Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Einsatz von Asphaltbewehrungen im Erhaltungsmanagement von Trag- und Deckschichten

Application de couches intercalaires de géosynthétiques pour la gestion de l'entretien des chaussées

Application of asphalt interlayers for road pavements

Eidgenössische Materialprüfanstalt (Empa)
Prof. Dr. Christiane Raab
Dr. Martin Arraigada
Prof. Dr. Manfred N. Partl

Infrastructure Management Consultant (IMC) GmbH
Dr. Frank Schiffmann

Forschungsprojekt ASTRA 2011/011_OBF auf Antrag des Bundesamts für Strassen (ASTRA)

August 2017 **1613**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.
Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Einsatz von Asphaltbewehrungen im Erhaltungsmanagement von Trag- und Deckschichten

Application de couches intercalaires de géosynthétiques pour la gestion de l'entretien des chaussées

Application of asphalt interlayers for road pavements

Eidgenössische Materialprüfanstalt (Empa)
Prof. Dr. Christiane Raab
Dr. Martin Arraigada
Prof. Dr. Manfred N. Partl

Infrastructure Management Consultant (IMC) GmbH
Dr. Frank Schiffmann

Forschungsprojekt ASTRA 2011/011_OBF auf Antrag des Bundesamts für Strassen (ASTRA)

August 2017 **1613**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Prof. Dr. Christiane Raab (Empa)

Mitglieder
Dr. Martin Arraigada (Empa)
Dr. Frank Schiffmann (IMC GmbH)
Prof. Dr. Manfred N. Partl (Empa)

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3 „Baustoffe“

Begleitkommission

Präsident
Martin Horat (TBA Stadt Zürich)

Mitglieder
Hans Peter Beyeler (ASTRA)
Andreas Flück (TBA Kanton Basel Stadt)
Balazs Fonyo (ASTRA)
Margarita Rodriguez (Axxia)

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von http://www.mobilityplatform.ch heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum **4**
Zusammenfassung **7**
Résumé **9**
Summary **11**

1 Einleitung **13**
1.1 Ausgangslage 13
1.2 Ziele 13
1.3 Vorgehen 14

2 Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands **15**
2.1 Auswahl der Asphaltbewehrungen (Materialien) 15

3 Voruntersuchung: Schichtenverbund **17**
3.1 Grundsätzliches 17
3.2 Prüfkörperherstellung 17
3.2.1 Applikation der Asphaltbewehrung 18
3.3 Prüfkörperentnahme und Prüfung des Schichtenverbunds 19
3.4 Ergebnisse 20
3.5 Auswahl der Produkte für die Labor- und In-situ-Prüfungen 21

4 Laboruntersuchungen **23**
4.1 Grundsätzliches 23
4.2 Untersuchung von Ermüdung und Rissüberbrückung im Gebrauchstemperaturbereich (20°C) 23
4.2.1 Herstellung der Prüfkörper 23
4.2.2 Verkehrslastsimulator MMLS3 25
4.2.3 Prüfaufbau 26
4.2.4 Durchführung der Prüfung 28
4.2.5 Ergebnisse 28
4.2.6 Auswertung und Folgerungen 35
4.3 Untersuchung der Rissüberbrückung im Tieftemperatur-bereich 36
4.3.1 Grundsätzliches 36
4.3.1 Dynamischer Joint Movement Simulator DJMS 36
4.3.2 Versuchsdurchführung mit DJMS 36
4.3.3 Versuchsdurchführung mit MMLS 3 37
4.3.4 Auswertung und Folgerungen 38

