspaltes via Bluetooth überträgt. Die nötige Versorgungsspannung wird beim Betrieb des MLS30 elektrodynamisch generiert.

In Bild 2-5 lassen sich verschiedene Werte ablesen, die während des Betriebs der Maschine an den Kontrollrechner gesendet werden. So kann der Spalt zum Stopp Block abgelesen werden, dies ist mit Displacement bezeichnet. Unter dem Begriff Load und der zugehörigen Kurve, lässt sich der Kraftverlauf über die Länge des Belastungsfeldes ablesen. Der in Bild 2-5 gezeigte Fall zeigt, dass sich nach einer anfänglichen Phase, in der sich die Last von 50 kN einstellt, die Last sehr konstant bleibt. Zum Ende der Belastungsphase fällt die Last zurück und der Bogie verlässt die Belastungsfläche. Mittels freier Kanäle lässt sich dieses Kontrollsystem auf weitere Parameter ausweiten. Da dieses System während des Betriebs funktioniert, können die Signale zur Überwachung und gegeb-

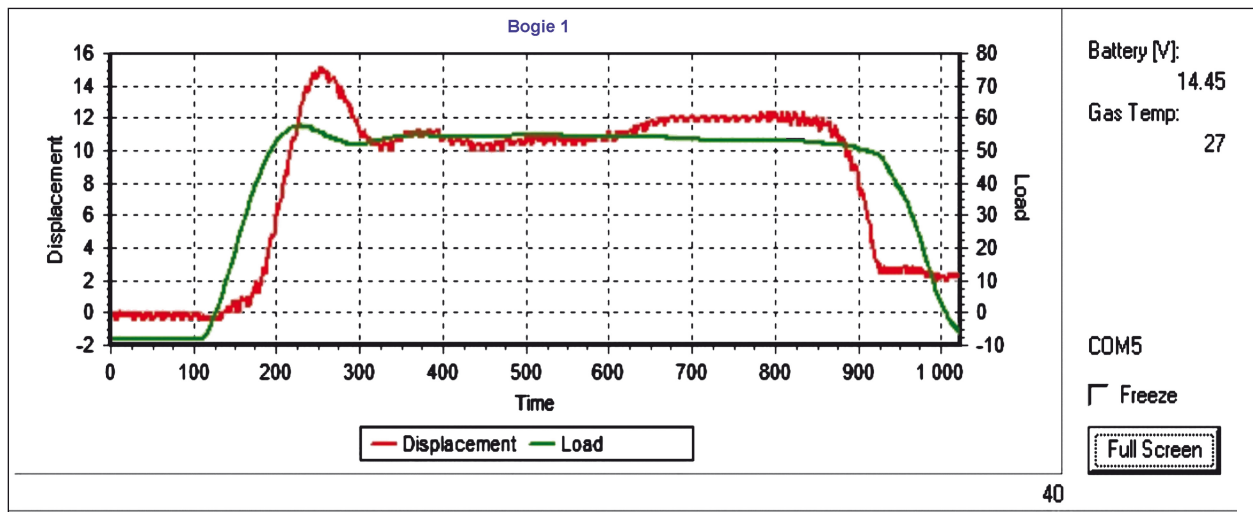


Bild 2-5: MLS-Kontrollbildschirm (Bluetooth) im laufenden Betrieb

nenfalls zur Generierung eines Alarms genutzt werden. Wenn das Gerät nicht in Betrieb ist, kann der jeweils notwendige Bluetooth-Sender über ein externes Ladegerät mit Strom versorgt werden, um Signale an den Kontrollrechner zu übermitteln. Dieses Vorgehen wird bei der Kalibrierung benötigt, weil dort die Lasten der Bogie bei aufgeständerter Maschine für eine Auswertung ermittelt werden.

Zur Kontrolle und Analyse der dynamischen Lasteinleitung auf der Modellstraße der BAST drei Achslastwaagen im Abstand von 160 cm nach dem Weigh-in-Motion Prinzip installiert (Planungshandbuch Kistler (AG)). Diese basieren auf Piezoelementen und erzeugen eine elektrische Ladung, die von der Geschwindigkeit (v) und der Last abhängt. Nach Umformung dieser Ladung in eine Spannung (U) kann gemäß der Formel

$$W = \int U * v * c \quad (c: \text{Konstante})$$

die wirkende Last (W) bestimmt werden.

Zur Kalibrierung wurden die Achslastwaagen mehrfach mit jeweils der rechten Fahrzeugseite

eines Kleintransporters (statisch vorne 10,3 kN, hinten 16,67 kN), eines Lkws (statisch vorne 37,96 kN, hinten 44,44 kN) und den Antriebsrädern des MLS30 (statisch 87,31 kN) überfahren. Aus den Ergebnissen der statischen Verwiegung und der Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Achslasten der Achslastwaagen (siehe Anhang 1.A Kalibrierung WIM-Sensoren) kann eine Konstante für jede der drei Waagen neu bestimmt werden. Die verwendeten Fahrzeuge repräsentieren den gesamten Messbereich der Achslastwaagen. Mit den wie angedeutet generierten Konstanten zeigt sich der in Bild 2-6 dargestellte Zusammenhang zu den statischen Verwiegungen.

Derart kalibriert zeigte sich bei der Überrollung durch den MLS30 in Bild 2-7 der Zusammenhang.

Zur besseren Übersicht wurden die Messergebnisse nach Bogie sortiert. Als Ursache für die starken Differenzen und niedrigen Werte von Bogie 4 stellte sich ein zu geringer Reifenfülldruck heraus.

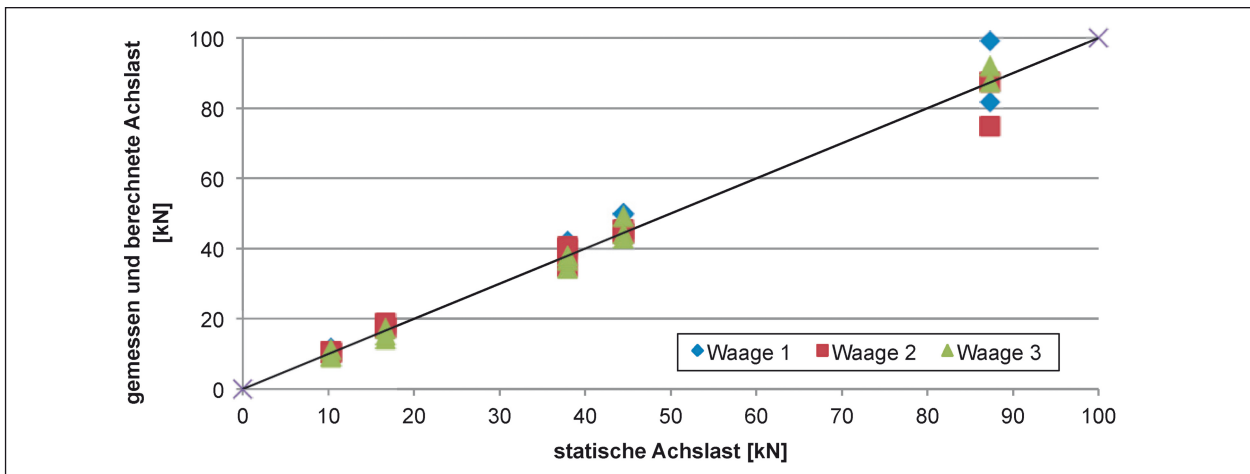


Bild 2-6: Kalibrierung der WIM-Sensoren

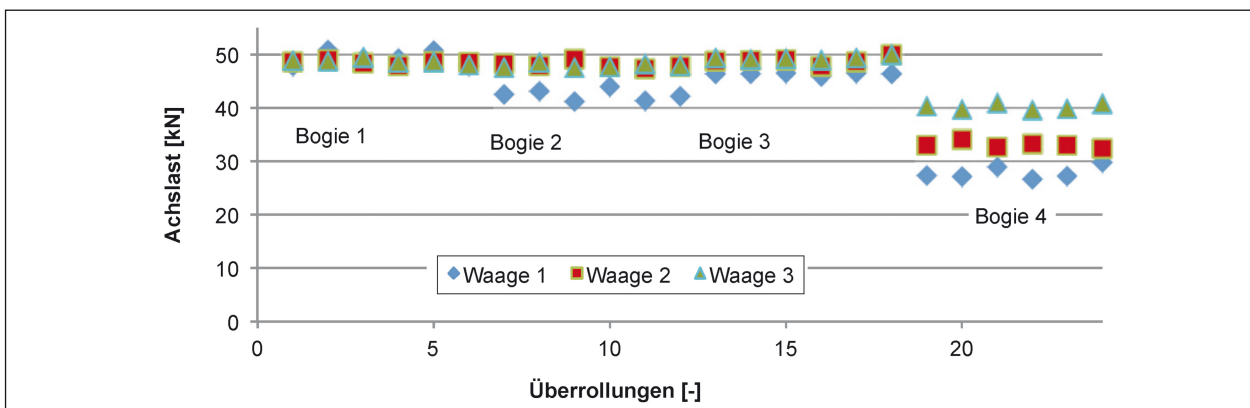


Bild 2-7: Kontrolle des MLS30 mittels WIM-Sensoren

2.3.2 Linearer Bereich der Belastung

Zur Ermittlung der genauen Abhebeposition und damit dem Ende des linearen Belastungsbereichs wurde die Position des MLS auf dem Feld 2 der Modellstraße relativ zu den eingebauten Achslastwagen gem. Bild 2-8 variiert. Als Position 0 wurde dabei der Übergang der äußeren Führungsschiene des MLS von der Geraden in die Klothoide senkrecht über der Achslastwaage 3 definiert.

Die Signale der Achslastwagen wurden bei 7 km/h, 14 km/h und bei 20 km/h erfasst, die Maximalwerte ermittelt und relativ zur Position aufgetragen (siehe Anhang Bild A.5.).

Die Auswertung aller drei Achslastwagen lässt die Bestimmung des linearen Bereichs zu. Dieser umfasst den Abstand der Achslastwagen 1 und 3 (320 cm) und den Bereich, indem die Werte von Waage 1 und 3 nahezu gleich sind (ca. 24 cm). Das bedeutet, dass von einer Belastungsfläche von knapp 350 cm ausgegangen werden kann.

2.3.3 Eigenschwingung der Maschine

Beschleunigungsmessung auf Asphalt

Wie im vorigen Kapitel dargestellt, lässt sich insbesondere die statische Achslast mit hoher Genauigkeit messen. Um von dieser auf die tatsächliche Belastung schließen zu können, ist es erforderlich

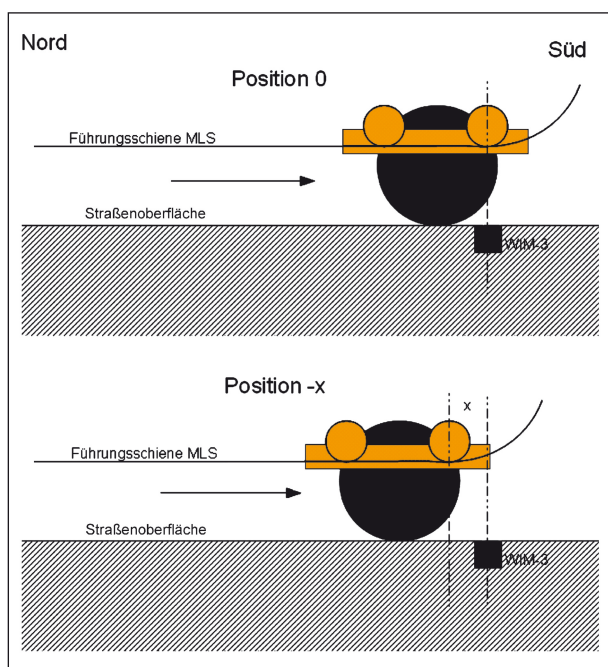


Bild 2-8: Definition der Position des MLS relativ zur Achslastwaage 3

zu wissen, ob Teile der eingebrachten Energie verloren gehen. Hierzu wurden auf den Eckhebern des MLS30 Beschleunigungsmessungen vorgenommen. Zu Vergleichszwecken fand eine weitere Messung auf dem Asphalt neben dem MLS30 statt. Während der Messung belastete der MLS30 mit 50 kN bei einer Geschwindigkeit von ca. 21 km/h.

Die Messung wurde mit Beschleunigungsaufnehmern der Firma PCB vom Typ 393 durchgeführt. Der Messbereich dieser Sensoren beträgt ± 1 g. Den Diagrammen in Bild 2-9 ist zu entnehmen, dass die erfassten Beschleunigungswerte im

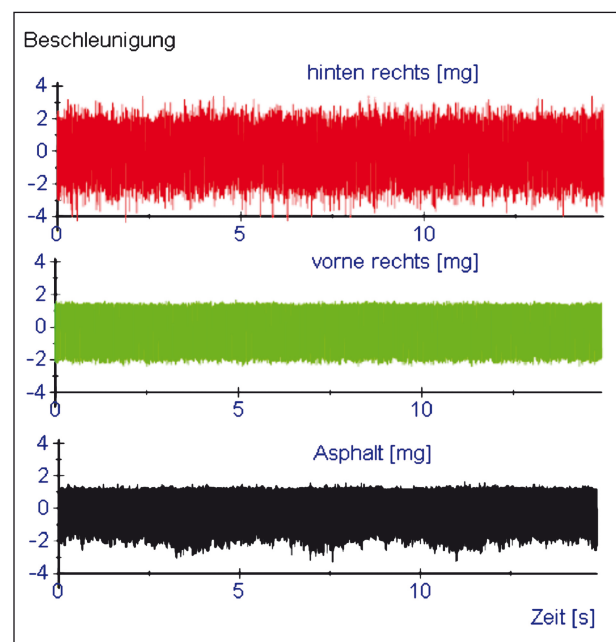


Bild 2-9: Schwingungen des MLS30 während der Belastung auf Asphalt

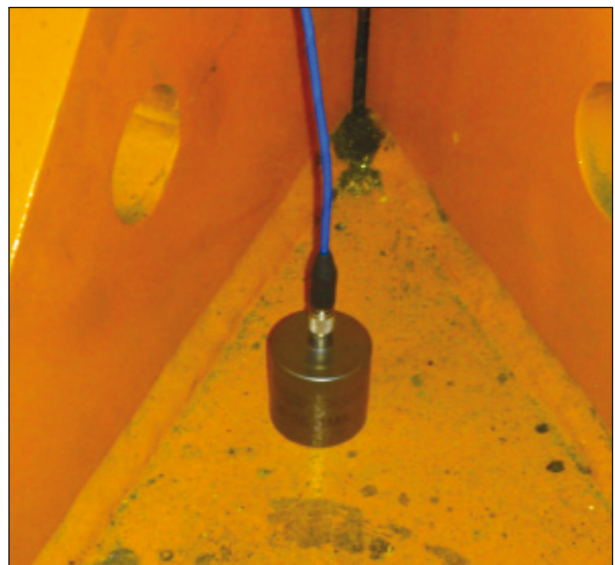


Bild 2-10: Beschleunigungssensor auf MLS30 Fuß

Bereich des Grundrauschens liegen und damit zu vernachlässigen sind.

Beschleunigungsmessungen auf Beton

Der gleiche Versuch wurde einige Zeit später bei vergleichbaren Randbedingungen auf offenporigen Beton durchgeführt. Die sich zeigenden Beschleunigungswerte (Bild 2-11) liegen um den Faktor 1.000 über denen des Asphalts. Eine Analyse der Frequenzanteile nach Fourier wird in Bild 2-12 dargestellt.

Erwartungsgemäß hat die Beschaffenheit der Oberfläche des zu testenden Feldes einen Einfluss auf

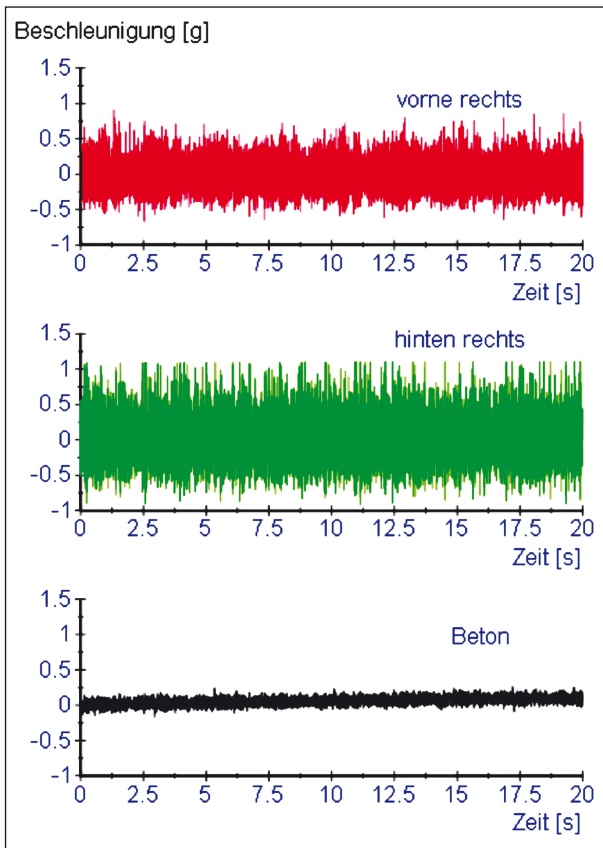


Bild 2-11: Schwingungen des MLS30 während der Belastung auf Beton (OPB)

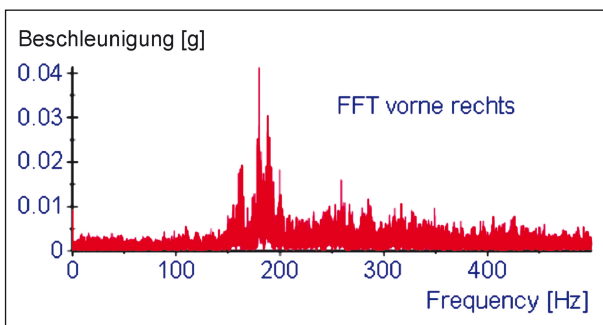


Bild 2-12: SFFT der Schwingungen (MLS30 auf Beton)

die Belastungsgröße und wird wegen der Höhe des gemessenen Einflusses bei der Analyse des OPB-Feldes zu berücksichtigen sein.

2.4 Betriebskosten der Maschine

Da der MLS30 mit Strom oder Diesel betrieben werden kann, werden hier beide Varianten vergleichend dargestellt.

Innerhalb der Maschine befinden sich zwei Dieseltanks um das Dieselaggregat betreiben zu können. Während der Belastung wird ein Verbrauch von ca. 12 l/h erreicht. Diese Information wurde durch Gespräche mit dem Betreiber des MLS30 aus der Schweiz gewonnen. Eigene Erfahrungen bezüglich des Verbrauchs des BAST MLS30 liegen noch nicht vor, weil ein Betrieb mit Diesel während dieses Versuches nicht stattgefunden hat. Für die Berechnung wird vereinfacht ein Kostenfaktor von 1,40 €/l angenommen.

Für den Betrieb mit Strom wird der Maximalwert angenommen, für den die Starkstromsteckdose (400 V und 125 A = 50 kW) ausgelegt ist. Daraus ergibt sich für einen Arbeitstag von ca. 8 h/d ein Verbrauch von max. 400 kWh/d. Zur Vereinfachung der Berechnung werden die Kosten mit einem Kostenfaktor von 25 ct/kWh berechnet.

Neben diesen Betriebskosten fallen auch Personalkosten an, die für eine fachgerechte Betreuung notwendig sind. Für eine Betreuung nach dem Sicherheitskonzept (GOLKOWSKI et al., 2013) ist es notwendig, dass die Maschine permanent betreut wird. Für Wartungen und das Bewegen der MLS30 sind

Bezeichnung	Berechnung	Ergebnis
Betrieb mit Diesel		
Diesel-Aggregat	12 l/h · 8 h/d	96 l/d
Kosten	96 l/d · 1,40 €/l	135,00 €/d
Betrieb mit Strom		
Starkstromsteckdose	-	max. 50 kW
Betriebsstunden	50 kW · 8 h/d	400 kWh/d
Kosten	400 kWh/d · 0,25 €/kWh	100,00 €/d
Personalaufwand		
Personal	1,5 · 50.000 €/a	75.000,00 €/a
Personal	75.000 €/a/220 d/a	340,00 €/d

Tab. 2-2: Kalkulation von Betriebskosten des MLS30

mehr Personen notwendig. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass dauerhaft eineinhalb Techniker die Anlage betreuen (GOLKOWSKI et al., 2012).

Im Zuge des Betriebs sind regelmäßige Kontrollen und Wartungen herstellerseitig vorgeschrieben und notwendig. Für diese Wartungen werden vor allem Schmierstoffe benötigt, aber auch Standardbauteile, die in bestimmten Zyklen ausgetauscht werden, um den Dauerbetrieb gewährleisten zu können. Hinzu kommen Sonderbauteile, die speziell für den MLS30 hergestellt werden. Für diese Bauteile wird ein Ersatzteillager angelegt, damit auf Ausfälle unverzüglich reagiert werden kann.

Beim Betrieb des MLS30 ist mit einer finanziellen Belastung von rund 440,00-475,00 €/d zu rechnen. Hinzu kommen noch die Abschreibungskosten der Großversuchsanlage.

2.5 Umbauten MLS

Bogiemarkierung

Die in diesem Bericht beschriebenen, ersten projektbezogenen Erfahrungen mit dem MLS30 führten an einigen Stellen zu dem Wunsch, weitere Parameter automatisch erfassen zu können. So zeigte sich während der im nächsten Kapitel beschriebenen automatischen Erfassung, dass von den ursprünglich gleich eingestellten Lasträdern, eines unterschiedliche Signale erzeugte. Die Frage, welcher der entsprechende Bogie sei, ließ sich erst während der folgenden Wartung klären (Ursache war in diesem Fall: fehlender Reifenfülldruck). Zukünftig lässt sich die Zuordnung durch Markierung eines Bogie mit einem Magneten und zu den Sensorsignalen synchroner Erfassung erkennen. Dazu wird ein Magnetfeldsensor des Typs MFT 200 der Firma IFM verwendet. Auch bei der Auswertung der Sensorsignale vereinfacht die Markierung einen Vergleich von Signalen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Idealerweise wird diese Markierung als Startsignal (Trigger) für die Erfassung (sowohl bei der Start-Stopp- als auch bei der automatischen Applikation) genutzt. Dem Nachteil der Startverzögerung (bei 20 km/h max. 2,4 s) steht der Vorteil der Bogieverfolgung (die Bogiefolge beginnt immer gleich) gegenüber.

Überrollzähler

Einerseits als Kontrolle des eingebauten Überrollungszählers, andererseits als Signal, dass einfach in die Messwerterfassung einbezogen werden

kann, wurde ein Überrollzähler mittels Lichtschranke realisiert. Kompakt mit der Bogiemarkierung wurde dieser im vorderen Teil des MLS30 positioniert und überträgt die Informationen über ein gemeinsames Kabel zur automatischen Datenerfassung.

Lateral Position

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Lateral-einheiten noch nicht eingesetzt. Gleichwohl wird der Einsatz zur Simulation eines realen Verhaltens als wichtig eingestuft. Zum Vergleich der dann automatisch erfassten Signale, im Falle einer instrumentierten Straße, ist es wichtig zu wissen, wo die Last eingeleitet wurde. Um diese Information in die Messwerterfassung einbeziehen zu können, wurde eine Platine (siehe Anhang 3.A) entwickelt, die das Signal der Seilzugsensoren der Lateraleinheiten zur Verfügung stellt, ohne es zu beeinflussen.

Temperaturmessung

Die Temperatur ist ein besonders wichtiger Versuchsparameter, da er die für die Substanzbewertung elementare Eigenschaft „Elastizität“ stark beeinflusst. In Kapitel 5.1.1 werden die während des Wirkbetriebs erfassten Temperaturverläufe dokumentiert. Die Temperaturerfassung in der Straße erfolgte bereits automatisch. Die Lufttemperatur unmittelbar auf der Asphaltoberfläche sowie in ca. 90 cm Höhe erfolgte dagegen exemplarisch mittels eines externen Datenloggers. Zukünftig soll eine Erfassung der Lufttemperatur in verschiedenen Höhen sowie eine Messung der Oberflächentemperatur mittels IR-Messung automatisch ermöglicht werden.

3 Die Modellstraße der BAST

Die BAST betreibt eine klimatisierte Versuchshalle mit einer Modellstraße in Asphaltbauweise. Hier wurden unterschiedliche Straßenkonstruktionen aufgebaut und mit Sensoren zur Erfassung mechanischer Kenngrößen im Straßenaufbau instrumentiert. Mithilfe dieser Sensoren ist es möglich, die sich aus den Belastungen ergebenden Beanspruchungen innerhalb der Befestigung und deren Veränderungen zu messen und im Anschluss zu analysieren.

Insgesamt wurden in die Modellstraße acht unterschiedliche Asphaltstraßenaufbauten gemäß

RStO 01 (FGSV Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, 2001) und weiteren mitgeltenden Regelwerken eingebaut, siehe Bild 3-1. Die Abmessungen der einzelnen Versuchsfelder betragen 9,50 m in der Länge und 3,75 m in der Breite, bei bis zu 3,50 m Tiefe. Weitere Angaben zum Bau der Modellstraße und der Versuchsdurchführung finden sich in (RABE, 2004; RABE, 2007).

Für die ersten Belastungsversuche mit dem MLS30 wurde das Versuchsfeld 4 ausgewählt. Darin wurde ein Teilbereich von 1,0 x 4,2 m (Untersuchungsfeld) mit Gussasphalt erneuert und mit Sensoren bestückt. Dieses Feld ist für eine Belastung von 300.000 äquivalenten 10-t-Achsüber-

gängen dimensioniert. Dies entspricht einer Bauklasse V nach RStO 01 (FGSV Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, 2001) beziehungsweise einer Belastungsklasse Bk0,3 nach RStO 12 (FGSV Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, 2012). Neben der Erfassung der mechanischen Größen wie Druckspannungen, Dehnungen, Verformungsgeschwindigkeiten und der Temperatur wurden zerstörungsfreie Messungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD) und Querprofilmessungen durchgeführt.

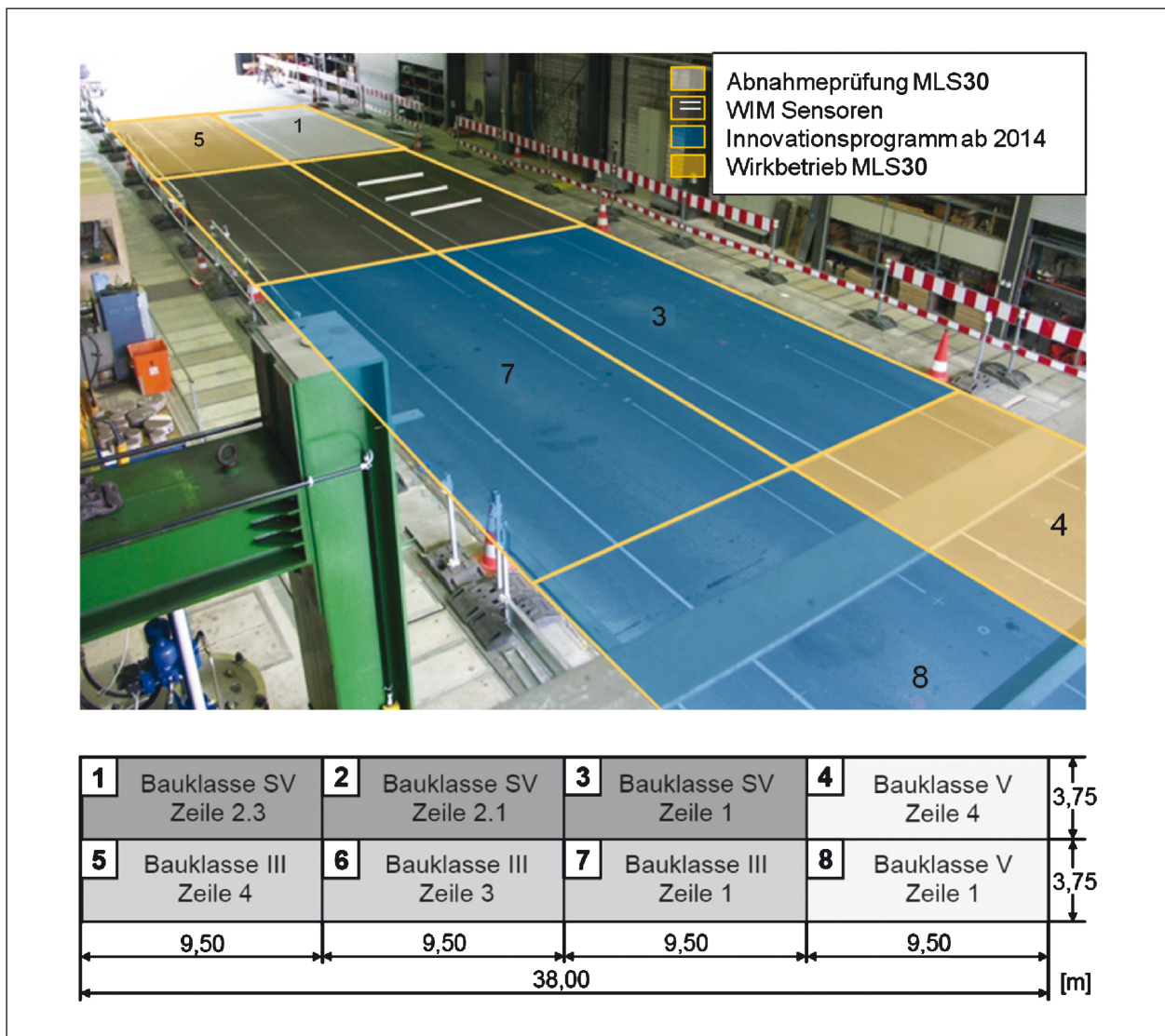


Bild 3-1: Die Modellstraße der BAST mit acht Versuchsfeldern

4 Untersuchungsfeld und die straßenseitige Sensorik

4.1 Feldaufbau und Instrumentierung

Als Untersuchungsfeld wurde das Feld Nr. 4 (Bild 3-1) der Modellstraße ausgewählt und mit Sensoren bestückt. Der ursprüngliche Aufbau nach RStO 01 (FGSV Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, 2001) Bauklasse V, Zeile 4, bestehend aus

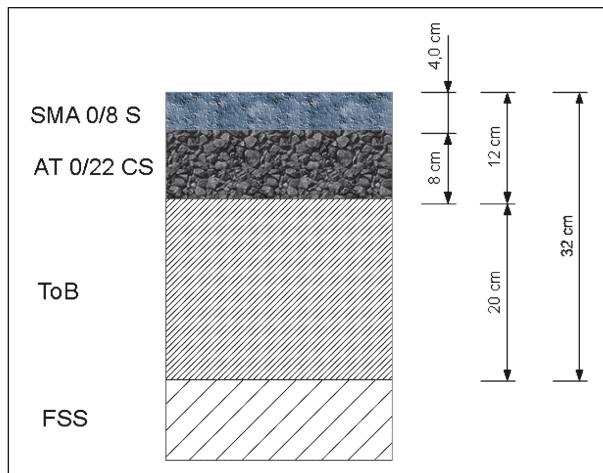


Bild 4-1: Ursprünglicher Aufbau Feld 4

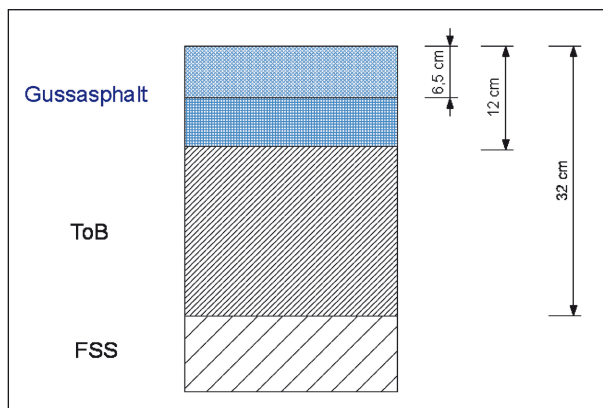


Bild 4-2: Neuaufbau Feld 4 mit Gussasphalt

Asphaltdeck- und Asphalttragschicht (Bild 4-1), wurde im Rahmen der Dauerbelastung durch hydraulische Impulsgeber bis zum Versagen belastet (RITTER, 2010). Der belastete Bereich wurde auf einer Länge von 4,2 m und einer Breite von 1,0 m ausgebaut und durch einen Gussasphalt in mehrlagigem Einbau ersetzt (Bild 4-2). Dieser Aufbau entspricht einer Belastungsklasse Bk0,3 nach RStO 12 (FGSV Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, 2012) mit einer dimensionierungsrelevanten Beanspruchung von mindestens 300.000 äquivalenten 10t-Achsübergängen und kann somit z. B. einem Wohnweg gleichgesetzt werden. An dieser vergleichsweise schwachen Konstruktion sind unter Dauerbelastung Veränderungen der strukturellen Substanz schneller detektierbar.

Für die Erfassung der mechanischen Kenngrößen innerhalb der Befestigung sowie ihrer Veränderung über die Belastungsdauer wurden verschiedene Sensoren in den Aufbau integriert. Insgesamt wurden 20 Dehnungssensoren im Asphalt oberbau, 22 Druckspannungssensoren in den ungebundenen Tragschichten und vier Temperatursensoren verteilt über die gesamte Höhe des gebundenen Aufbaus eingebaut. Beschleunigungssensoren und Geofone wurden mittels Bohrung nachträglich in zwei Tiefen so eingebaut, dass die Beeinträchtigung möglichst gering gehalten worden sind. Bild 4-3 zeigt die Einbautiefe der Sensoren.

Alle Sensoren wurden über Kabel an eine Messwerterfassung angeschlossen. Bei der Messwerterfassung wurde auf in BAST Projekten bewährte Systeme zurückgegriffen. Die zugehörige Software wurde auf Basis handelsüblicher Entwicklungspakete selbst erstellt.

Druckspannungssensoren zur Messung der vertikalen Druckspannungen wurden 20 cm unterhalb,

Ursprünglicher Aufbau		Neuaufbau
Gebundene Schichten		
SMA 0/8 S Bitumen 50/70	4 cm	Gussasphalt GA 0/8 6,5 cm
AT 0/22 CS Bitumen 70/100	8 cm	Gussasphalt GA 0/8 5,5 cm
Ungebundene Schichten		
ToB Kies-Sand 0/32	20 cm	
FSS Kies-Sand (F1-Boden)	58 cm	
Fiktives Planum	134 cm	

Tab. 4-1: Feldaufbau

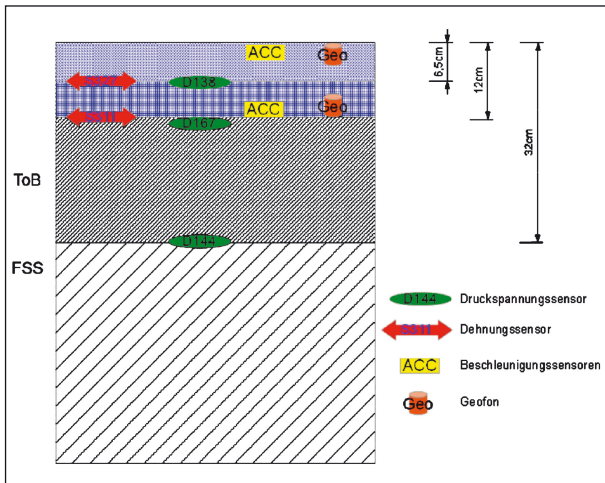


Bild 4-3: Querschnitt der Instrumentierung des Untersuchungsfelds

	Gesamt	FSS	ToB	GA
Druckmessdose	18 (22)	8 (10)	8 (10)	2 (2)
Dehnungsmesselement	14 (20)	-	8 (10)	6 (10)

Tabelleneintrag: Anzahl funktionierender Sensoren (Anzahl eingebauter Sensoren)

Tab. 4-2: Einbau-Erfolgsquote

sowie an der Oberfläche der ungebundenen Kies-Sand Tragschicht in zwei parallelen Reihen in Längsrichtung eingebaut. Dehnungssensoren wurden ebenfalls in zwei parallelen Reihen an der Unterseite der Asphaltdecke sowie in Zwischenlagen des Gussasphaltes eingebaut. Der Abstand der Sensorreihen entspricht dem Abstand der Lastzentren der Zwillingbereifung des MLS30, sodass gewährleistet ist, dass immer die maximale Beanspruchung unter beiden Reifen erfasst wird (Bild 4-4 bis Bild 4-6). In Längsrichtung beträgt der Abstand der Sensoren 50 cm, sodass eine Beeinflussung der Sensoren untereinander minimiert wird. Alle Sensoren – bis auf die Geofone – wurden eigens für den speziellen Anwendungszweck in der BAST entwickelt und gebaut.

Bild 4-4 zeigt die Verteilung der funktionstüchtigen Sensoren auf die Einbaulagen. Die Funktionstüchtigkeit wurde im Projekt ‚Sensortestfeld‘ (SCHERKENBACH, 2013) ermittelt und dort auch detailliert bewertet.

Die Einbau-Erfolgsquote ist in Tabelle 4-2 dargestellt.