5 Felduntersuchungen **39**
5.1 Grundsätzliches 39
5.2 Verkehrslastsimulator MLS10 39
5.3 Einbau und Methodik 40
5.4 Messungen und Sensorik: Methodik und Auswertung 44
5.4.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen 44
5.4.2 Dynamische Dehnungsmessung mit Dehnmessstreifen (DMS) 45
5.4.3 Dynamische Verformungsmessung mit Beschleunigungssensoren 48
5.4.4 Rissermittlung durch visuelle Inspektionen 49
5.4.5 Spurrinnenbildung durch Querprofilmessung 49
5.4.6 Verformungsmessung mit FWD (Falling Weight Deflectometer) 51
5.4.7 Statische Verformungsmessung mit Benkelman-Balken 53

6 Ergebnisse der in situ Versuche **55**

6.1 Belastungsgeschichte und Temperaturverlauf 55
6.2 Spurrinnenbildung 57
6.3 Risse an der Oberfläche 58
6.4 Dehnungen im Belag 60
6.5 Dynamische Beschleunigungsmessungen 65
6.6 Falling Weight Deflectometer (FWD) 66
6.7 Benkelman-Balken Messungen 68

7 Untersuchungen an Bohrkernen 71
7.1 Materialuntersuchung an Bohrkernen 72
7.2 Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner 73
7.3 Modulbestimmung mit Spaltzugversuch 76
7.4 Forensische Untersuchung 79

8 Finite Element Simulation und Bestimmung der optimalen Lage der Asphalteinlage im Belagsaufbau 81
8.1 Geometrie und Eigenschaften des Modells 81
8.2 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Dehnungen 83
8.3 Sensitivitätsuntersuchung zur Position der Bewehrung im Belagsaufbau 86

9 Erkenntnisse 89
9.1 Auswahl der Systeme: Schichtenverbund 89
9.2 Laboruntersuchungen: Rissüberbrückung 89
9.3 In situ-Untersuchungen 89
9.3.1 Rissverhalten 89
9.3.2 Spurrinnenbildung 90
9.3.3 Schichtenverbund 90
9.3.4 Dynamisches Verhalten: Dehnungs- und Beschleunigungs-messungen 90
9.3.5 Dynamische und statische Verformung mit FWD und Benkelman Balken 91
9.3.6 Laborprüfungen an Bohrkernen und forensische Untersuchungen 91
9.3.7 Finite Elemente Simulation 91

10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 93

11 Forschungsbedarf 97

Anhänge 99
Glossar 129
Literaturverzeichnis 131
Projektabschluss 133
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen 137

Zusammenfassung

In der Schweiz wurden in den letzten Jahren im Rahmen von Erhaltungsmassnahmen bitumenhaltiger Oberbaukonstruktionen von Strassen häufig Asphalteinlagen eingesetzt, wobei der Einbau in oder zwischen den bitumenhaltigen Trag- und Deckschichten des Oberbaus erfolgte. Mit der Anwendung solcher Asphalteinlagen soll eine Verlängerung der Instandsetzungsintervalle der Strasse, d.h. der Lebensdauer des Belages und damit eine Reduzierung der Aufwendungen für den Strassenunterhalt erreicht werden.

Eine ersten Forschungsarbeit (Pilotstudie), die vom IVT der ETH Zürich und der Empa Dübendorf durchgeführt worden war, offenbarte fehlende Kenntnisse zur Anwendung und Erfahrung in der Schweiz zur Wirksamkeit von Asphalteinlagen bei den bitumenhaltigen Deck- und Tragschichten des Oberbaus. Insbesondere wurde das Fehlen wissenschaftlicher Erkenntnisse in Bezug auf die folgenden Aspekte als besonders kritisch beurteilt:

- Langzeitverhalten der Asphalteinlage im Verbund mit den bitumenhaltigen Trag- und Deckschichten (Schichtenverbund)
- Wirkung in den verschiedenen Schichtenlagen
- Vermeidung von Rissen (Reflexionsrisse)

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollten aus diesem Grund, in einer objektbezogenen Forschung die Fragen des konkreten Einsatzbereiches und –zwecks und der Wirkungen in den Schichtlagen zwischen Deck- und Binder- sowie Binder- und Tragschichten untersucht werden.