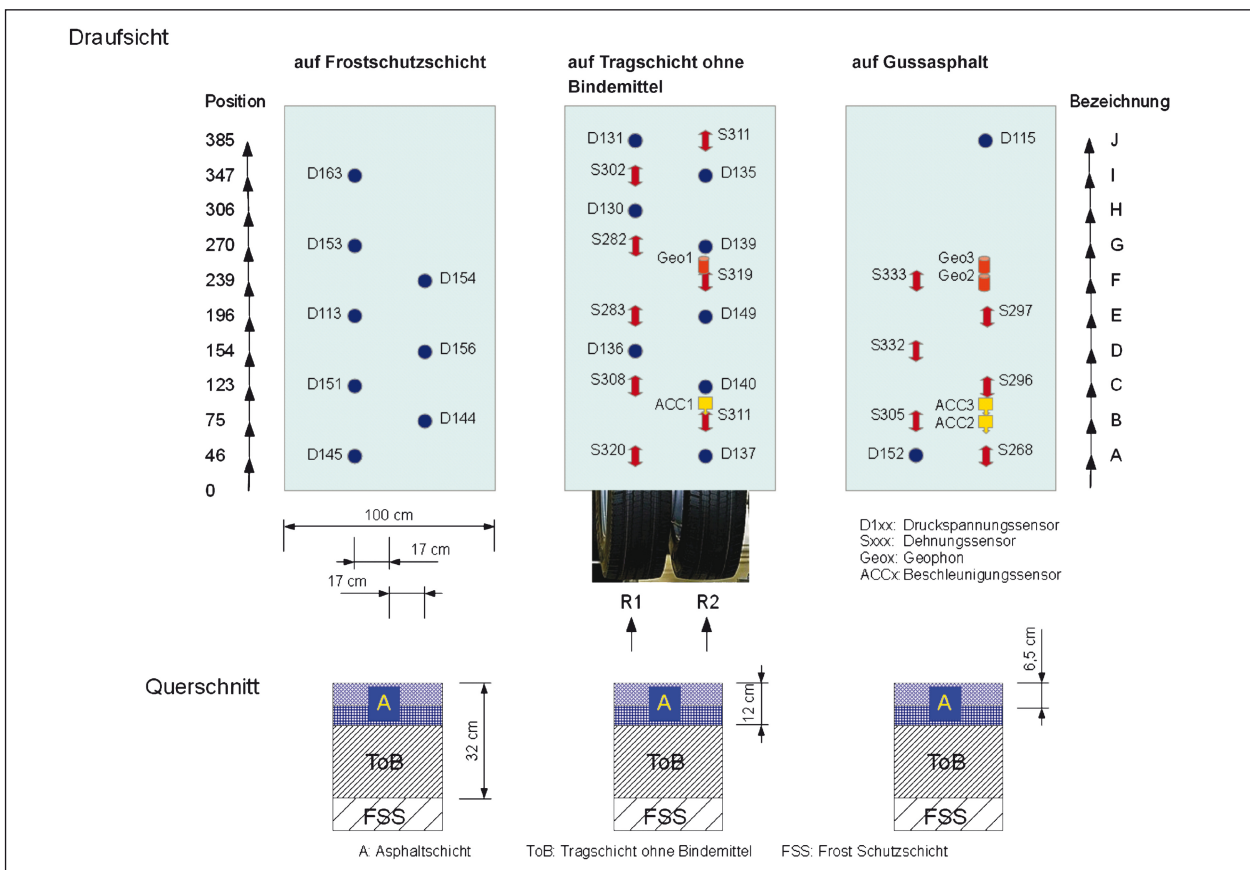


Bild 4-4: Instrumentierung Untersuchungsfeld 4

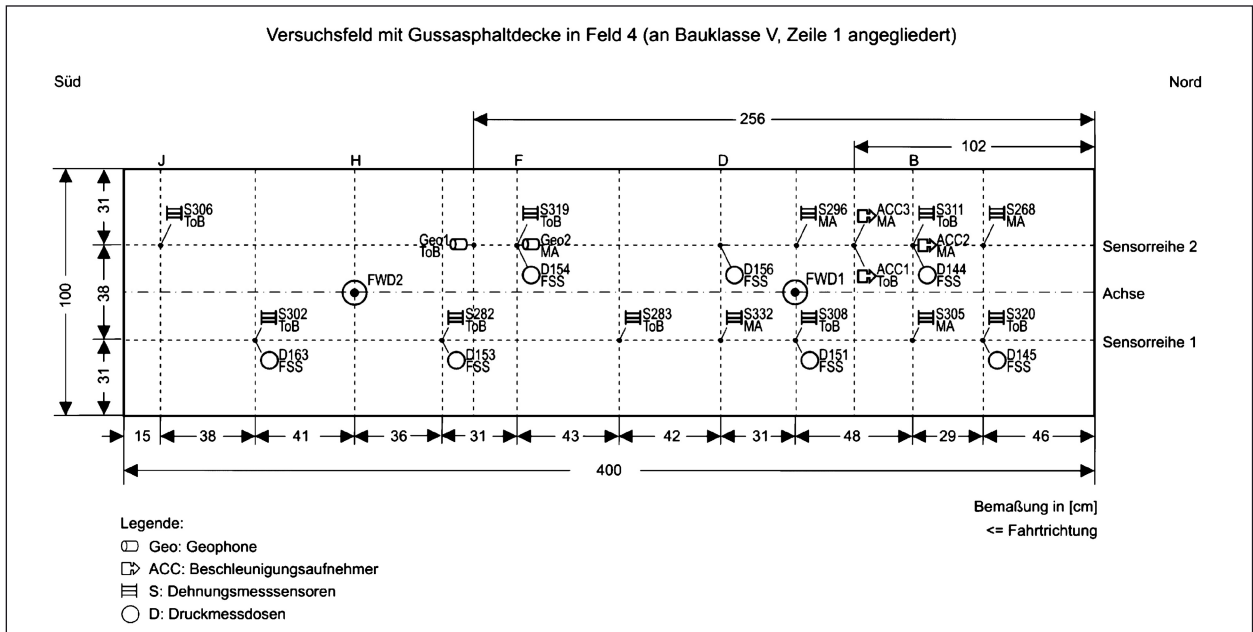


Bild 4-5: Schematische Draufsicht des Untersuchungsfeldes

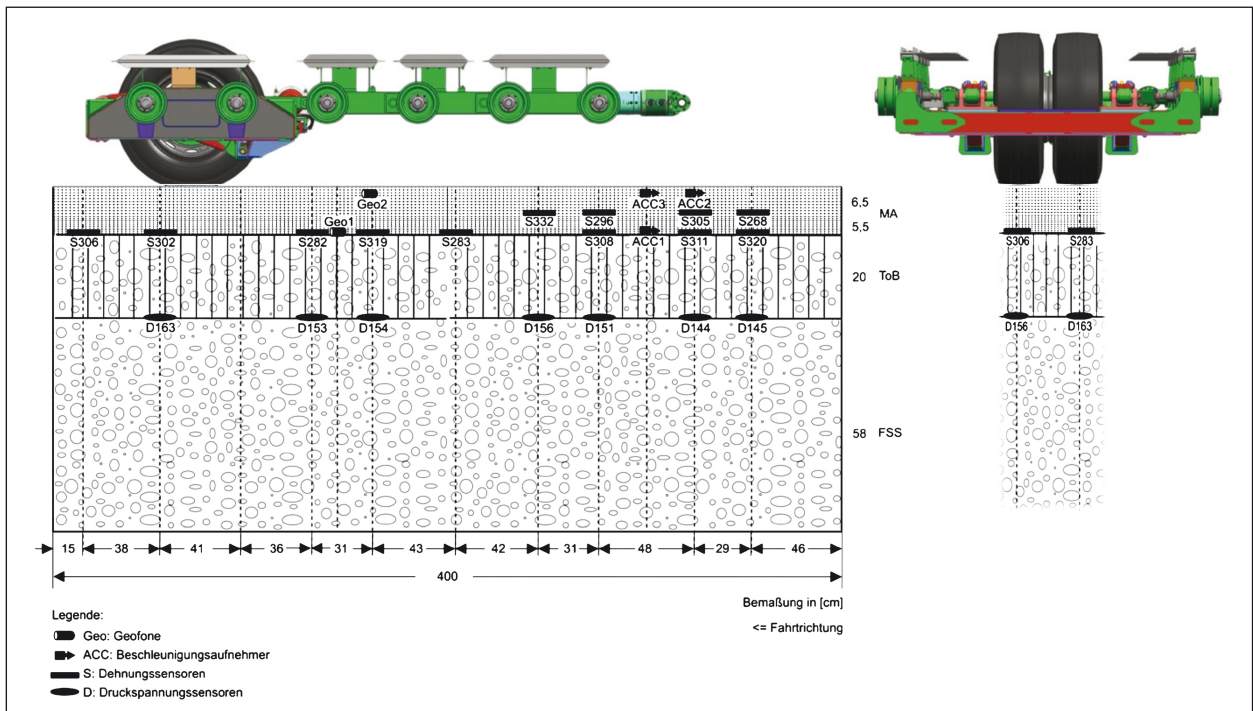


Bild 4-6: Schematischer Querschnitt mit Anordnung der Sensorik

Die Differenzen zwischen der Anzahl der eingebauten und der Anzahl der funktionierenden Sensoren wird auf die Zustände beim Einbau (Gussasphalt mit ca. 240 °C) zurückgeführt. Die Bilanz soll in Zukunft u. a. durch die Verwendung von punktgeschweißten DMS (Dehnungsmessstreifen) und der Verwendung von (externer) professioneller Bestückungstechnik verbessert werden.

4.2 Sensorik

4.2.1 Druckspannungssensor (D)

Die zur Erfassung der Druckspannung eingesetzten Druckspannungssensoren wurden für den in situ Einsatz entwickelt und weisen folgenden Eigenschaften auf:

- linearer Messbereich von 0-1.500 mbar,
- Gesamtmessbereich 0-3.000 mbar,
- 4-20 mA Stromschnittstelle,
- Zweileiteranschluss,
- robustes Aluminiumgehäuse,
- geeignet zum Einbau in den Straßenaufbau,
- Gehäuseschutzart IP 65.

Die Druckspannungssensoren basieren auf dem Prinzip der Messung einer Biegedehnungen an der,



Bild 4-7: Druckspannungssensor

durch äußere Druckspannung auf Biegung beanspruchten, Gehäuseoberseite. Die Biegedehnungen werden mit einer temperaturkompensierten DMS-Vollbrücke (vier Dehnungsmesssensoren auf einem Bauteil) erfasst. Das lineare Ausgangssignal der Brückenschaltung wird von einer nachgeschalteten, integrierten Elektronik in ein druckspannungsproportionales 4-20 mA Ausgangssignal umgewandelt. Diese Anschlussart ermöglicht noch dazu eine Leitungsbruchüberwachung. Der Durchmesser der drucksensiblen Oberseite beträgt 100 mm, die Dicke des Druckspannungssensor 17 mm. Hierdurch ist gewährleistet, dass ein ausreichend repräsentativer Bereich der 0/32 Kies-Sand Tragschicht gleichmäßig erfasst wird und dennoch die Störungen im Aufbau gering gehalten werden. Der lineare Druckbereich wurde zwischen 0 und 1.500 mbar (0,15 MPa) kalibriert.

Die mit den Druckspannungssensoren automatisch erfassten Signale, bei einem Überrollungsintervall des MLS30, sind exemplarisch in Bild 4-8 für die Druckmessdose D156 dargestellt.

4.2.2 Dehnungssensor (S)

Die zur Dehnungsmessung verwendeten Sensoren stammen ebenfalls aus einem längeren Entwicklungsprozess und können wie folgt beschrieben werden:

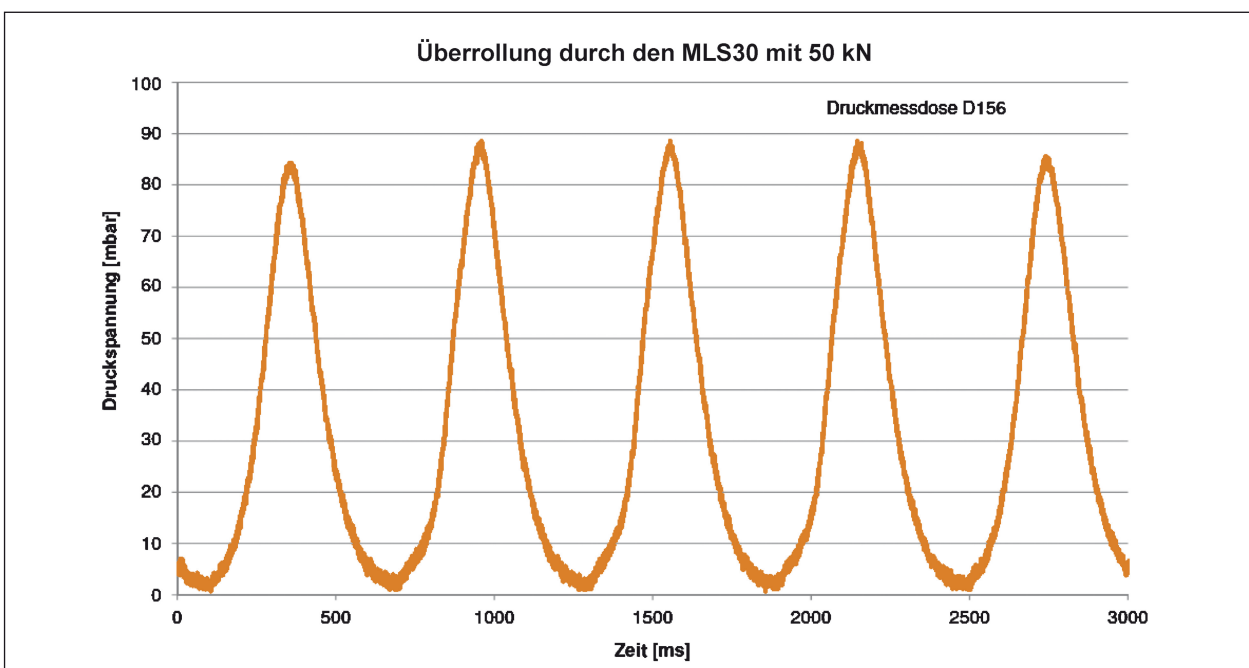


Bild 4-8: Signal der MLS30 Überrollung des D156

- Messbereich -150 (Druck) bis 450 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Zug),
- 4-20 mA Stromschnittstelle,
- Zweileiteranschluss,
- robustes Aluminiumgehäuse,
- geeignet zum Einbau in den Straßenaufbau,
- Gehäuseschutzart IP 65.

Mit den Dehnungssensoren werden die horizontalen Dehnungen in der Asphalt-schicht erfasst. Von besonderem Interesse sind hier die Biegezugdehnungen an der Unterseite des Asphalt-paketes. Die Zugkräfte in der Biegezugzone des Asphaltes werden über Aluminiumanker auf einen Epoxydharzstreifen übertragen. Die Längsdehnung des Epoxydharzstreifens wird mit einer temperaturkompensierten DMS-Vollbrückenschaltung erfasst. Die Umwandlung in ein entsprechendes Ausgangssignal erfolgt analog zum Druckspan-

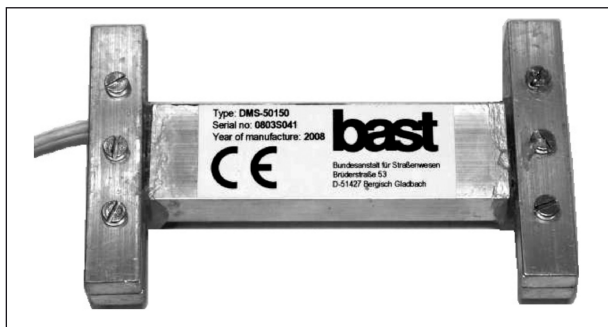


Bild 4-9: Dehnungssensor

nungssensor. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgte im Bereich von -150 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Druck) bis 450 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Zug). Die Länge des Sensors zwischen den beiden Aluminiumankern beträgt 150 mm. Hierdurch ist gewährleistet, dass die Dehnungen in einem repräsentativen Bereich des Asphaltes erfasst werden. Die Dehnsteifigkeit des Sensorelementes ist geringer als die des umgebenden Materials, sodass keine Behinderung der Längsdehnung zu einer Verfälschung der gemessenen Werte führen kann. Durch die kompakte Bauform wird die Störung der Struktur bei gleichzeitiger Funktionalität minimiert.

Die mit den Dehnungsmesselementen automatisch erfassten Signale, bei einem Überrollungsintervall des MLS30, sind exemplarisch in Bild 4-10 für das Dehnungsmesselement S319 dargestellt.

4.2.3 Temperatursensor (T)

Teil der automatischen Messwerterfassung ist die Dokumentation der Temperatur mittels der in den Asphalt-schichten eingebauten Temperatursensoren, die folgende Eigenschaften aufweisen:

- Messbereich -30 bis 50 °C,
- hohe Genauigkeit,
- 4-20 mA Stromschnittstelle,
- Zweileiteranschluss,
- robustes Aluminiumgehäuse,

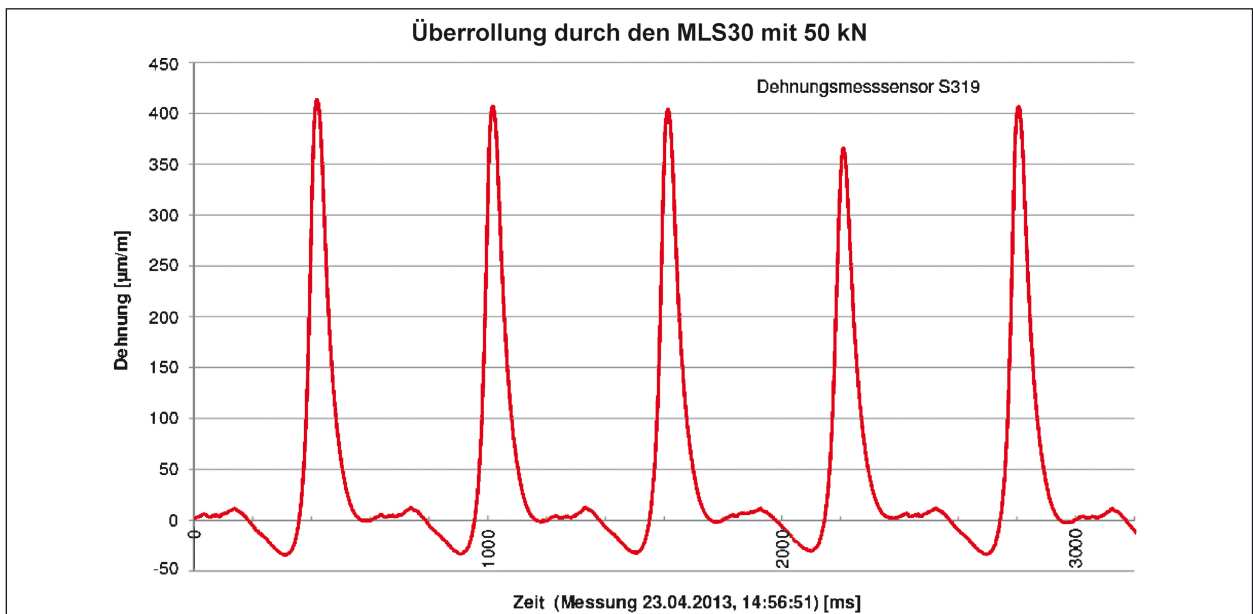


Bild 4-10: Signal der MLS30 Überrollung über S319



Bild 4-11: Temperatursensor

- geeignet zum Einbau in den Straßenaufbau,
- Gehäuseschutzart IP 67.

Die in die Konstruktion eingebauten Temperatursensoren sind selber entwickelt worden und decken einen Messbereich von -30 bis 50 °C ab. Das lineare Ausgangssignal eines Halbleiterelements wird von einer nachgeschalteten integrierten Elektronik in ein temperaturproportionales 4-20 mA Ausgangssignal umgewandelt.

4.2.4 Geofon (Geo)

Zur Erfassung der Verformung der Oberfläche infolge eines definiert eingeleiteten Impulses werden Geofone schon lange beim FWD (Falling Weight Deflectometer) verwendet. Geologen verwenden häufig Geofone zur Analyse des Schichtaufbaus. Dabei wird vor allem die Laufzeit ausgewertet, die ein definierter Impuls (Hammerschlag oder auch Probesprengung) benötigt. Anders als bei den genannten Anwendungen sind die Geofone im Untersuchungsfeld fest eingebaut.

Aufgrund ihrer kleinen Bauform (\varnothing 25,4 mm, Höhe 36 mm) und der punktuellen Wirkungsweise erscheinen sie für einen nachträglichen Einbau geeignet. Insbesondere bei der Untersuchung älterer Straßen (Bestandnetz) erscheint die Möglichkeit einer nachträglichen Instrumentierung wünschenswert.

Ein Geofon besteht aus einem Permanentmagneten, einer Spule und einer Blattfeder. Die Feder bestimmt dabei das Dämpfungsmaß des Systems und damit die Fähigkeit, kurz aufeinander folgende Ereignisse voneinander trennen zu können. Die

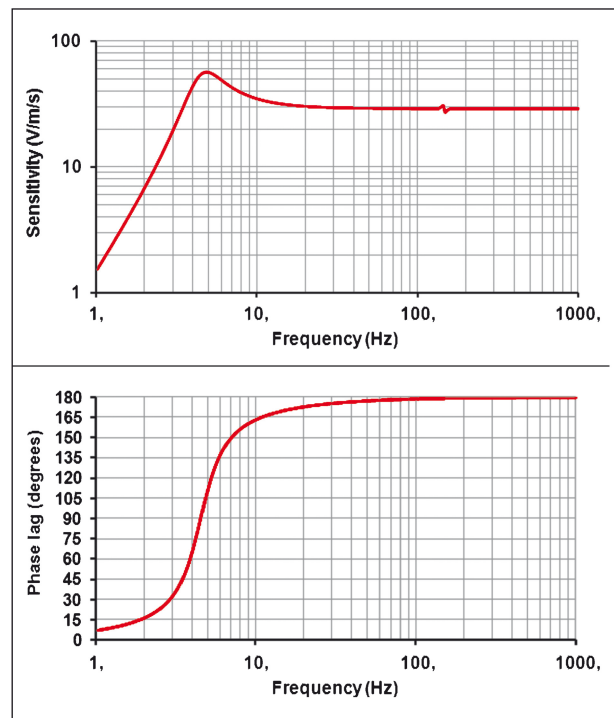


Bild 4-12: Datenblatt Auszug (Sensor Nederland bv, 2013)

Spule ist in diesem System die aktive seismische Masse, die dem Impuls der Schicht, in die das Geofon integriert ist, folgt. Im Gegensatz dazu ist der Permanentmagnet fest mit dem Gehäuse und der Schicht verbunden.

Gesamt betrachtet liegt ein elektrodynamischer Wandler vor, der nach dem Induktionsgesetz arbeitet:

$$U \sim B \times v$$

Dabei ist B das Maß für das vom Permanentmagneten aufgespannte magnetische Feld und v die dazu senkrecht wirkende Geschwindigkeit der Spule.

Die Empfindlichkeit dieses Systems wird herstellenseitig mittels Datenblatt, siehe Bild 4-12, angegeben. Für das verwendete Geofon beträgt die Empfindlichkeit demnach 28,8 V/m/s. Mit dieser Kenntnis lässt sich das Spannungssignal des Geofons leicht in eine Geschwindigkeit umwandeln.

Bei der Auswertung eines Geofonsignals müssen weitere Informationen des Datenblatts genau beachtet werden. Die dargestellten Datenblattauszüge wurden mit dem vom Hersteller im Internet bereitgestellten Tool „Response Calculator“ (Sensor Nederland bv, 2013) generiert. Nominal wird die untere Grenzfrequenz des verwendeten Geofons mit 4,5 Hz angegeben, die Empfindlichkeit ist

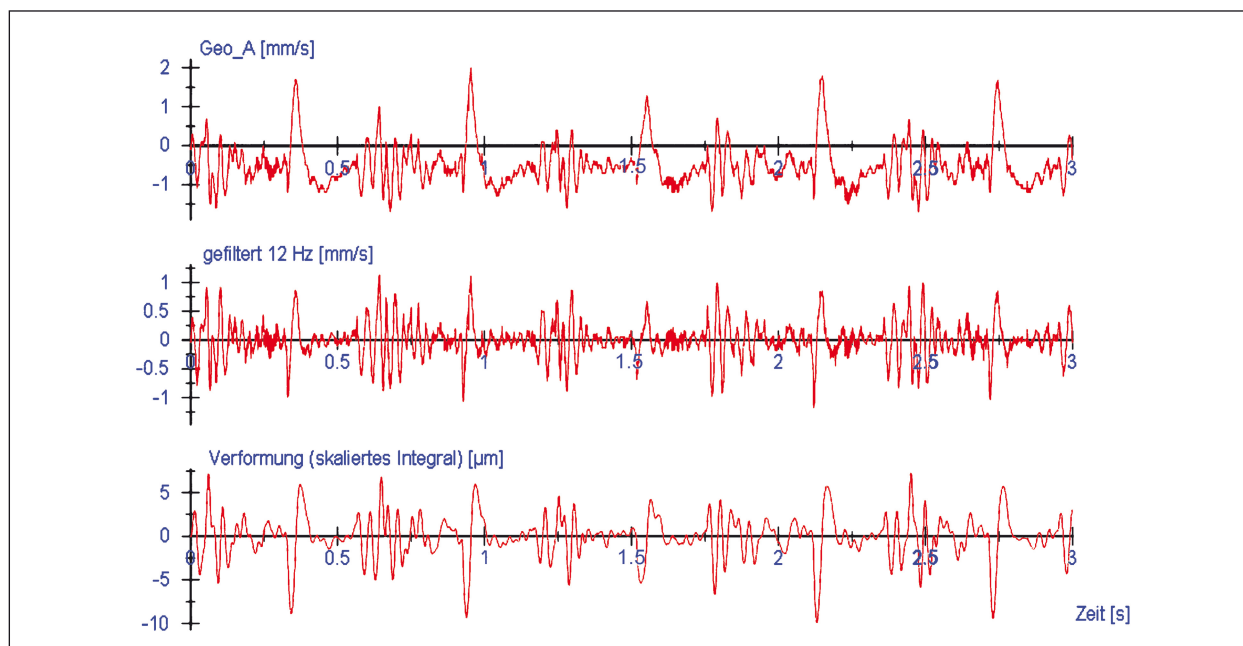


Bild 4-13: Signalaufbereitung beim Geofon

aber erst ab ca. 12 Hz linear und entspricht dann dem angegebenen Wert. Betrachtet man darüber hinaus den Phasengang des Sensors, so erkennt man eine Veränderung um 180° im unteren Bereich. Zur Vermeidung von Fehlmessungen wird in den Auswertungen daher das Signal erst ab 12 Hz verwendet werden. Der fehlerbehaftete Bereich lässt sich mit einem Hochpassfilter (auch nach der Messwertaufbereitung, also offline) eliminieren. Leider lässt sich auch aus dem so gewonnenen Signal (physikalisch betrachtet Geschwindigkeit) noch nicht auf eine Beanspruchung schließen. Dazu ist eine einfache Integration über die Zeit notwendig, die dann als Ergebnis einen Weg liefert. Dieser ist so zu interpretieren, dass sich die Schicht entsprechend in z-Richtung (Richtung Erdmittelpunkt) bewegt.

Ein bei einer Überrollung durch den MLS30 mit ca. 50 kN und 6.000 Überrollungen/Stunde erfasstes und im Anschluss aufbereitetes Signal wird in Bild 4-13 gezeigt.

Der Skalierungsfaktor zur Umwandlung des Spannungssignals U in die Geschwindigkeit mm/s fand schon bei der Signalerfassung (online) statt. Für die Filterung wurde ein digitaler Hochpassfilter (IIR) 4. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 12 Hz verwendet (Filtertyp: Bessel, Nullphasigkeit erzwungen, Korrektur des Anfangs- und Endoffsets). Zur Integralbildung steht eine passende Funktion zur Verfügung.

4.3 Messwertaufbereitung

Für ein kontinuierliches Strukturmonitoring wurde eine automatisierte Erfassung aller straßenseitigen Sensoren in einem Zeitfenster von ca. 30 Sekunden alle 15 Minuten realisiert. Die Abtastfrequenz beträgt dabei 1.000 Hz. Dies dient der Detektion eines möglichen Schädigungsverlaufes und der Bestimmung von Indikatoren zur Erkennung von strukturellem Versagen.

Hardware

Allen eingesetzten Sensoren ist gemein, dass die Signale kabelgebunden übertragen werden. Nach guten Erfahrungen werden diese Verbindungen mit dem PC-System, wie in der Netzwerktechnik üblich, hergestellt. Die Sensorart bestimmt den weiteren Aufwand, bis aus dem analogen Wert ein digitaler und damit für den Computer verarbeitbarer Wert geworden ist.

Druckspannungs-, Dehnungs- und Temperatursensoren werden über eine zweidrahtige 4-20 mA Stromschleife angeschlossen. Eine Strom/Spannungswandlereinheit (I/U) stellt dazu eine Hilfsspannung zur Verfügung und begrenzt das Signal im Kurzschlussfall. Zudem wird der Strom, der vom Sensor proportional zum Messwert geregelt wird, in eine Spannung umgewandelt.

Bei den eingesetzten Geofonen handelt es sich prinzipiell um Spulen, die nach dem Generator-

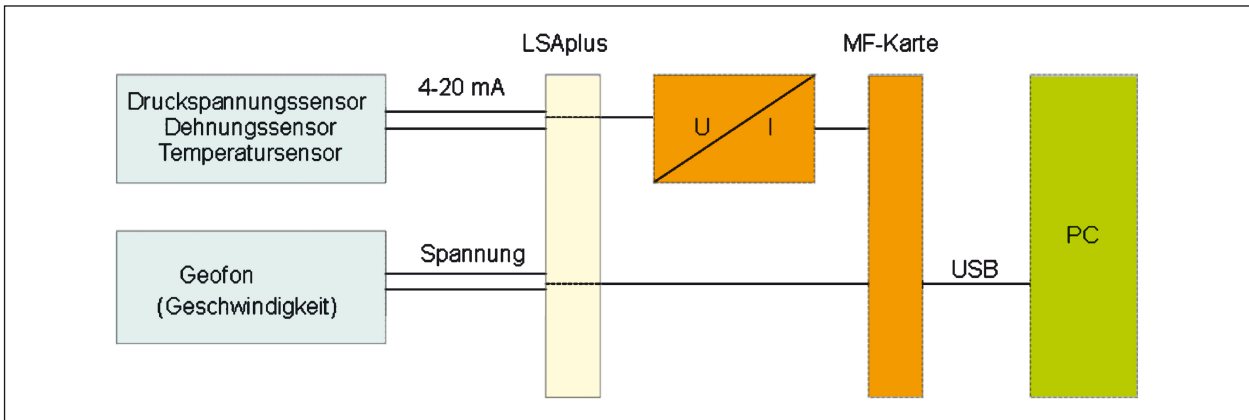


Bild 4-14: Hardware schema der Messwerterfassung

prinzip eine Spannung proportional zur Bewegung erzeugen. Diese Spannung liegt im Bereich mehrerer Volt. Dieses Signal benötigt keine weitere Aufbereitung.

Nach derartiger Signalaufbereitung stehen alle Signale als Spannungssignale zur Verfügung und werden von der Multifunktionskarte digitalisiert an den Computer weitergeleitet.

Software

Die Multifunktionskarte reicht die Spannungssignale der Sensoren über eine USB-Verbindung digitalisiert an den PC weiter. Sie stellt damit die Schnittstelle zwischen Hard- und Software dar. Eine sensorspezifische Skalierung erfolgt treiberseitig über ein vom Anbieter der Erfassungskarte bereitgestelltes Programm. Aufgrund der laborseitig vorgenommenen Kalibrierung reicht dabei für die Dehnungs-, Druckspannungs- und Temperatur-

sensoren eine typspezifische, allgemeine Skalierung.

Die Geofone werden mittels Parallelwiderstand derart abgeglichen, dass sich ein einheitlicher Messwiderstand zwischen 350 und 360 Ω einstellt. Dann kann auch bei ihnen eine allgemeine Skalierung verwendet werden.

Jede der beschriebenen Skalierungen besteht dabei aus Bewertungsfaktoren und physikalischen Größen.

Gesteuert wird die Signalerfassung von einem eigenentwickelten Anwenderprogramm. Dies ermöglicht eine Auswahl der zu verwendenden Sensoren, steuert Start und Ende des Messvorgangs, bestimmt die Messfrequenz und bereitet die erfassten Daten derart auf, dass eine selbsterklärende TXT-Datei in Tabellenform erstellt und abgespeichert werden kann. Details zum Programm sind im Projekt „Sensortestfeld“ (SCHERKENBACH, 2013) dokumentiert.

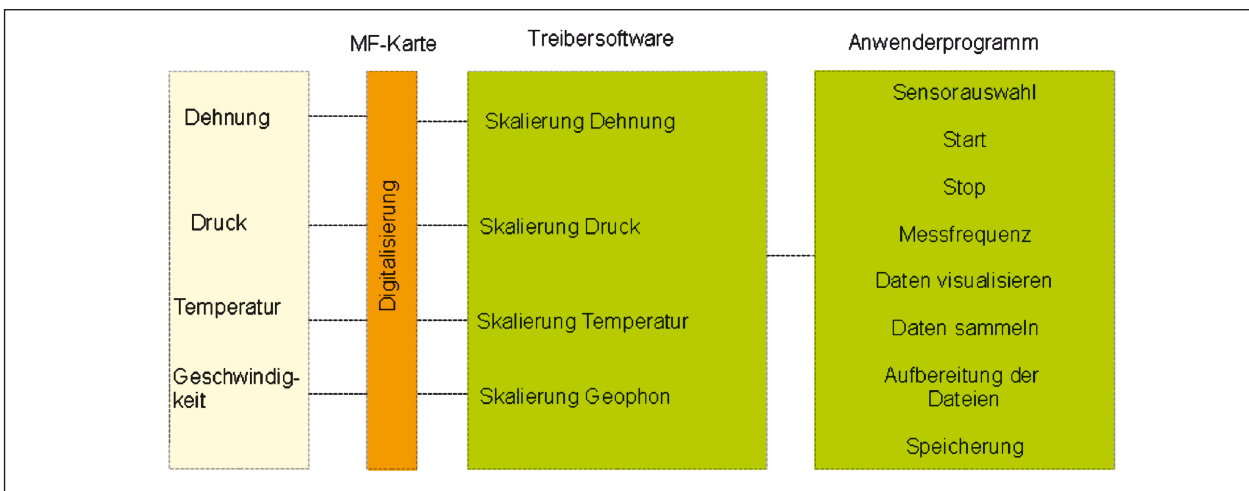


Bild 4-15: Softwareschema der Messwerterfassung

Automatische Erfassung

Zur Überprüfung der Funktionalität der Sensoren war eine Start-Stopp-Applikation ausreichend. Eine kontinuierliche Überwachung, wie sie im hier beschriebenen Projekt gefordert wurde, verlangt nach einer automatisierten Messwernerfassung. Die verwendete Software beinhaltet auch die dafür nötigen Steuermodule, sodass auch diese Funktionalität ins Programm integriert werden konnte.

Mit dem Programm wurden, während des MLS30 Betriebs, im Intervall von 15 Min alle Sensoren mit einer Abtastfrequenz von 1.000 Hz erfasst und das Ergebnis in einer Datei festgehalten. Neben den Sensordaten (skaliert und inkl. der physikalischen Einheit) beinhaltet jede der Dateien einen Zeitstempel sowie in einer separaten Kopfzeile die Temperaturdaten.

5 Versuchsdurchführung und Messwertauswertung

Die Belastung des Untersuchungsfeldes erfolgte mittig mit einer Radlast von 50 kN und einem Reifenfülldruck von 8,5 bar bei konstanter Geschwindigkeit von 21 km/h (6.000 Überrollungen/Stunde).

Unterbrochen wurde der 8 h Betrieb nur durch die erforderlichen Wartungsintervalle des MLS30. Hierfür war es teilweise erforderlich, den MLS30 von der Belastungsposition zu versetzen. In diesen Pausen konnten die notwendigen Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD sowie Querprofilmessungen durchgeführt werden.

5.1 MLS30-Belastung

Für eine Verhaltensanalyse des Asphaltaufbaus ist der regelmäßige Signalvergleich während des Belastungsversuchs von Interesse. Zu diesem Zweck wurden die integrierten und im vorherigen Kapitel beschriebenen Sensoren verwendet.

Wegen des großen Einflusses der Temperatur auf die Materialeigenschaft Elastizität muss die Temperatur zwingend mit erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

5.1.1 Temperatur im Asphaltaufbau während der MLS30-Belastung

Im Asphaltaufbau sind jeweils zwischen den Gussasphaltschichten und direkt auf der Asphalttragschicht je zwei Temperatursensoren eingebaut. In Bild 5-2 ist deutlich zu sehen, dass die beiden Sen-

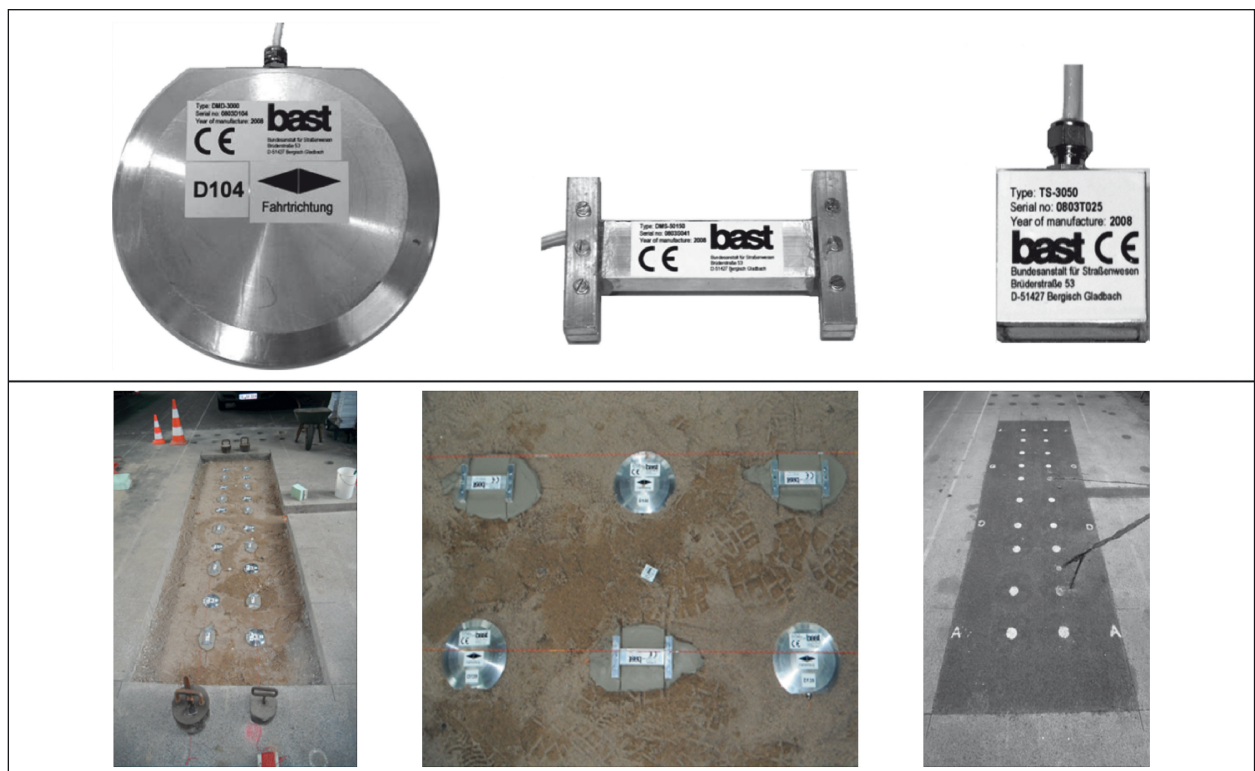


Bild 5-1: Messfeld mit Druckspannungs-, Dehnungs- und Temperatursensoren

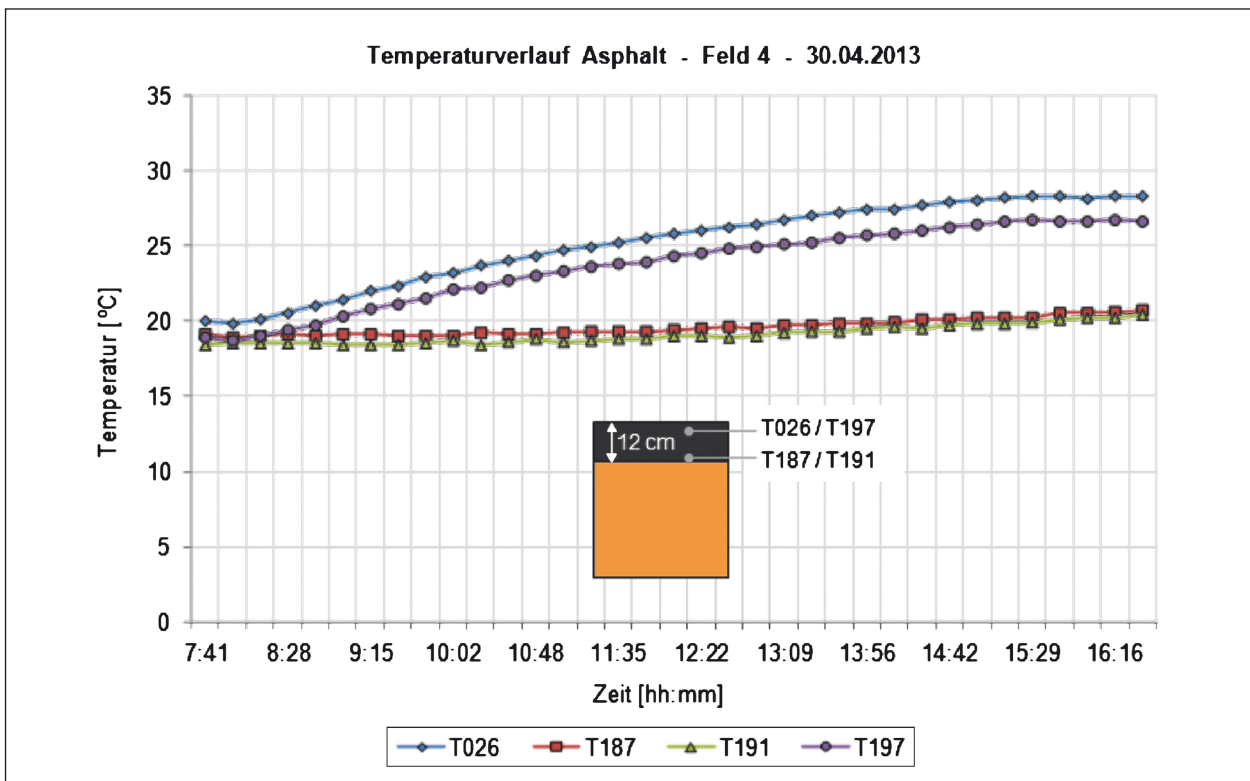


Bild 5-2: Temperaturgang im Asphalt während eines Belastungstages

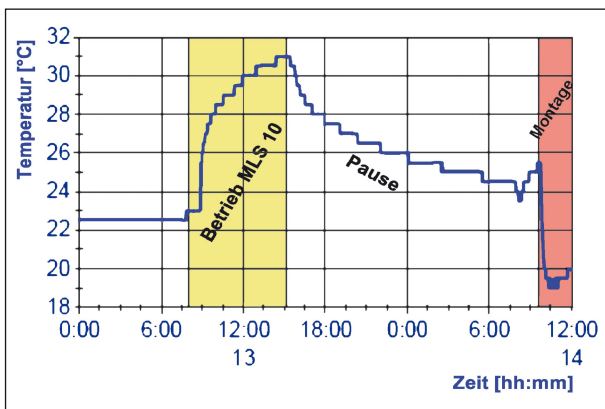


Bild 5-3: Erhöhung Lufttemperatur an der Oberfläche

soren zwischen den Gussasphaltschichten einen Temperaturanstieg von ca. 8 °C innerhalb eines Belastungstages verzeichnen, während die Sensoren direkt auf der Asphalttragschicht keine signifikante Temperaturänderung zeigen.

Zum einen zeigt diese Messung eine zuverlässige Funktionsweise der Sensoren, da diese paarweise die gleichen Temperaturen messen. Zum anderen deutet dieser Temperaturanstieg auf einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss des MLS30-Betriebs hin. Da die Messungen der Lufttemperatur direkt an der Oberfläche (Bild 5-3) und in 90 cm Höhe (Bild 5-4) das gleiche Ergebnis zeigen, wird dieses Ver-

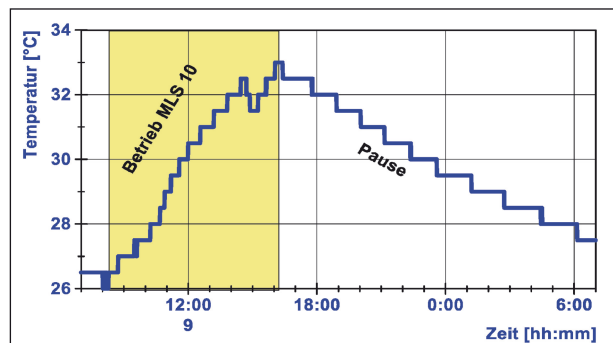


Bild 5-4: Erhöhung Lufttemperatur in 90 cm Höhe

halten durch die erwärmte, umgewälzte Luft innerhalb des Gehäuses des MLS30 erklärt.

Die innere Reibung im Asphalt, aufgrund der Dauerbelastung, hat nach jetzigem Stand kaum einen Einfluss auf die deutliche Erhöhung. Weitere Untersuchungen zum Temperatureinfluss durch den Betrieb des MLS30 werden angestellt.

5.1.2 Dehnung und Druckspannung während der MLS30-Belastung

Die Belastung wird, wie im Kapitel 2 beschrieben, durch vier Bogie erreicht, die ihrerseits einzeln justiert werden müssen. Der Einfluss der sich daraus ergebenden Toleranzen innerhalb der Bogie wurde

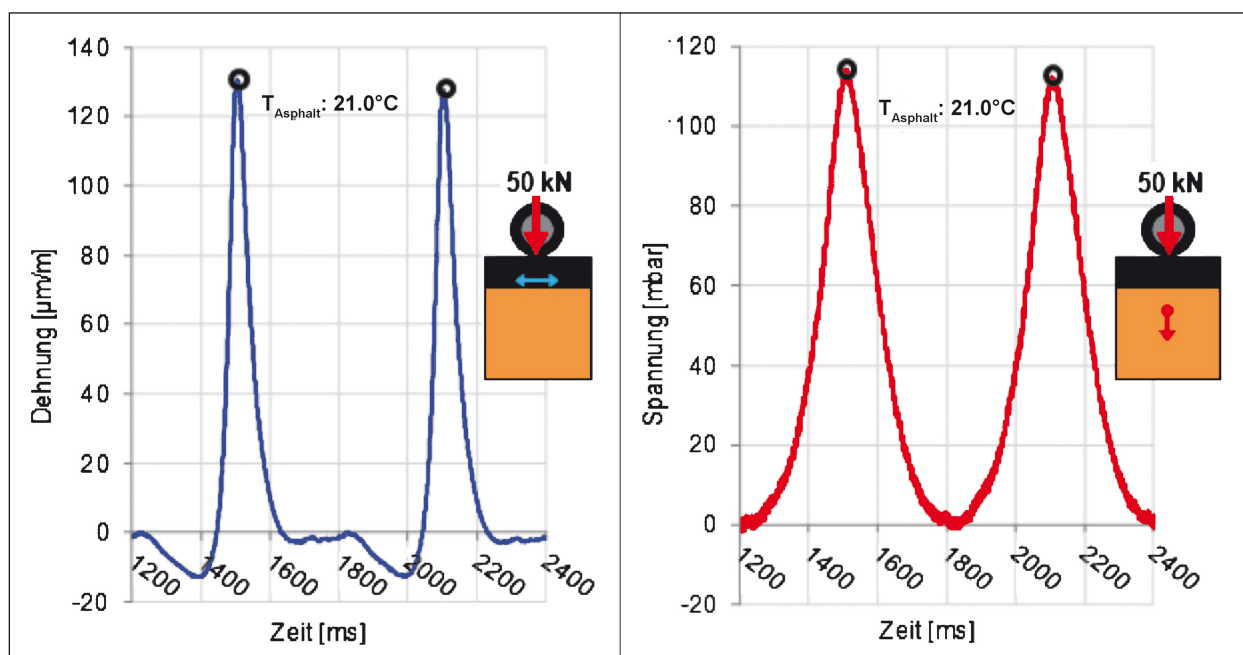


Bild 5-5: Dehnungen im Asphalt (links); Druckspannungen in der ToB (rechts)

in dieser Untersuchung vernachlässigt. Gerechtigt wurde diese Vernachlässigung durch regelmäßige Kontrollen (statisch und dynamisch).