In der ersten Phase wurden die zu prüfenden Materialien und Aufbauten ausgewählt und festgelegt. Diese Auswahl und Festlegung fand auf der Grundlage von Schichtenverbundprüfungen nach Leutner statt. Zudem werden konkrete Versuchsfelder und Versuchsaufbauten in Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen von ASTRA und Kantonen gesucht und bestimmt. In der zweiten Phase wurden Versuche an Versuchsaufbauten im Labor (Labormodellsystem) unter simulierten Verkehrsbeanspruchung mit dem Model Mobile Load Simulator (MMLS3) und in der dritten Phase auf Versuchsfeldern in situ unter beschleunigter Verkehrsbelastung mit dem Mobile Load Simulator (MLS10) durchgeführt. Ergänzend wurden Laboruntersuchungen an aus den Laboraufbauten und in situ Versuchsstrecken entnommenen Probekörpern durchgeführt. Zusätzlich erfolgten Berechnungen mit der Finiten Element Methode zur Modellierung der Wirkungsweise im Schichtenmodell.

Sowohl Labor- als auch Feldversuche zeigen, dass Asphaltbewehrungen das Auftreten von Rissen verzögern und dadurch die Lebensdauer von Asphaltbelägen verlängern können. Sowohl im Labor- als auch im Feldversuch erweisen sich Asphaltbewehrungen (Systeme B und C) ohne SAMI als effektiver als solche mit SAMI. Labor- und Feldversuche zeigen, dass Bewehrungseinlagen eine Trennschicht darstellen, die zu einer Beeinträchtigung des Schichtenverbunds führen kann. Aufgrund der Feldversuche lässt sich jedoch folgern, dass bei sorgfältiger Arbeitsweise Schichthaftungswerte erreicht werden können, die den Normanforderungen entsprechen. Die Belastung durch den Verkehrslastsimulator MLS10 führt selbst bei sehr steifem Untergrund in kanalisierter Fahrweise rasch zu einer Schwächung des Schichtenverbundes. Dies zeigt, dass dem Schichtenverbund gerade auch hohe Bedeutung beigemessen werden muss, insbesondere, wenn das Risiko von Trennflächen vorliegt. Die durchgeführten Finite Element Berechnungen FEM geben Hinweise auf die optimale Lage der Bewehrung und können als Dimensionierungsgrundlage verwendet werden.

Résumé

Dans les dernières décennies, les systèmes de renforcement des routes ont été fréquemment utilisés pour les travaux de réhabilitation et de maintenance en Suisse. Généralement, l'installation de ces renforcements était effectuée entres les couches de base et de roulement dans les chaussées souples. L'objectif de cette méthodologie était d'augmenter la durée entre les interventions de maintenance, en étendant la durée de vie de la chaussée et en réduisant les coûts de maintenance.

Un premier projet de recherche (étude pilote), mené par IVT à l'ETH Zurich et l'Empa Dübendorf, révéla qu'il y a un manque de connaissances sur l'efficacité des différents produits commerciaux. En particulier, la rareté des preuves scientifiques a été considérée comme particulièrement critique pour les aspects suivants :

- Le comportement à long-terme de la liaison à l'interface entre les couches de base et de surface
- L'effet du système de renforcement dans les différentes couches
- La prévention de la remontée des fissures

Pour cette raison, le présent projet de recherche a été proposé afin de répondre aux questions toujours ouvertes au sujet de la zone spécifique d'application de ces renforcements et des effets sur la liaison à l'interface entre les couche de roulement et de base mais aussi entre la couche de base et la couche de fondation.

Dans une première phase de travail, les matériaux et structures qui seront examinés ont été définis. Cette sélection a été menée en se basant sur les essais de liaison à l'interface conformément à l'essai Leutner. De plus, le champ expérimental concret et les préparations expérimentales ont été proposés et déterminés en collaboration avec les personnes responsables de l'ASTRA et des cantons.