Typische Signale der horizontalen Dehnungen an der Unterseite des Asphaltes in Belastungsrichtung, sowie die vertikalen Druckspannungen in 33 cm Tiefe infolge einer Überrollung des zwillingsbereiften MLS30 sind in Bild 5-5 dargestellt.

Das linke Diagramm in Bild 5-5 zeigt einen Wechsel zwischen Druck- und Zugdehnungen an der Unterseite der Asphaltschicht während einer Radüberrollung. In den ungebundenen Schichten, rechtes Diagramm, zeigt sich eine Druck-Schwellbeanspruchung. Für die weiteren Betrachtungen sind insbesondere die Spitzenwerte relevant.

Zur Kennzeichnung des strukturellen Verhaltens sind in Bild 5-6 die Spitzenwerte der Zugdehnungen im Asphalt und Druckspannungen in der ungebundenen Tragschicht in Abhängigkeit der Überrollungen, sowie die mittleren Asphalttemperaturen dargestellt. Innerhalb eines Belastungstages zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Dehnungen und Spannungen proportional zur Temperatur. Im Anschluss an die Belastungspausen (wartungs- bzw. arbeitszeitbedingt) lässt sich bei Wiederaufnahme der Belastung, ein Rückgang der Spitzenwerte erkennen.

Die Langzeitbetrachtung des Dehnungs- und Spannungsniveaus zeigt ein leichtes Ansteigen der Spitzenwerte.

Eine strukturelle Schädigung, die mit einem Anstieg der Dehnung und Spannung einhergeht, lässt sich nach 300.000 Überrollungen nicht eindeutig erkennen. Eine Fortsetzung der Dauerbelastung ist geplant.

5.1.3 Geofonsignale während der MLS30-Belastung

Auch an den Geofonsignalen lässt sich die Überrollung durch den MLS30 erkennen, allerdings ist der Signalabstand zum Rauschen bzw. Schwingen in den „Pausen“ dazwischen sehr gering (Bild 4-13). Dennoch wurde der Versuch unternommen, den Signalverlauf über die 300.000 Überrollungen darzustellen. Da hierbei zunächst nur das relative Verhalten von Interesse ist, wurden die online erfassten Geschwindigkeitssignale verwendet. Auf die Filterung sowie die Integration wurde zugunsten anderer Untersuchungen zeitsparend verzichtet. Des Weiteren wurde, ebenfalls zur Vereinfachung, keine Unterscheidung der Bogie vorgenommen. Aus jeder der im 15 Minuten-Takt erzeugten Dateien wurde für das Geofon A der Maxi- und Minimalwert erfasst, davon die Differenz gebildet und diese dem Index der Datenerfassung zugeordnet. Die Vorgehensweise entspricht also der, die bei den Dehnungs- und Druckspannungssensoren angewandt wurde.

Da sich diese Darstellung gut mit der für Dehnungs- und Druckspannungssensoren deckt, wurde auch

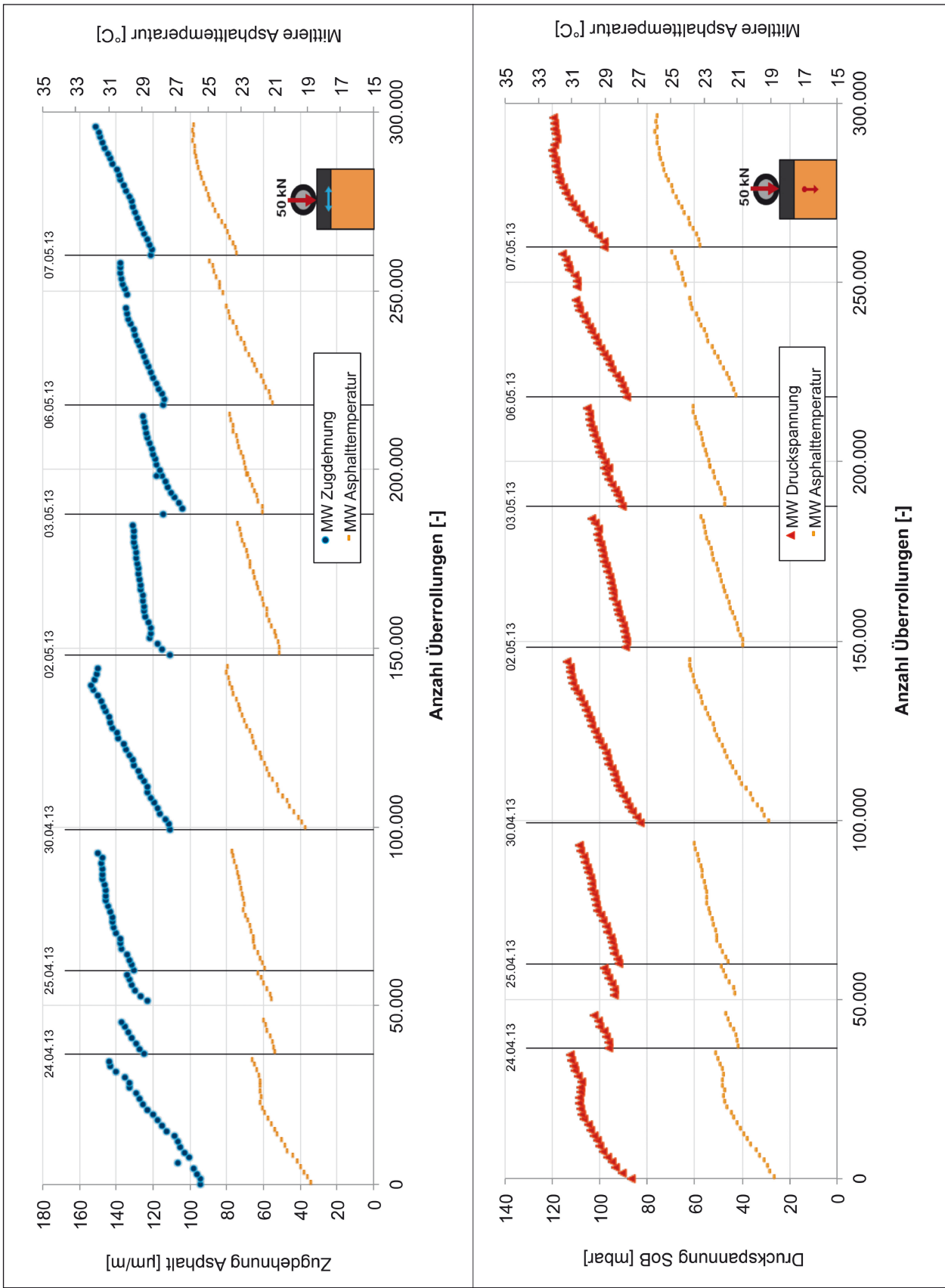


Bild 5-6: Langzeitbetrachtung Dehnungs- und Spannungsniveaus

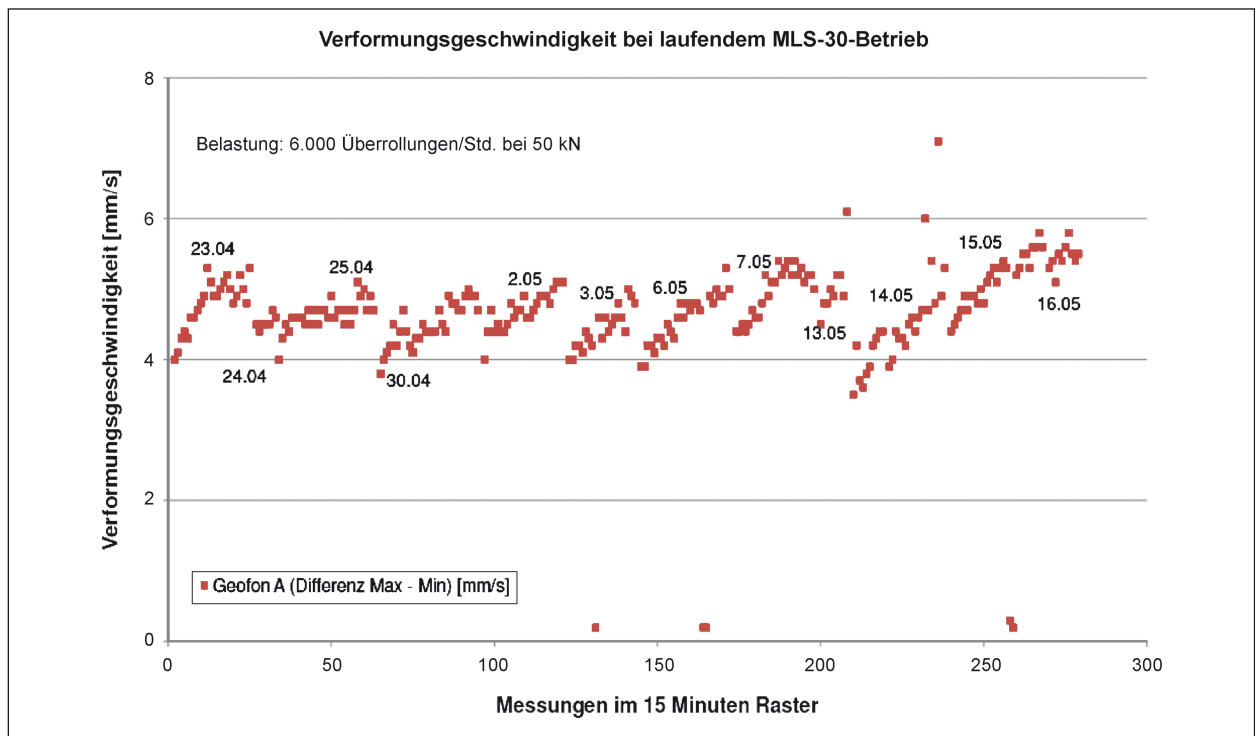


Bild 5-7: Langzeitergebnis der Geofonsignale

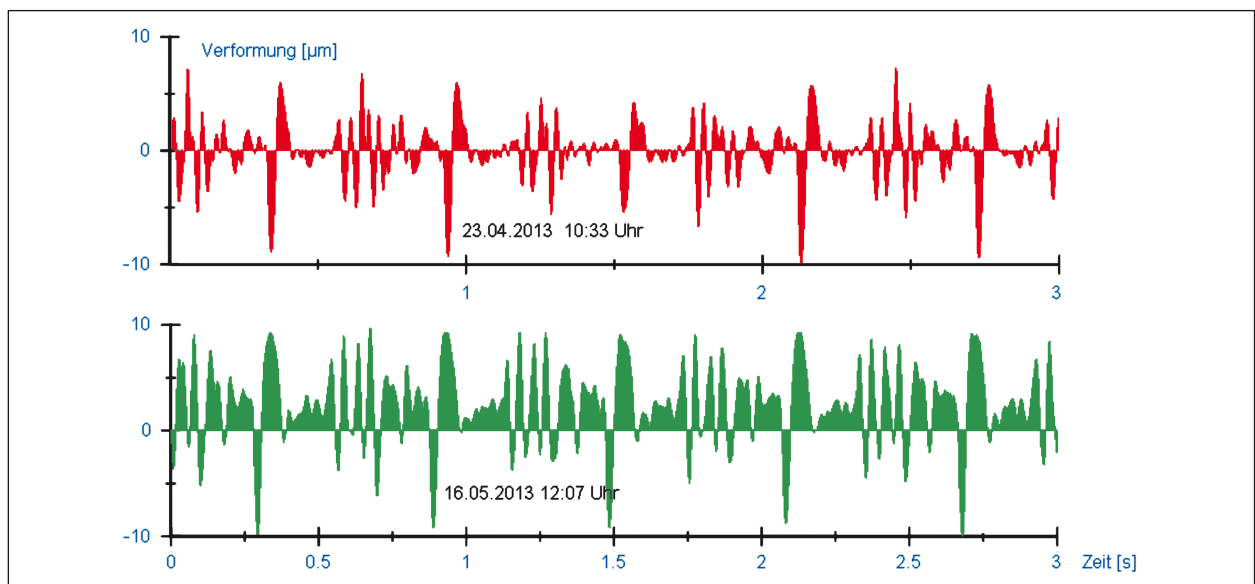


Bild 5-8: Verformungsfunktion durch Überrollung mit dem MLS30

der Vergleich einer Messung mit kleiner Amplitude (niedrige Temperatur) mit einer Messung mit großer Amplitude (hohe Temperatur) vorgenommen. Dabei wurden für beide Messpunkte die sich ergebenden Verformungswerte dargestellt (Signalaufbereitung mit Filter und Integralbildung).

In Bild 5-8 ist deutlich eine Zunahme der Verformung zwischen den beiden Messzeitpunkten erkennbar. Zwischen den gut erkennbaren direkten

Bogie-Überrollungen zeigen sich Schwingungsercheinungen des Asphaltaufbaus.

5.2 FWD-Messungen

Im Zuge dieses Projektes wurde auf eine vollständige standardmäßige FWD-Auswertung inkl. Rückrechnungen verzichtet. Die FWD-Daten wurden allerdings zu Kontrollzwecken mit aufgenommen

und werden bei weiteren Untersuchungen an dem Feld mit betrachtet um ggf. dort eine Auswertung durchzuführen. Der innovative Versuchsaufbau mit seiner deutlichen Dichte an Messinstrumenten innerhalb der Konstruktion ermöglichte eine Auswertung der während der FWD-Messung erzeugten Sensorsignale.

5.2.1 Sensorauswertungen zum FWD-Impuls

Neben der automatischen Erfassung im Rahmen der Dauerbelastung wurden die Sensorsignale zusätzlich während der FWD-Messungen aufgezeichnet. Eine entsprechende Option in Form einer Start-Stopp-Funktion innerhalb der Messwerterfassung ermöglichte dieses Vorgehen. Dabei wurde je Messpunkt und Belastungsstufe (50, 70 und 90 kN) jeweils eine Datei angelegt. Diese zusätzlichen Daten können sensorspezifisch dargestellt und ausgewertet werden. Im Weiteren werden vorerst die Belastungsstufen mit 50 kN für eine Auswertung verwendet.

Druckspannungssensoren

Ein typisches Druckspannungsdiagramm, hervorgerufen durch eine FWD-Belastung zeigt den in Bild 5-9 dargestellten Verlauf.

Wie in Bild 5-9 zu erkennen, wurde die FWD-Belastung je Stufe mit drei Kraftstößen durchgeführt. Über die Lastplatte des FWD wird gemäß eines

Masse-Feder-Systems ein Hauptschlag mit Soll-Last und eine Sequenz von Rückschlägen erzeugt. Die Form der Sequenz bildet sich gemäß einer gedämpften Schwingung ab. Bei konstant bleibender Unterlage und Temperatur ist die Funktion dieser Belastungssequenz reproduzierbar. Amplitude und Frequenz hängen maßgebend von der Unterlage unterhalb der FWD-Lastplatte, d. h. des Straßenaufbaus, ab.

Die aus dieser Anregung hervorgehenden Signalverläufe sind in ihrer Amplitude abhängig vom jeweiligen Abstand des Sensors zum FWD-Messpunkt. Alle ausgewerteten Druckmessdosen sind auf der FSS positioniert. Die jeweiligen Abstände zum FWD-Messpunkt können aus Tabelle 5-1 abgelesen werden. Die genaue Positionierung wurde bei der Beschreibung zum Feldaufbau (Kapitel 4.1, Bild 4-5) aufgezeigt.

Für ein 50 kN Impulspaket zeigen sich die Signalverläufe wie in Bild 5-10 dargestellt.

Sensor	Abstand vom FWD-Messpunkt [cm]
DMD 144	52
DMD 145	79
DMD 156	36
DMD 154	118
DMD 153	148

Tab. 5-1: Abstand Druckmessdose zum FWD-Messpunkt 1

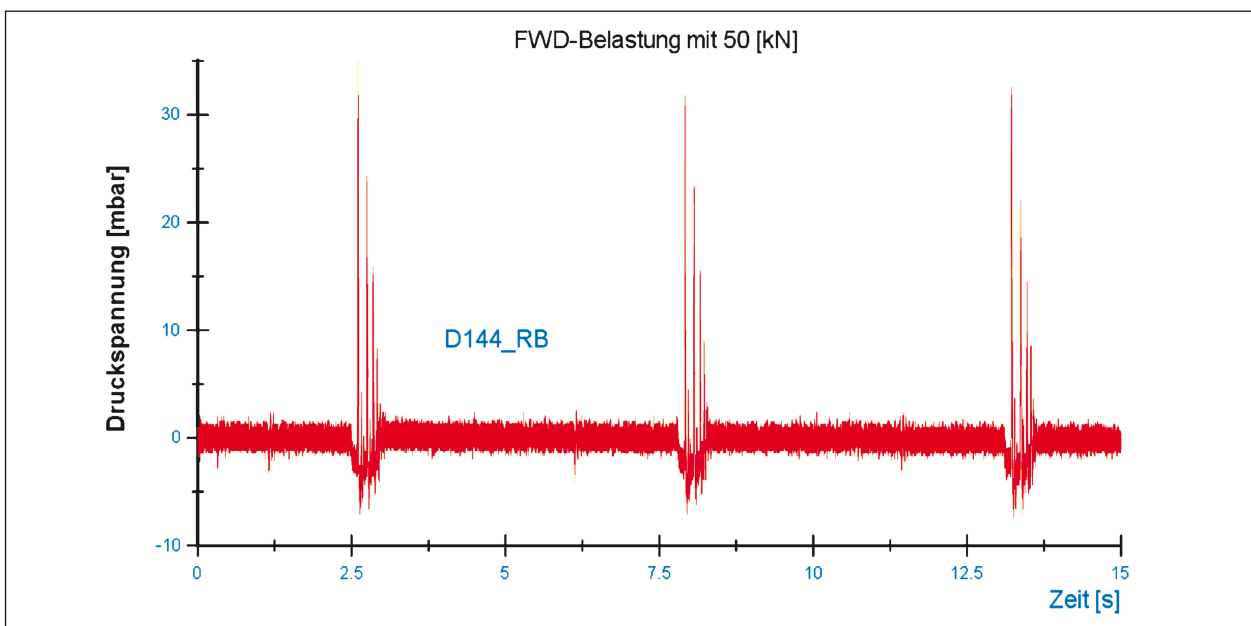


Bild 5-9: Druckspannung bei FWD-Belastung

In dem Maße, in dem man bei den üblichen FWD-Messungen eine Veränderung der Tragfähigkeit während der Dauerbelastung an den Verformungen erkennen kann, scheint dies auch mit den Druckspannungssignalen möglich zu sein. Dazu wurden aus den aufgezeichneten Signalen jeweils die Maximalwerte ermittelt und über der Zeit aufgetragen.

Wegen der starken Abhängigkeit wurde zusätzlich zu den Druckspannungen die Durchschnittstemperatur der vier im Asphaltaufbau integrierten Temperatursensoren hinzugefügt. Die entsprechenden Diagramme der weiteren Druckmessdosen finden

sich im Anhang (4.A). An den Ergebnissen lässt sich noch kein Versagen des Aufbaus erkennen.

Allerdings können aus den Signalen weitere Betrachtungen in Bezug auf eine Veränderung innerhalb der Konstruktion durchgeführt werden, diese werden im Folgenden analysiert.