Dans une seconde phase, les expériences de laboratoire ont été menées en utilisant le simulateur de trafic pondéral (MMLS3) sur des modèles réduits de chaussée. Finalement, dans la dernière phase, des chaussées in-situ ont été construites et sollicitées en utilisant une charge de trafic accélérée avec le simulateur de trafic (MLS10). De plus, les essais de laboratoires ont été réalisés sur des spécimens carottés provenant de préparations en laboratoire et de sections d'essais in-situ. D'autre part, des simulations numériques ont été accomplies en utilisant la méthode des éléments finis pour modéliser l'effet de la position du renforcement sur la chaussée.

À la fois les essais de laboratoires et ceux de terrain ont montré que les systèmes de renforcement d'asphalte peuvent retarder l'apparition des fissures, et ainsi étendre la vie des revêtements d'asphalte. Pour les essais de laboratoire et de terrain, les renforcements d'asphalte (systèmes B et C) sans SAMI sont plus efficaces que ceux avec SAMI. Les essais de laboratoire et de terrain montrent que les ajouts de renforcement représentent une couche de séparation, qui peut conduire à une détérioration de la structure de la chaussée. Sur la base des essais de terrain, cependant, il peut être conclu que, avec une opération minutieuse, les valeurs d'adhésion des couches peuvent être atteintes ce qui satisfait les exigences des normes. La charge du simulateur de trafic MLS10 conduit rapidement à un affaiblissement de la chaussée, même dans le cas d'un sol très rigide dans un mode de conduite canalisé. Cela montre qu'une liaison suffisante entre les couches est d'une grande importance, particulièrement quand la liaison est en danger à cause de la présence d'interfaces de séparation. Les calculs aux éléments finis fournissent une indication de la position optimale du renforcement et peuvent être utilisés comme une base de dimensionnement.

Summary

In the past decades, pavement reinforcement systems were frequently used for rehabilitation and maintenance works within Switzerland. Usually, the installation of such reinforcements was carried out between base and wearing courses in flexible pavements. The objective of this methodology was to increase the time between maintenance interventions, extending the life-span of the pavement and reducing maintenance costs.

A first research project (pilot study) carried out by the IVT at ETH Zurich and Empa Dübendorf, revealed that there is a lack of knowledge about how effective are different commercial products. In particular, the scarcity of scientific evidence was considered as particularly critical in the following aspects:

- Long-term interlayer bonding behavior between surface and base courses
- Effect of the reinforcement system in the different layers
- Prevention of reflective crack propagation

For this reason, the present research project was proposed to answer the still open questions about the specific area of application of these reinforcements and the effects on the interlayer bonding between wearing and base courses and between base course and road base layer.

In a first phase of the work, the materials and structures to be investigated were defined. The selection was carried out based on interlayer bonding test results according to Leutner. In addition, the experimental setups were defined in collaboration with the responsible persons of ASTRA and cantons.

In a second phase, laboratory experiments on down-scaled pavement models were carried out using the Model Mobile Load Simulator (MMLS3). Finally, in the last phase, ad-hoc pavements were constructed and loaded with the traffic Mobile Load Simulator (MLS10). In addition, laboratory tests were carried out on cored specimens taken from the laboratory setups and in situ test sections. Further, numerical simulations were performed using the finite element method to model the effect of the position of the reinforcement in a pavement structure.