Zu Beginn sollen die Randbedingungen der Untersuchung aufgelistet werden. Das FWD hat den Kraftstoß an zwei definierten Punkten im Versuchsfeld durchgeführt. Diese Punkte wurden bei jedem Messintervall wiederverwendet. Für den Druckspannungsmesser D156 bedeutet dies, dass der

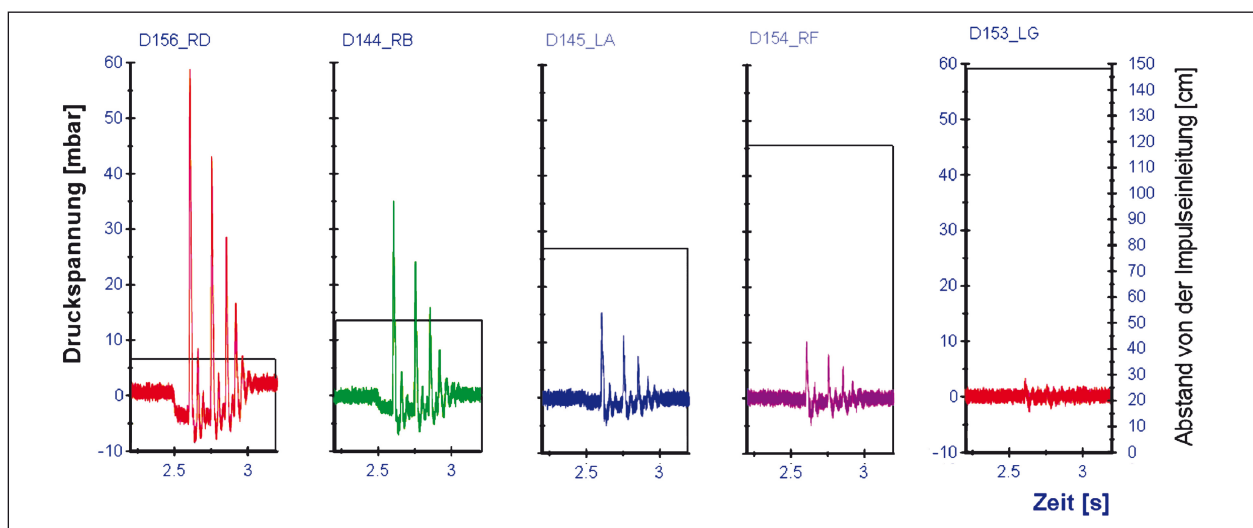


Bild 5-10: Druckspannungen bei FWD-Messungen vs. Abstand

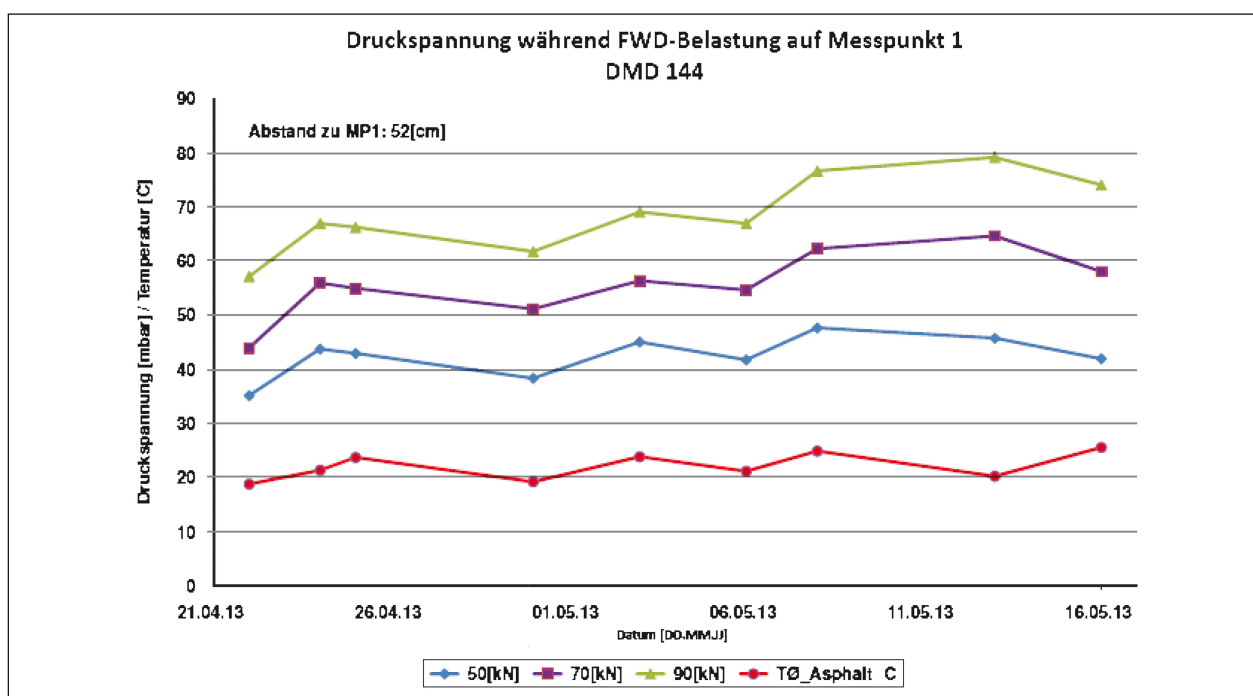


Bild 5-11: Druckspannung DMD144 während der FWD-Messungen

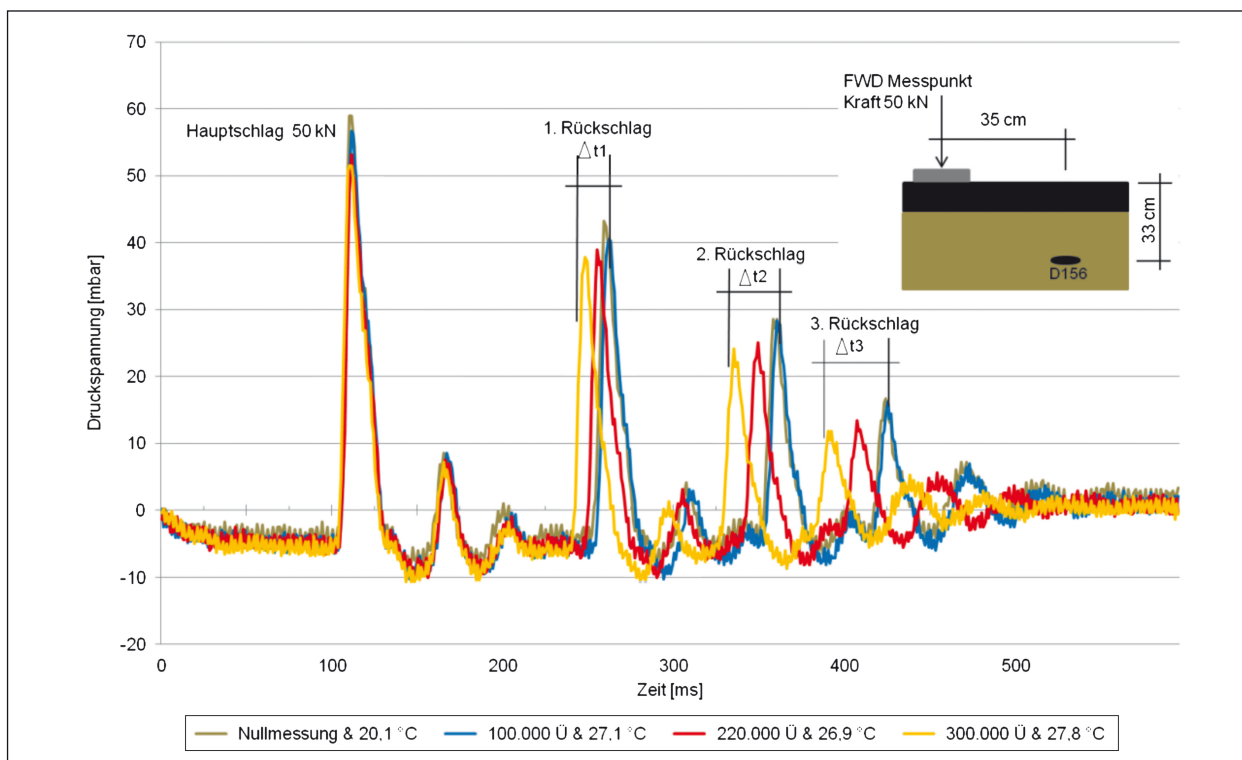


Bild 5-12: Druckspannungen in der ToB durch FWD-Belastungssequenz – D156

Lasteinleitungspunkt (FWD-Messpunkt Nr. 1) ca. 35 cm vom Sensor entfernt war. Für die hier durchgeführte Auswertung wurden die Kraftstöße mit 50 kN verwendet. Bei der Auswertung sind nur die ersten Kraftstöße des jeweiligen Messintervalls betrachtet worden. Das bedeutet, dass nur die ersten 600 ms in der Untersuchung relevant in die Auswertung eingeflossen sind.

Bei der Betrachtung von Bild 5-12 und allen weiteren Auswertungen der Sensoren innerhalb dieser Betrachtung, ist der Hauptschlag von allen Messungen genau übereinander gelegt worden. Dadurch lassen sich die Kurvenverläufe je nach Anzahl der Überrollungen betrachten. Innerhalb der ersten 100.000 Überrollungen ist noch keine Verschiebung in der Schwingungsdauer erkennbar. Bei den darauffolgenden Messungen ist eine Verkürzung der Schwingungsdauer eindeutig erkennbar. Die Verschiebung der letzten Peaks in den Kurven beläuft sich auf 30 ms.

Diese Art der Verschiebung lässt sich bei allen auswertungsrelevanten Druckmessdosen erkennen (siehe Anhang 5.A). Genau die gleiche Verschiebung wie oben beschrieben ist ebenfalls bei der Betrachtung der Druckmessdose D145 erkennbar, obwohl D145 80 cm vom Lasteinleitungspunkt entfernt liegt. Obwohl unterschiedliche Entfernungen zwischen Einleitungspunkt und Sensor liegen, kor-

respondieren die Veränderungen der Verschiebung zueinander.

Durch diese Analyse lässt sich zeigen, dass die Signale der im Aufbau integrierten Sensoren zur qualitativen Bewertung der Reaktion des Straßenaufbaus auf eine FWD-Belastung herangezogen werden können.

Die Verkürzung der Zeitintervalle zwischen den Rückschlägen deutet auf eine strukturelle Veränderung der Unterlage, d. h. des Straßenaufbaus, hin. Diese gilt es bei Fortsetzung der Dauerbelastung weiter intensiv zu beobachten und hinsichtlich des Grades der strukturellen Schädigung zu analysieren. Diese Beobachtungen bieten einen Ansatz zur Beschreibung und Bewertung der strukturellen Veränderung im Oberbau und somit möglicherweise zur Bewertung der strukturellen Substanz.

Eine weitere Betrachtung befasst sich mit den Lastpausen, die im Asphalt unterschiedliche Auswirkungen hinterlassen. Durch eine Lastpause sollte es möglich sein, dass sich der Aufbau in einer besonderen Art regenerieren kann. Dies würde eigentlich bedeuten, dass sich die Schwingungsdauer erhöht. Innerhalb dieser Untersuchung ist das nicht der Fall. In Bild 5-13 sind die Daten aufgezeichnet, wie sich die Lastpause nach 100.000 Überrollungen auf die Konstruktion auswirkt. Dazu lag zwischen

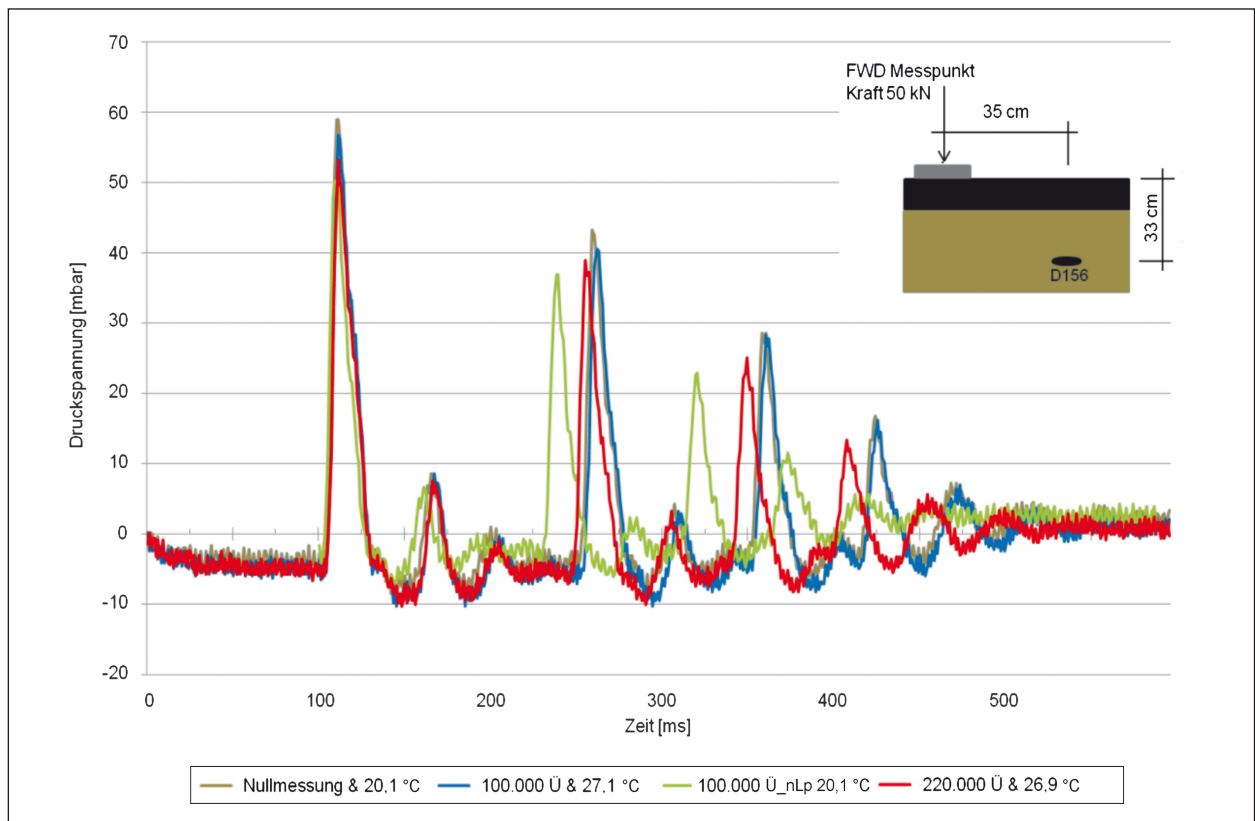


Bild 5-13: Druckspannungen FWD 50 kN Einfluss Lastpausen am Sensor D156

100.000 und 100.000_nLp (nach Lastpause) eine Zeit von vier Tagen. Bei der Messung nach der Lastpause ist eine deutliche Verringerung der Schwingungsdauer erkennbar und lässt eine steifere Konstruktion erwarten. Mithilfe von Untersuchungen der Temperaturen innerhalb der Konstruktion (Kapitel 5.1.1) wurde festgestellt, dass vor der Belastungspause eine höhere Temperatur in der Konstruktion geherrscht hat als nach einer Lastpause. Vor allem bei Asphalt hat ein Temperaturanstieg Folgen für die Viskosität des Asphaltmaterials, die sich in den zu messenden Schwingungen niederschlägt. Durch die erneute Belastung wird wieder ein Temperaturanstieg provoziert und daraus eine flexiblere Konstruktion erzeugt. Aus diesem Grund ist die Kurve nach 220.000 Überrollungen wieder mit einer längeren Schwingungsdauer zu beschreiben als direkt nach der Lastpause.

Dehnungssensoren

Im Abstand von 118 cm vom ersten FWD-Messpunkt befindet sich der Dehnungssensor S319 an der Unterkante des Asphaltpakets. Sein Signal auf einen 50 kN FWD-Impuls ist in Bild 5-14 dargestellt.

Konform zum Signal der Druckspannungssensoren zeigen die Dehnungssensoren ebenfalls, dass der FWD-Impuls tatsächlich einer Sequenz von Schwingungen gemäß einer gedämpften Schwingung entspricht. Beide Messpunkte liegen aber von verwertbaren Dehnungssensoren zu weit entfernt, um sinnvolle Analysen vornehmen zu können. Verglichen mit den Druckspannungssensoren zeigt sich, dass der Erfassungsbereich der Dehnungssensoren geringer ist. Dies lässt sich durch die oberflächennahe Position erklären.

Geofone

Die Geofonergebnisse werden beispielhaft für das Geofon A und den FWD-Messpunkt 1 dargestellt. Der Messpunkt 1 ist 118 cm vom Geofon A entfernt.

Wie beschrieben sind zur Verwendung von Geofonwerten weitere Verarbeitungsschritte notwendig (Filterung und Integration). Diesem Aufwand gegenüber steht die Möglichkeit, die gewonnenen Werte mit den Ergebnissen des FWD zu vergleichen. Das dort angebrachte Geofon 7 weist vom Lastzentrum einen Abstand von 120 cm auf. Wird

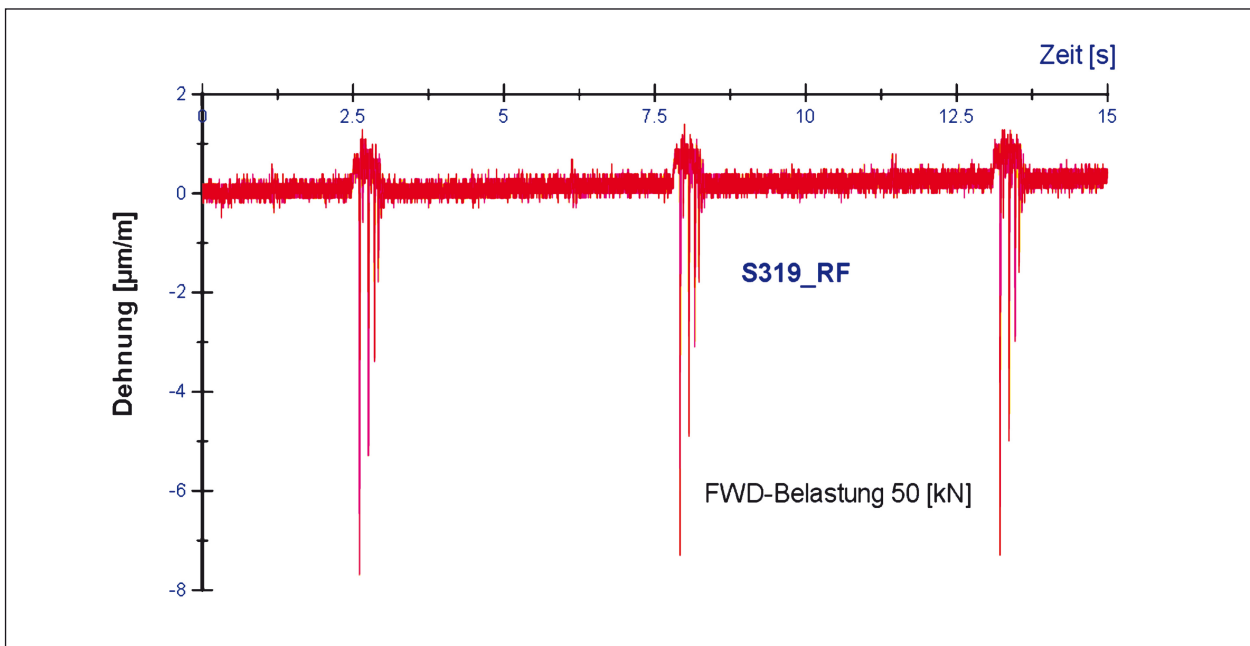


Bild 5-14: Dehnungssignal bei FWD-Belastung

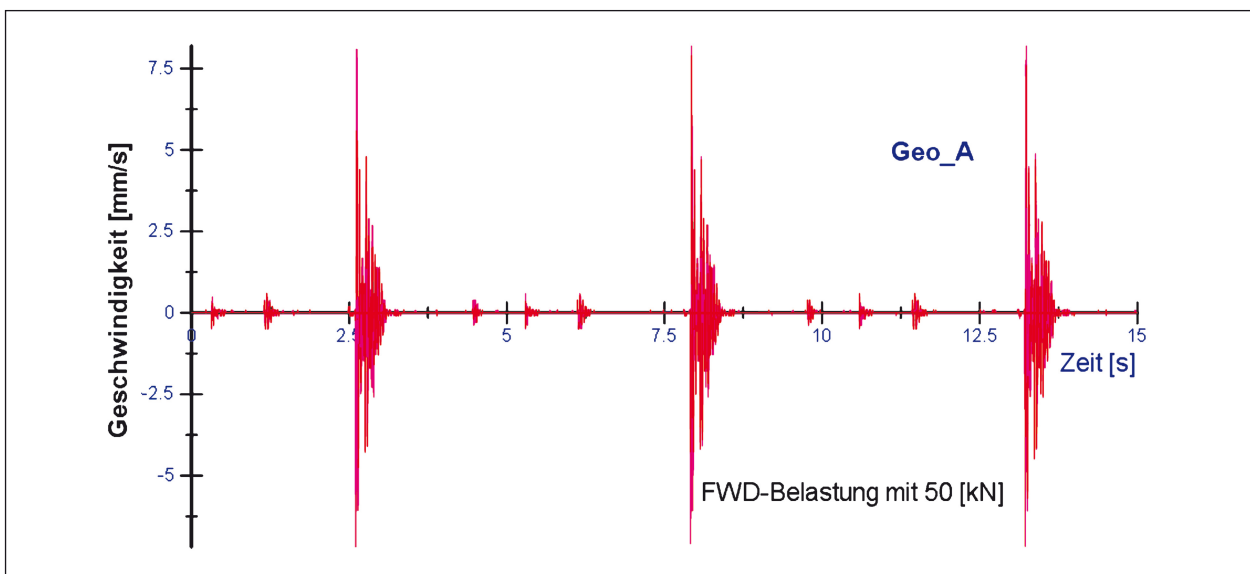


Bild 5-15: Geschwindigkeit in z-Richtung während FWD-Messung

von einer konzentrischen Lastverteilung ausgegangen, ist damit ein direkter Vergleich möglich.

Alle drei betrachteten Geofone verhalten sich gegenüber den Belastungsstufen plausibel. Für einen Vergleich der absoluten Werte gegeneinander gilt dies jedoch nicht. Hier liegen die Werte des 30 cm weiter vom Lasteinleitungspunkt entfernten, aufgesetzten Geofons (D8) weitaus näher an denen des eingeklebten. Zu berücksichtigen ist dabei, dass das eingebaute und die aufgesetzten Geofone nicht gemeinsam kalibriert wurden und dass

durch das Einkleben andere Dämpfungseigenschaften vorliegen.

In Anlage 6.A befindet sich eine vergleichbare Abbildung für den Messpunkt 2 (Bild A.17).

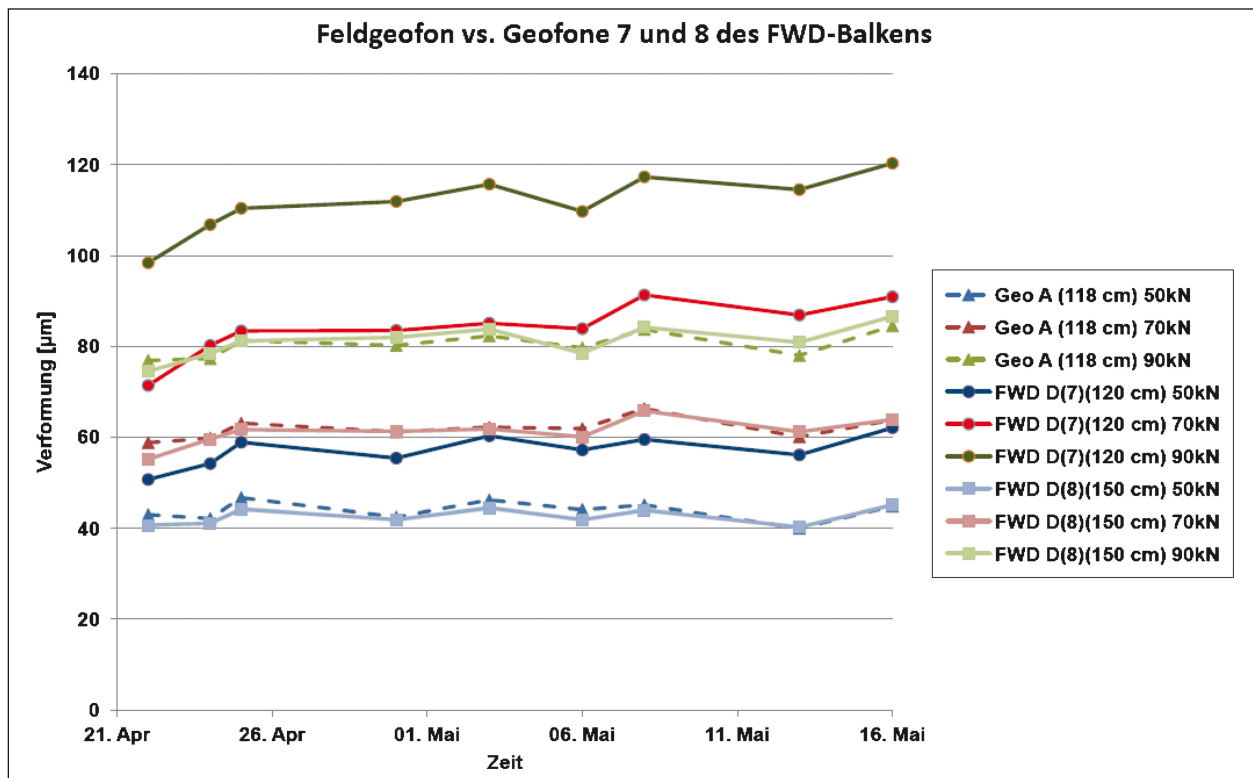


Bild 5-16: Verformungsvergleich eingebautes und externes Geofon

5.3 Querebenheit

Die Querebenheit im Versuchsfeld wurde an fünf vorab fixierten Messpunkten gemessen. Für die Auswertung werden die erfassten Messwerte bis zur, nach RStO 01 theoretischen angegebenen, Bauklassengrenze von 300.000 Überrollungen verwendet.

5.3.1 Beschreibung des Messgerätes und der Messpunkte

Das Profilometer kann, während einer der regelmäßig durchgeführten Wartung, unter dem MLS30 eingesetzt werden, um die Querebenheit auf einer Länge von 2,00 m zu erfassen. Dazu wird ein Messrad mit einem Durchmesser von 25,2 mm automatisiert über die Testfläche gezogen.

Über den angeschlossenen Computer sind Einstellungen zum Messbereich und der Messabstände möglich. Bezogen auf die hier beschriebenen Messungen wurden folgende Einstellungen gewählt:

- Länge des Messbereichs = 1.200 mm (600 mm zu jeder Seite, gemessen von der Mitte des Messgerätes),
- Horizontaler Messpunktabstand = 10 mm.



Bild 5-17: MLS P200 Profilometer auf Versuchsfeld 4

Die Länge des Messbereiches wurde so gewählt, dass die Messung auf dem eingebauten Gussasphalt beginnt und endet. Dadurch werden Veränderungen im Fugenbereich zwischen Gussasphalt (MA) und Splittmastixasphalt (SMA) nicht detektiert und beeinträchtigen somit nicht die Messung.

Die Punkte wurden über den Achsen B, D, F, H und J im Versuchsfeld (siehe Bild 5-18) angeordnet und für eine exakte horizontale Ausrichtung über vorgefertigte Platten fest mit der Unterlage fixiert.

Über diese Punkte konnte das Profilometer passgenau und immer an derselben Stelle aufgelegt werden. Die horizontale Ausrichtung konnte über eine Wasserwaage und drei Stellschrauben ermöglicht werden. Die Einstellschrauben finden in den zugehörigen Platten einen definierten Aufnahme-punkt. Mittels Kontermuttern wurde sichergestellt,

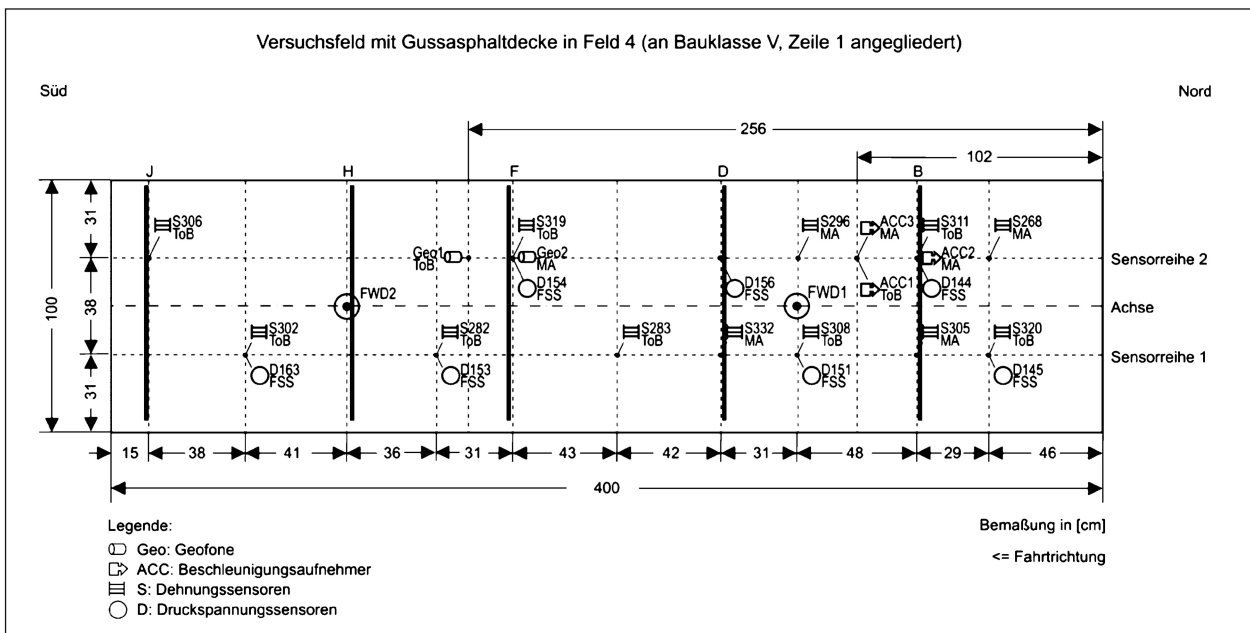


Bild 5-18: Aufteilung Querebenheitsmessungen

dass keine Veränderungen bei der Nutzung eintreten konnten. Bei der Justierung der horizontalen Lage konnten für alle Punkte die gleichen Einstellungen der Schrauben eingerichtet werden. Dadurch wurden Verwechslungen der Einstellungen verhindert und die Konsistenz der Messergebnisse gewährleistet.

5.3.2 Auswertung der Messdaten

Für die Auswertung wurden die erfassten Daten am Computer übereinander gelegt um die Verformungen durch die Belastung zu zeigen sowie die Veränderungen räumlich im Versuchsfeld zu zuordnen. Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass starke Verformungen zuerst im mittleren Bereich des Feldes erkannt werden konnten bevor sie sich auch zu Beginn und am Ende des Untersuchungsfeldes eingestellt haben.

Um die Veränderungen der Messwerte auswerten zu können, werden an dieser Stelle zwei Messquerschnitte (Bild 5-19 und Bild 5-20) vorgestellt und analysiert. Alle weiteren Punkte liegen als Anlage dem Bericht bei (siehe Anhang 7.A).

Die Nullmessungen an den jeweiligen Punkten wurden in dreifacher Ausfertigung durchgeführt und hatten zum Ergebnis, dass reproduzierbare Daten erhoben werden konnten. Dies führte dazu, dass im weiteren Verlauf der Versuchsdurchführung die anschließenden Messungen mit einer einzigen Messung erfolgten. Hierdurch wird eine

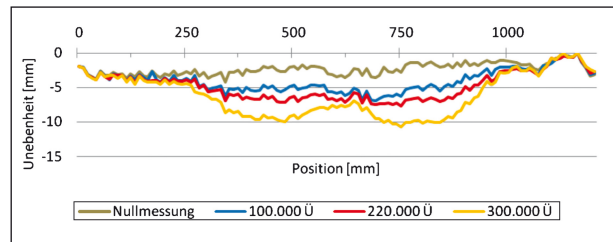


Bild 5-19: Querebenheitsmessung Messpunkt D

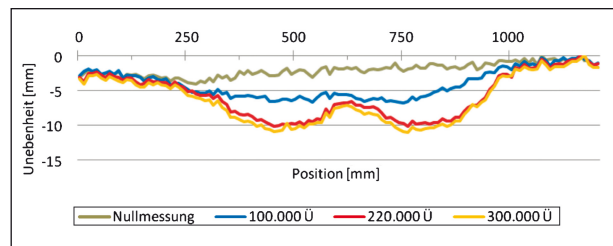


Bild 5-20: Querebenheitsmessung Messpunkt H

deutliche Reduzierung des Zeitaufwandes (pro Querschnitt ca. 4 min.) erzielt.

Bei der Betrachtung des Kurvenverlaufs ist zu erkennen, dass die Nullmessung auf dem Gussasphalt kleinste Unebenheiten erfasst hat. Diese Unebenheiten lassen sich auf die Oberflächentextur zurückführen. Die festgestellte Querneigung, von der außen liegenden Seite des Feldes zur gegenüberliegenden Seite (ca. 3,0 mm), lässt sich durch den Einbauprozess erklären. Im Mittel ist diese Lage bei allen Punkten gleichermaßen erkennbar.

Durch die Belastung, ohne seitliche Verschiebung, lässt sich klar erkennen, dass durch die ersten 100.000 Überrollungen eine Veränderung um 3,0 bis 4,0 mm innerhalb der direkten Belastungszone entstanden ist.

Bei dem nächsten Belastungsintervall hat sich die Veränderung nicht ganz so stark ausgeprägt, allerdings wurde im Intervall bis 300.000 Überrollungen (Bauklassengrenze) eine deutliche Zunahme in der Unebenheit verzeichnet. Generell kann davon ausgegangen werden, dass sich die Unebenheiten durch eine Nachverdichtung, des Asphalts oder der ToB, eingestellt hat. Dies lässt sich dadurch erklären, dass keine Materialverdrückungen zu den Seiten des Belastungsfeldes oder Abriebe erkennbar sind.

Die Untersuchungen beim Einbau 2003 der FSS in die Modellstraße haben gezeigt, dass ein Verdichtungsgrad D_{Pr} von 104,7 % erreicht worden ist, dass bedeutet eine Abweichung von 1,7 % zu $D_{Pr,min} = 103$ %. Beim Einbau der Kiestragschicht wurde der zulässige Sieblinienbereich eingehalten, des Weiteren wurde mit einem E_{V2} -Wert von 135,8 MN/m² der geforderte E_{V2} -Wert von min. 120 MN/m² ebenfalls erreicht. Der Verdichtungsgrad lag im Mittel (zwei Messpunkte im Feld) bei 99,7 % und erreicht damit nicht den geforderten Verdichtungsgrad D_{Pr} von 103 %. Begründet wurde dies damit, dass die Felder der Modellstraße zum Teil im Handeinbau hergestellt werden mussten, weil ein typischer Einbau mit Straßenbaumaschinen nicht möglich gewesen war (RABE, 2004).

An dem Messquerschnitt H lassen sich die gleichen Verformungen erkennen wie am Messquerschnitt D. Allerdings hat sich die elementarste Verformung schon 100.000 Überrollungen früher eingestellt.

6 Praktische Erkenntnisse und Analysen aus den Messdaten

Im Zuge der Belastungen wurden Erkenntnisse gesammelt, die für den weiteren Betrieb der Belastungseinheit relevant sind. Dazu zählt vor allem die Kontrolle der Lasteintragung durch die Bogie, aber auch der Vergleich des rollenden Rades bezogen auf den FWD-Impuls.

6.1 Sensoren zur Kontrolle des MLS30

Mit den beschriebenen Sensoren wurden Erkenntnisse gewonnen, die für eine Überwachung des MLS30 genauso wichtig sind, wie für die Auswertung des Verhaltens des Straßenaufbaus. Dazu zählt zum Beispiel die Kontrolle der planmäßigen Lasteintragung durch den MLS30. Durch die Signale der Druckspannungssensoren konnte eine Veränderung der Radlast deutlich erkannt werden (Bild 6-1).

Der blaue Verlauf der Druckspannung in Bild 6-1 (unten) zeigt deutlich unterschiedliche Belastungen durch die einzelnen Bogie. Die Radlast jedes einzelnen Bogie ist über einen eigenen Steuerregelkreis eingestellt. Bei einer anschließenden routinemäßigen Inspektion zeigte sich ein Verlust des Reifenfülldruckes an Bogie Nr. 1 und Nr. 4, der offensichtlich zu einer erheblichen Abweichung zur Soll-Radlast führte. Bei der Inspektion wurde der Druckverlust behoben und somit alle vier Belastungsräder neu eingestellt.

An diesem Beispiel ist klar zu erkennen, dass die Sensorsignale bei einer kontinuierlichen Beobachtung Veränderungen anzeigen können, die für die weitere Durchführung der Belastungsversuche sowie für die Analyse und Bewertung der Sensorsignale von Bedeutung sind. Aufgrund dieser Erkenntnis wird in Zukunft für die Messwerterfassung ein statistisches Auswertemodul mit visueller Darstellung zur Überwachung der Maschinenparameter realisiert, vergleichbar der Darstellung in Bild 6-1 (oben).

6.2 Sensorreaktionen auf untersuchungsspezifische Belastungen

Zur Indikation der zeitraffenden Belastung wurden in das Untersuchungsfeld Sensoren integriert. Diese reagieren ihrer Eigenart entsprechend unterschiedlich. Druckspannung und Verformung sind zum Erdmittelpunkt hin gerichtet, während die Dehnung in Fahrtrichtung wirkt. Das permanent gleichmäßig rollende Rad des MLS30 bewirkt bei den Geofonen nach Filterung und Integration ein schwingendes Signal. Dabei erfolgt die Anregung (Überrollung) während der Belastungsversuche in der Regel alle 600 ms (ca. 1,66 Hz) entsprechend der maximalen Geschwindigkeit von 21 km/h und

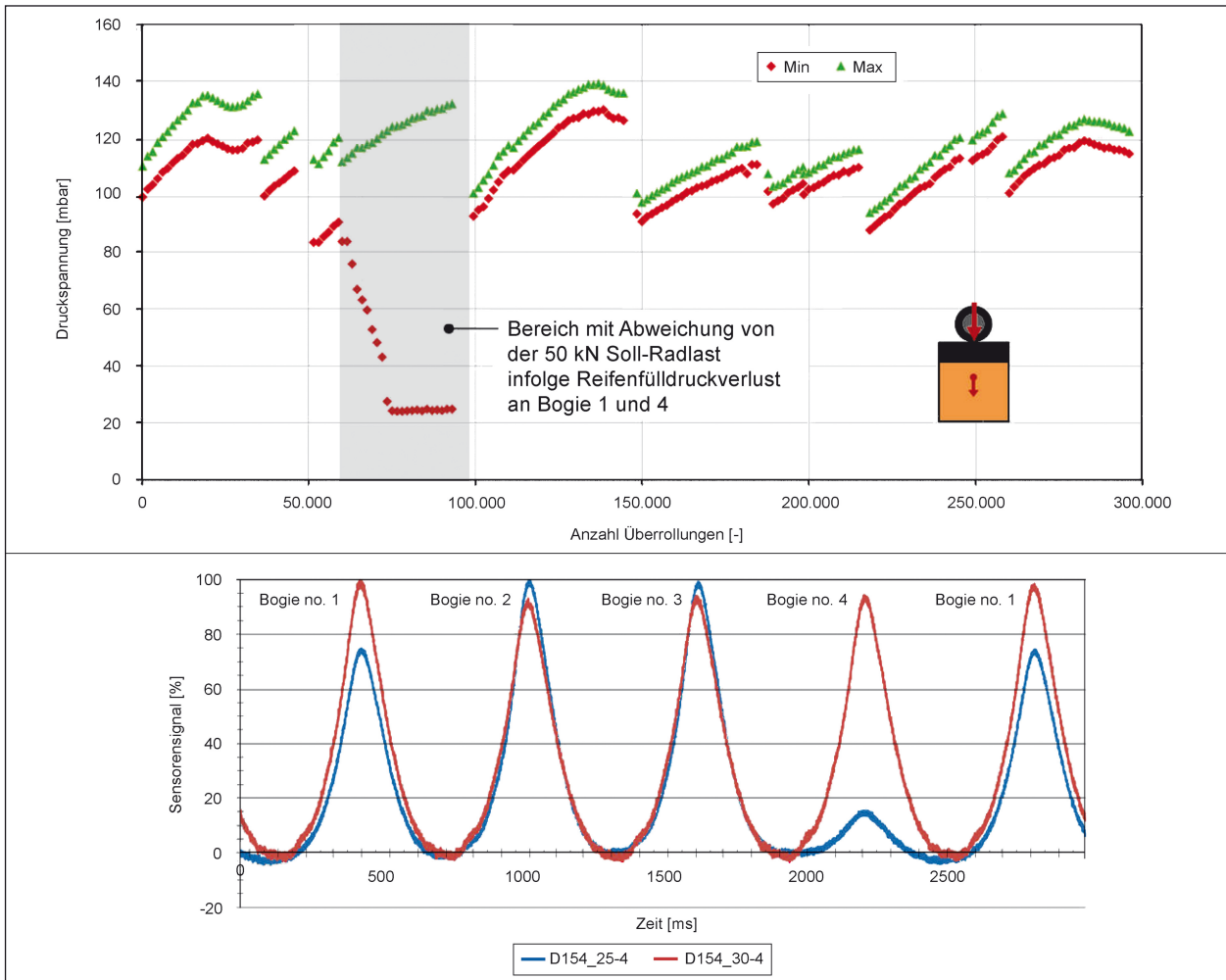


Bild 6-1: Signalvergleich verschiedener Maschinenparameter (Gesamtdauer & Intervall)

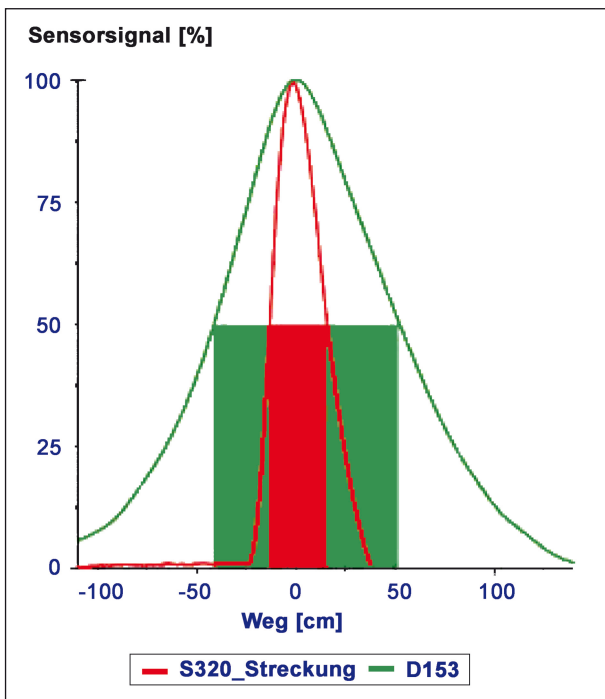


Bild 6.2: Einflussbereich der Sensoren

der Geometrie des MLS30. Die Hauptfrequenz der Verformungsschwingung liegt aber bei ca. 15 Hz.