Both laboratory and field tests showed that asphalt reinforcement systems can delay the development of cracks, thereby extending the life of asphalt pavements. Further, it was observed that asphalt reinforcements (systems B and C) are more effective if no SAMI is used. Laboratory and field tests show that reinforcement systems might represent a separating sheet, which can lead to a interlayer bonding problem. Based on the observations made in the field, it can be however concluded that, with a careful installation procedure, achieved layer adhesion values can meet the standard requirements. The load of the traffic load simulator MLS10 could rapidly deteriorate the pavement structure, even in the case of very stiff ground in a channelized loading mode. This shows that a sufficient bond between the layers is of great importance, especially when the bond is at risk due to the presence of separating interface. Finally, Finite Element Calculations (FEM) provided an indication of the optimum position of the reinforcement and the results could be used as base for a dimensioning method of asphalt reinforcements.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In der Schweiz wurden in den letzten Jahren im Rahmen von Erhaltungsmassnahmen bitumenhaltiger Oberbaukonstruktionen von Strassen Asphalteinlagen eingesetzt. Der Einbau erfolgte dabei in oder zwischen den bitumenhaltigen Trag- und Deckschichten des Oberbaus vorwiegend im Sinne einer Reparatur oder kleinflächigen Instandsetzungen. Teilweise wurden die Asphalteinlagen grossflächig über die ganze Fahrbreite eingesetzt. Mit deren Anwendung soll eine Verlängerung der Instandsetzungsintervalle der Strasse, d.h. der Lebensdauer des Belages und damit eine Reduzierung der Aufwendungen für den Strassenunterhalt erzielt werden. Dabei stand im Vordergrund ein Durchschlagen von konstruktions- oder altersbedingten Rissen im bestehenden Oberbau auf die neu aufgebrachten Asphaltschichten zu verhindern.

In einer ersten Forschungsarbeit (Pilotstudie), die am IVT der ETH Zürich und der EMPA Dübendorf durchgeführt wurde [1], wurden bislang fehlende Kenntnisse zur Anwendung und Erfahrung in der Schweiz zur Wirksamkeit von Asphalteinlagen bei den bitumenhaltigen Deck- und Tragschichten des Oberbaus gesammelt, analysiert und dargestellt. In dieser Pilotstudie wurden vorerst mittels einer Literaturrecherche die Grundlagen und der Wissensstand zu Asphalteinlagen erarbeitet. Eine vereinfachte Marktrecherche führte zu einer Systematisierung von angewendeten Produkten in der Schweiz nach Material, Struktur und Hersteller. Ausserdem wurden durch Befragungen von Projektleitern aus Tiefbauämtern, Planern aus Ingenieurbüros sowie Produktherstellern Erfahrungen zur Anwendungen von Asphalteinlagen für die Schweiz zusammengetragen.

Die Recherche und Umfrage zeigte, dass herstellerspezifische Produktbeschreibungen und Anwendungsempfehlungen vorhanden sind, Untersuchungen und wissenschaftlich fundierte Ergebnisse von neutralen Forschungseinrichtungen zur Wirkung und Lebensdauer jedoch weitgehend fehlen. Ausserdem existieren kaum wissenschaftliche Erkenntnisse zu den folgenden Aspekten:

- Langzeitverhalten der Asphalteinlage im Verbund mit den bitumenhaltigen Trag- und Deckschichten (Schichtenverbund)
- Wirkung in den verschiedenen Schichtenlagen
- Vermeidung von Rissen (Reflexionsrisse)

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollten aus diesem Grund, in einer objektbezogenen Forschung die Fragen des konkreten Einsatzbereiches und –zwecks und der Wirkungen in den Schichtlagen zwischen Deck- und Binder- sowie Binder- und Tragschichten untersucht werden. Dazu waren in der objektbezogenen Forschung entsprechende Labor- und Feldversuche erforderlich. Dementsprechend erfolgten die Herstellung von Prüfkörpern und die Einrichtung von Teststrecken für die Durchführung der Labor- und Feldmessungen. Zusätzlich wurden Simulationen mit der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt.

1.2 Ziele

Ziel der Forschungsarbeit war Erkenntnisse über die Wirksamkeit und Lebensdauer von Asphalteinlagen im Schichtensystem des Strassenoberbaus zu erhalten und Kriterien für eine Anwendungsüberprüfung neuer Produkte zu definieren. Dabei stehend die folgenden Themenbereiche im Vordergrund:

- Schub/Haftung (Verbundkraft und -wirkung, zeitliche Entwicklung)
- Überbrückung (Durchschlagen von Rissen, zeitliche Entwicklung)
- Rissbild (Verteilung, Rissweiten, etc.)
- Feuchte im Rissbereich (Wassereindringen)
- Steifigkeit/Verformung

1.3 Vorgehen

Das Forschungsprojekt wurde objektbezogen durchgeführt, da es sich bei der Verstärkung mit Asphalteinlagen um eine Systemmaßnahme handelt, die sich nicht nur auf Laboruntersuchungen beschränkten lässt, sondern, auch im praxisrelevanten 1:1 Maßstab untersucht werden muss. Versuchsfelder waren notwendig, um definierte, vergleichende Bedingungen zu schaffen und die Instrumentierung der Systemaufbauten zu ermöglichen (DMS, Temperatur).

Insgesamt sind in der Projektplanung vier Phasen vorgesehen. Diese zeigt die Abb. 1.

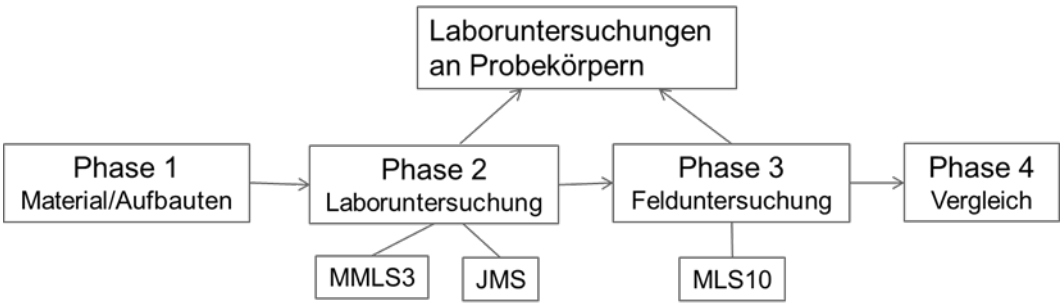


***Abb. 1** Projektphasen*

In der ersten Phase wurden die zu prüfenden Materialien und Aufbauten ausgewählt und festgelegt. Diese Auswahl und Festlegung fand auf der Grundlage von Schichtenverbundprüfungen nach Leutner statt. Zudem werden konkrete Versuchsfelder und Versuchsaufbauten in Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen von ASTRA und Kantonen gesucht und bestimmt.

In der zweiten Phase, wurden Versuche an Versuchsaufbauten im Labor (Labormodellsystem) unter simulierten Verkehrsbeanspruchung mit dem Model Mobile Load Simulator (MMLS3) und in der dritten Phase auf Versuchsfeldern in situ unter beschleunigter Verkehrsbelastung mit dem Mobile Load Simulator (MLS10) durchgeführt. Ergänzend wurden Laboruntersuchungen an aus den Laboraufbauten und in situ Versuchsstrecken entnommenen Probekörpern durchgeführt. Zusätzlich erfolgen Berechnungen mit der Finiten Element Methode zur Modellierung der Wirkungsweise im Schichtenmodell.

Die angestrebten Labor- und in situ Untersuchungen sollten dienen der Ermittlung der Verhaltensweisen der verschiedenen Asphalteinlagen und Systemaufbauten hinsichtlich:

- Analyse der Wirksamkeit und Lebensdauer von Asphalteinlagen in verschiedenen Lagen im Schichtensystem des Strassenoberbaus
- Nachweis der Wirkung von Asphalteinlagen zur Verbesserung der Rissüberbrückung für ausgesuchte Asphalteinlagetypen
- Erarbeitung schlüssiger Erkenntnisse zur Sicherstellung eines genügenden Schichtenverbundes von Asphalteinlagen in bitumenhaltigen Trag- und Deckschichten und Ableitung von Lösungsvorschlägen zur Erhöhung des Schichtenverbundes
- Entwicklung maßgebender Kriterien und Grundlagen zur Dimensionierung und damit zur Sicherstellung der optimalen technischen Anwendung von Asphalteinlagen bei der Erhaltung von Trag-, Binder- und Deckschichten.
- Ableitung von Erkenntnissen bzgl. Erhöhung der Tragfähigkeit des Oberbaus bzw. der möglichen Reduktion der Einbaudicke durch Asphalteinlagen.
- Schaffung von Grundlagen für die Normung.