Die Druckspannungs- und Dehnungssignale lassen sich im Gegensatz dazu direkt der Erregung zuordnen. Alle Signale wurden in Abhängigkeit von der Zeit erfasst. Unter Kenntnis der Überrollungsgeschwindigkeit lässt sich das Zeitsignal in eine Weginformation umwandeln ($21 \text{ km/h} = 583 \text{ cm/s} \rightarrow 1.000 \text{ ms} : 583 \text{ cm}$), sodass der Einflussbereich der Sensortypen erkennbar wird, vgl. Bild 6-2.

Berücksichtigt man die unterschiedlichen Einbautiefen (Dehnungssensor S Unterseite Asphaltpaket ca. 12 cm gegenüber Druckspannungssensor D Oberseite FFS ca. 32 cm) und nimmt einen festen Einflusswinkel an, erscheint dieses Verhalten plausibel. Mit der beschriebenen Generierung der Weginformation lässt sich der Einflusswinkel für beliebige Verhältnisse zwischen Maximalwert und Testwert für die beiden Sensoren konstruktiv ablesen. In der Grafik (Bild 6-2) ist der Bereich hervorge-

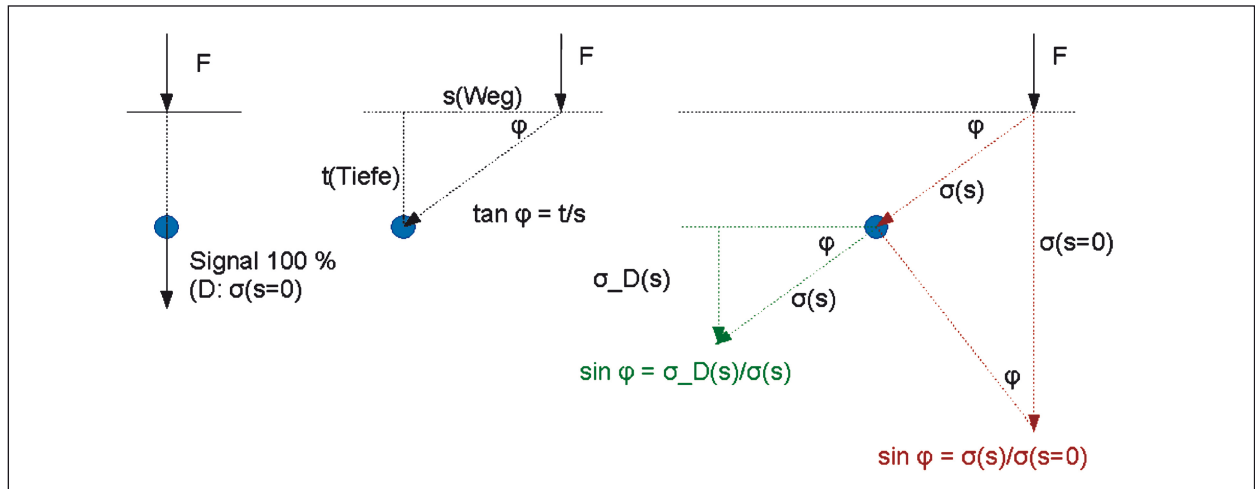


Bild 6-3: Vektorielle Darstellung eines Sensorsignals

hoben, indem das jeweilige skalierte Sensorsignal auf 50 % seines maximalen Wertes zurückgeht. Beim Dehnungssensor wurde dabei nur der gestreckte Bereich berücksichtigt. Im gezeigten Beispiel lässt sich für den Dehnungssensor ein mittlerer Weg von ca. 20 cm und für die Druckspannungssensor ein entsprechender Weg von ca. 48 cm ablesen.

In der linken Darstellung (Bild 6-3) werden die Verhältnisse aufgezeigt, wenn die Krafteinwirkung genau über dem Sensor wirkt ($s = 0$). Die mittlere Darstellung zeigt eine Abweichung davon mit Bezeichnung des Winkels. Für die 50 % Signale lässt sich aus dieser Geometrie der Einflusswinkel bestimmen:

$$\begin{aligned}\varphi \text{ (Dehnungssensor)} &= \text{inv tan} (12 \text{ cm}/20 \text{ cm}) \\ &= 31,0^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi \text{ (Druckmessdose)} &= \text{inv tan} (32 \text{ cm}/48 \text{ cm}) \\ &= 33,7^\circ\end{aligned}$$

Bei der rechten Darstellung, werden bei gleicher Geometrie keine gemessenen Werte berücksichtigt. Es handelt sich um eine rein vektorielle Ansicht. Dabei wird gezeigt, welcher Anteil der Druckspannung im Sensor zu erwarten ist, wenn die Krafteinleitung nicht senkrecht über dem Sensor erfolgt. Dabei lässt sich die Sinusfunktion des roten Dreiecks nach $\sigma(s)$ auflösen und in die Sinusfunktion des grünen Dreiecks einsetzen:

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_{DMD(s)}}{\sigma(s=0) \sin \varphi}$$

$$\sin^2 \varphi = \frac{\sigma_{DMD(s)}}{\sigma(s=0)}$$

Beim grafischen Ansatz wurde zur Bestimmung des Abstandes 50 % Signalmaximum angesetzt. Für die Vektorrechnung bedeutet dies:

$$\frac{\sigma_{D(s)}}{\sigma(s=0)} = \frac{1}{2}$$

Für φ ergibt sich damit 45° . Die Vektorrechnung berücksichtigt keine Materialparameter, sodass in dem Unterschied der beiden Rechnungen dieser ursächlich auftritt.

Während der Wartungsintervalle wird die Belastung durch den MLS30 unterbrochen. Um Informationen zum strukturellen Zustand zu gewinnen, werden unmittelbar nach den Belastungsenden FWD-Messungen vorgenommen. Die in den Drittelpunkten liegenden Belastungspunkte haben zu den Sensoren unterschiedliche Abstände, was zu entsprechenden Unterschieden in den Amplituden führt. Eine mögliche Nutzung dieser Signale wurde für die Druckspannungssensoren in Kapitel 5.2.1 dargestellt.

Beim Signal des Geofons ist im Vergleich zur MLS30-Überrollung eine Zuordnung zu den FWD-Impulspaketen dank erheblich besserem Signal-Rauschabstand gut möglich. Eine Gegenüberstellung mit Druckspannungs- bzw. Dehnungssignalen zeigt aber auch hier eine höhere Schwingungsfrequenz. Noch zu untersuchen ist die Höhe des Impulses, erreicht doch das 118 cm entfernte Geofon deutlich höhere Amplituden als bei der direkten Überrollung durch den MLS30 mit gleicher Last.

6.3 Einsatz des MLS30

Während der Belastungszeit auf dem Versuchsfeld 4 der Modellstraße haben sich verschiedene Erkenntnisse in Bezug auf den Betrieb des MLS30 eingestellt.

Innerhalb der Versuchsdauer hat es keine relevanten Probleme oder Ausfälle innerhalb der Maschine gegeben. Die Zählungen der Überrollungen innerhalb des MLS30 und die Belastungen wurden ohne Schwierigkeiten durchgeführt. Durch das Führen eines Logbuches wurde gleichzeitig eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Durch die dort gesammelten Fakten konnten durchschnittliche Überrollungen berechnet und abgeglichen werden. Des Weiteren wurde durch die Aufzeichnung eine spätere Zuordnung der Messdaten, aber auch der externen Messungen (FWD und Querebenheit) gewährleistet.

Die vom Hersteller angegebenen Wartungsintervalle (50.000, 1.000.000, 2.000.000 und 5.000.000 Überrollungen) werden als wichtig und realistisch angesehen. Die Wartung alle 50.000 Überrollungen ist nur eine kleine Inspektion. Auch dort sind verschiedenste Punkte aufgefallen, die ansonsten eine weitaus größere Wirkung gehabt hätten, wenn diese nicht behoben worden wären. Des Weiteren ist die dauerhafte Beobachtung und Betreuung der Maschine als sinnvoll einzustufen. Somit kann schnellstmöglich, nach Erkennen eines Fehlers, eine passende Maßnahme ergriffen werden.

Neben der visuellen und der auditiven Wahrnehmung wird für die weiteren Einsätze der Kontrollrechner mit dem Modul Pad Toetser V_2.24 zum Einsatz kommen. Dieser Rechner wird, neben den für eine Auswertung relevanten Computern, ein elementarer Bestandteil für den Betrieb des MLS30.

Auf dem in Bild 6-4 zu sehenden Bildschirm des Kontrollprogramms, können alle vier Bogie ausgewertet werden. Bei jedem Bogie wird der Spalt (Bild 2-4 (Gap)), aber auch die aufgebrachte Last angezeigt. Des Weiteren werden dem Nutzer die Batteriespannung des jeweiligen Bogie und die Gastemperatur auf dem Bildschirm zur Verfügung gestellt. Innerhalb des Programms ist es möglich, ein Alarmkonzept zu erstellen, um kritische Zustände vom Programm angezeigt zu bekommen. Sobald ein solcher Alarm ausgelöst worden ist, kann die Maschine vom Kontrollrechner gestoppt werden.

Nach den Erfahrungen aus dem in diesem Bericht beschriebenen Betrieb, kann durchschnittlich mit 500.000 Überrollungen pro Monat gerechnet werden. Dabei sind regelmäßige Kontrollen und Messungen berücksichtigt, aber keine größeren Reparaturarbeiten.

Um eine realistische Spurverteilung zu erzeugen kann der MLS30 mittels Lateralschienen in der Spur versetzt werden. Diese Möglichkeit wurde in diesem Projekt nicht berücksichtigt, aber es wurden vorbereitende Maßnahmen ergriffen. Dazu zählt, dass die Position der Maschine in die Messwert-

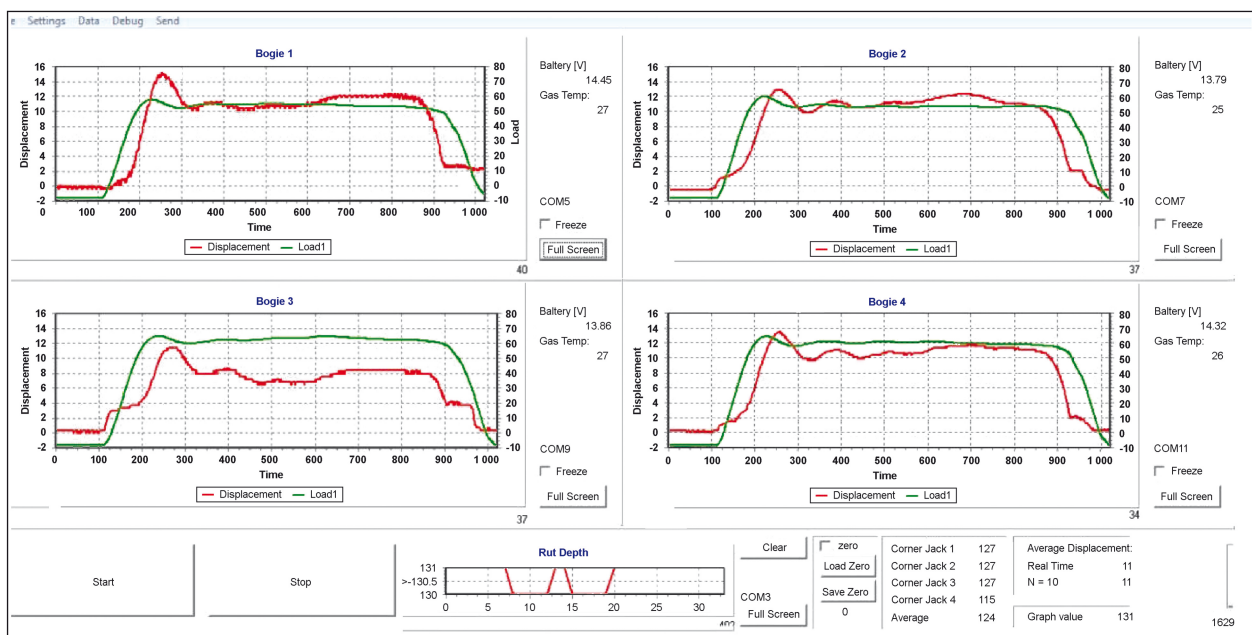


Bild 6-4: Kontrollbildschirm Pad Toetser V_2.24 (Screenshot BAST)

erfassung einget. und ein mögliches Versuchsprogramm bezüglich der Programmierung vorbereitet worden ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Einsatz des MLS30 beginnt eine neue Phase für die Durchführung von zeitraffenden Dauerbelastungsversuchen in der BAST. Nach Herstellung des Wirkbetriebes des MLS30 war es nunmehr im ersten Projekt das Ziel, eine Versuchsinfrastruktur mit straßenseitiger Sensorik aufzubauen und zu testen. Darüber hinaus sollten in Kombination mit zerstörungsfreien Messverfahren erste Analysen des Verhaltens des Straßenaufbaus unter simulierter Verkehrsbelastung, hinsichtlich struktureller Veränderungen erfolgen. Somit wird eine Erfahrungsbasis für zukünftige Anwendungen aufgebaut.

Mittels des MLS30 kann eine realitätsnahe Belastung auf Untersuchungsfelder aufgebracht werden. Diese simuliert die Belastung durch Schwerverkehr realistisch und bietet die Möglichkeit unter kontrollierten Bedingungen (Lasteintrag und Witterungslage) Daten über im Straßenaufbau integrierte Sensoren zu erfassen. Dadurch wird in Zukunft die Möglichkeit gegeben, die Veränderung innerhalb der Gesamtkonstruktion, aber auch die Veränderung der Baustoffe und Baustoffgemische durch eine klar definierte Belastung großmaßstäblich (Maßstab 1:1) unter Laborbedingungen zu untersuchen. Mit den Erkenntnissen über das Gebrauchsverhalten der Konstruktionen, lassen sich für die strukturelle Substanzbewertung moderne Systeme zur Erfassung des Zustandes der Substanz entwickeln, die im Weiteren die technische Erhaltungsplanung wesentlich unterstützen können.

Des Weiteren können durch zeitraffende Belastungsversuche innovative Baustoffe bezogen auf deren langfristiges Gebrauchsverhalten systematisch untersucht werden.

In den ersten sechs Betriebsmonaten hat der MLS30 insgesamt über zwei Millionen Überrollungen auf verschiedenen Konstruktionen – Asphalt und offenporigem Beton – erfolgreich absolviert.

7.1 Auslastung und weitere Forschungen

Der MLS30 ist für verschiedene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der BAST vorgesehen. Dazu zählen Projekte auf der Modellstraße der Halle 9, einem Untersuchungsfeld der Bauweise „offenporiger Beton“ in Halle 7 sowie Belastungen unter realistischer Witterungslage u. a. auf dem sich in Bau befindlichem Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal duraBAST der BAST.

Auf der Modellstraße werden im nationalen Innovationsprogramm Straße „Zerstörungsfreie Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz“ angewendet, getestet und verifiziert. Dazu wird der MLS30 die Belastung auf verschiedene Versuchsfelder aufbringen. In dem Forschungsvorhaben werden Flächen der Bauklasse III und V zur Verfügung gestellt. Die Zuwendungsempfänger erhalten die Möglichkeit vor und nach verschiedenen Belastungsstufen mittels deren innovativer Verfahren Restnutzungsdauern abzuleiten und deren Prognoseverfahren weiterzuentwickeln.

Auf dem duraBAST sollen innovative Baustoffe und Baustoffgemische sowie straßenbautechnische Verfahren untersucht werden. Dazu können diese unter realitätsnahem Baumaschineneinsatz auf einer Länge von bis zu 100 m eingebaut werden. An verschiedenen Punkten soll über Sensoren eine Datengrundlage generiert werden, die eine Aussage über die Untersuchung unter definierter Belastung ermöglicht.

7.2 Materialuntersuchungen

Bei allen MLS30 Projekten ist eine enge Zusammenarbeit mit den Bauweisen-Referaten vorgesehen. Somit sollen zeitnah im Vorfeld, während und im Anschluss an die Belastungen Materialkennwerte erhoben und ausgewertet werden können. Aus den Untersuchungen sollen die Erkenntnisse der Sensoren abgesichert, aber vor allem verknüpft werden. Aus diesem Zusammenspiel kann der Erkenntnisgewinn bei Großversuchen deutlich gesteigert werden.

7.3 Weiterentwicklung der Sensoren

Das Projekt hat die Wichtigkeit des Zusammenspiels aus Belastung und Erfassung relevanter physikalischer Größen vorgestellt. Dabei kamen Senso-

ren zum Einsatz, die im Rahmen früherer Versuchsprogramme entwickelt und hergestellt worden sind. Für die geplanten umfangreichen weiteren Untersuchungen (z. B. duraBASt) müssen die Erkenntnisse in entsprechende Weiterentwicklungen einfließen. Entsprechend neu aufgebaute Sensoren sollen dann zunächst in Untersuchungsfeldern erprobt werden. Mindestens eines dieser Untersuchungsfelder sollte unter Witterungseinfluss eingerichtet werden. Bei bestehenden Feldern muss die Eignung nachträglich eingebauter Sensoren (z. B. Geofone und Beschleunigungsaufnehmer) weiter untersucht werden. Angestrebt wird dabei u. a. der Einsatz drahtloser Sensoren, um die Oberfläche der Untersuchungsfelder geringstmöglich zu schädigen.

8 Literatur

- Aaronia AG (2013): [Online] [Zitat vom: 06. August 2013.] <http://www.aaronia.de/produkte/antennen-sensoren/Vibrationssensor-GEO10/>
- AG, Kistler Instrumente, (Hrsg.): Planungshandbuch. 9195E_002-300d-07.04
- ARRAIGADA, M. et al. (2009): Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bericht zum Projekt Nr. ASTRA 2004/018, Schweiz, 2009
- COST 347 (2004): European Cooperation in the field of scientific and technical research: Improvements in Pavement research with Accelerated Load Testing. COST, 2004. Final Report, COST, Brüssel, 2004
- FGSV Arbeitsgruppe Asphaltstraßen (2001): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinie für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. FGSV Verlag GmbH, Köln, 2001
- FGSV Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn (2001): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. FGSV Verlag GmbH, Köln, 2001
- FGSV Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. FGSV Verlag, Köln, 2012
- Geophysik Uni Kiel (2013): [Online] 2013. [Zitat vom: 06. August 2013.] <http://www.geophysik.uni-kiel.de/~sabine/DieErde/Werkzeuge/Geophysik/M5-Seismik/4Reflexionsseis/Geophon.gif>
- GOLKOWSKI, G. et al. (2007): Grundsätzliche Kriterien und Empfehlungen für die Anlage einer Großversuchsanlage zur Durchführung von zeitraffenden Belastungsversuchen an Straßenkonstruktionen – AP34 06 005. s. n., Bergisch Gladbach, 2007
- GOLKOWSKI, G. et al. (2013): Sicherheitskonzept für die Durchführung von Belastungsversuchen mit dem Mobile Load Simulator. s. n., Bergisch Gladbach, 2013
- GOLKOWSKI, G.; RABE, R.; WOLF, A. (2012): Nutzungskonzept MLS10. AP3410001 GS3. s. n., Bergisch Gladbach, 2012
- LMT Products (Pty) Ltd. (2013): Bedienerhandbuch (BHB) MLS30. 2013
- NCHRP, National Cooperative Highway Research Program (2004): Synthesis of Highway Practice 325 – Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing. Transportation Research Board, Washington D. C., 2004
- NCHRP, National Cooperative Highway Research Program. (1996): Synthesis of Highway Practice 235 – Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing. Transportation Research Board, Washington D. C., 1996
- PARTL, M. N. (2009): Dauerhafte Längsbelastung von Straßen mit dem Mobile Load Simulator – Erfahrungen aus der Schweiz. [Online] 2009. [Zitat vom: 09.072013.] http://www.ise.kit.edu/rd_download/SBT/Kolloquium_SBT_09-11_M_Part1.pdf
- RAAB, Chr.; PARTL, M. N. (2013): Verkehrssimulator MMLS3. [Online] 2013. [Zitat vom: 11.07 2013] http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/36639
- RABE, R. (2004): Bau einer instrumentierten Modellstraße in Asphaltbauweise zur messtechnischen Erfassung der Beanspruchungssituation im Straßenbau. BASt AP Projekt 03 342/S4. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2004

RABE, R. (2007): Messtechnische Erfassung der Beanspruchungen im Straßenaufbau infolge Lkw-Überfahrten über eine Modellstraße in Asphaltbauweise – AP 04 342. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2007

RITTER, J. (2010): Dauerbelastungsversuche an einer Modellstraße zur vergleichenden Bewertung des Tragverhaltens unterschiedlicher Asphaltbauweisen. BASt AP Projekt 06 000/S4. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2010

SCHERKENBACH, M. (2013): Sensortestfeld – Analyse neuer und alter Sensoren. Referat GS3, Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach, 2013

Sensor Nederland bv. 2013. www.geophone.com. [Online] 2013. [Zitat vom: 06. August 2013.] [http://www.geophone.com/download.asp?File=SM-6, 8, 10 and 14 Hz.pdf](http://www.geophone.com/download.asp?File=SM-6,8,10and14Hz.pdf)

Sensor Nederland (2013): [Online] 2013. [Zitat vom: 06. August 2013.] <http://www.geophone.com/calculator.asp>

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hünger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenenmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren
Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt
Böhm, Beara
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt
Wüstuba, Alisov, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

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

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

www.schuenemann-verlag.de