Für die Simulation von Verkehrslasten im Feld und im Labor standen geeignete Geräte wie MMLS3 und MLS10 (Phase 3) zur Verfügung. In einer Gesamtanalyse (Phase 4) werden die Ergebnisse der Phase 2 den Ergebnissen der Phase 3 gegenübergestellt und analysiert.

2 Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands

2.1 Auswahl der Asphaltbewehrungen (Materialien)

Im Rahmen der Forschungsarbeit erfolgt eine Untersuchung von Asphalteinlagen zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinder- sowie zwischen Asphaltbinder- und Asphalttragschichten. Dabei wurden zuerst Belastungen modellhaft in Laborversuchen und anschliessend auf einer In situ-Stecke im Feldversuch eine beschleunigte Verkehrslastsimulation durchgeführt. Die dabei zu verwendenden Materialien für Asphalteinlagen wurden bereits in einer im Vorfeld durchgeführten Pilotstudie [1] definiert. Für die vorliegende Forschungsarbeit erfolgte in Abstimmung mit der Begleitkommission eine Festlegung eines Herstellers je Materialart. Es wurden nach Absprache mit den Herstellern folgende ordentliche Produkte je Materialart für die Durchführung der Versuche innerhalb der Forschungsarbeit definiert.

- Glas: Hersteller A (Produkt A1 und A2)
- Karbon: Hersteller B (Produkt B1 und B2)
- Kunststoff; Hersteller C (Produkt C1 und C2)

Da der Kostenrahmen des Forschungsprojekts nur die Untersuchung eines Produkts pro Hersteller erlaubte, sollte die Auswahl aufgrund der im Schichtenverbund erzielbaren Werte erfolgen. Zusätzlich hatten die Hersteller die Möglichkeit weitere Produkte bei den Vor- und Laborversuchen testen zu lassen. Folgende zusätzliche Produkte wurden mit für die Laborversuche durch die Hersteller eingereicht:

- Hersteller A: Produkt A3
- Hersteller B: Produkt B3 und B4

Da der Kostenrahmen des Forschungsprojekts nur die Untersuchung eines Produkts pro Hersteller erlaubte, sollte die Auswahl aufgrund der im Schichtenverbund erzielbaren Werte erfolgen. Zusätzlich hatten die Hersteller die Möglichkeit weitere Produkte bei den Vor- und Laborversuchen testen zu lassen. Folgende zusätzliche Produkte wurden mit für die Laborversuche durch die Hersteller eingereicht: Abb. 2 gibt eine Übersicht über alle im Projekt untersuchten Produkte. Zusätzliche wurde immer der Vergleich mit einer Referenz (unbewehrter Prüfkörper) gemacht.

FA	Glasfaser		Karbonfaser		Kunststofffaser	
Hersteller	A		B		C	
Produkte	A1	A2 SAMI	B1	B2	C1	C2
Gitter Maschenweite [mm]	Glas 10	Glas 10	Glas/Karbon 16	Glas/Karbon 16	PET 40	PVA 40x40
min Zugkraft quer längs	100 kN/m 100 kN/m	100 kN/m 100 kN/m	120 kN/m 250 kN/m	120 kN/m 250 kN/m	50 kN/m 50 kN/m	50 kN/m 50 kN/m
max Dehnung quer längs	3 % 3 %	3 % 3 %	1.6 % 4.5 %	1.6 % 4.5 %	12 % 12 %	6 % 6 %
Haftkleber	Haftkleber	PmB... in SAMI OB	C60 BP 0 C2	C60 BP 0 C2	C60 BP 0 C2	C60 BP 0 C2
-menge [g/mm²]	200	1500	250	310	700	700
Applikationstemp. [°C]	70 °C	170	22	22	70	70

ZUSATZ	Glasfaser		
Hersteller	A	B	
Produkte	A3	B3	B4

***Abb. 2** Produkte*

3 Voruntersuchung: Schichtenverbund

3.1 Grundsätzliches

Im Rahmen der Prüfung des Schichtenverbbunds wurden alle in Tabelle 2 aufgeführten Produkte untersucht, wobei die Zusatzprodukte auf ausdrücklichen Wunsch der Herstellen und auf deren Kosten geprüft wurden und nicht für weitere Untersuchungen in Betracht gezogen werden sollten. Tab. 1 zeigt, zwischen welchen Schichten die Asphalteinlagen eingebaut und geprüft wurden.

***Tab. 1** Produkte zur Prüfung des Schichtenverbund*

Produkt	Deck-/Binderschicht	Binder/Tragschicht
A1	X	X
A2”	X	X
A3	X	
B1	X	X
B2	X	X
B3	X	X
B4	X	X
C1	X	X
C2	X	X
Referenz	X	X

3.2 Prüfkörperherstellung

Es wurden dreischichtige Prüfkörper bestehend aus seiner Deckschicht AC8S, einer Binderschicht ACB11S und einer Tragschicht ACT22S hergestellt. Für die Verdichtung der Asphaltschichten wurde das Ornièreur Verdichtungsgerät verwendet, wobei ein doppelt breiter Verdichtungsrahmen (Breite: 395mm) verwendet wurde. Das Mischgut wurde dazu im Ofen aufgeheizt und heiß in den Verdichtungsrahmen eingefüllt. Die Verdichtung erfolgte schichtenweise mit einer dafür konstruierten Stahlrolle, die über die Gummireifen des Gerätes gezogen wurde (siehe Abb. 3). Die Asphaltbewehrung wurde dabei entweder zwischen Deck- und Binderschicht oder zwischen Binder- und Tragschicht appliziert. Ein unbewehrter Plattenaufbau wurde als Referenz hergestellt.

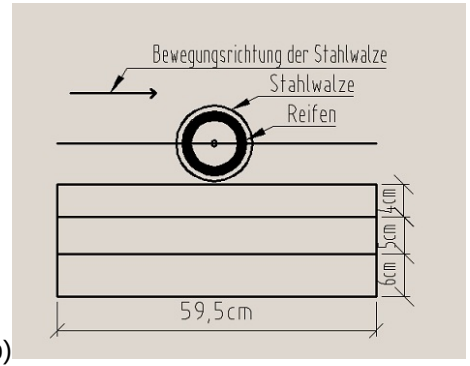
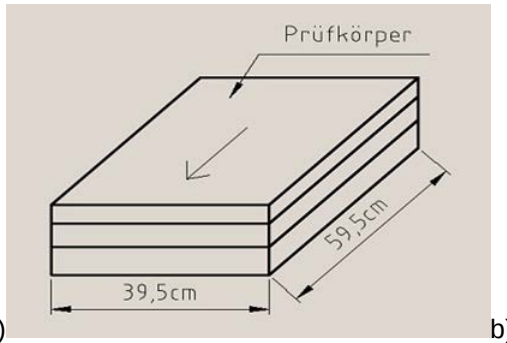
a) b) 

Abb. 3 *Produkte Verdichtungseinrichtung (Foto (a), Schema (b)) für die Probekörperherstellung des französischen Spurrinnentesters (LCPC Ornièreur)*

Prüfkörperabmessung und Schichtenaufbau sind in Abb. 4 dargestellt.

a) 

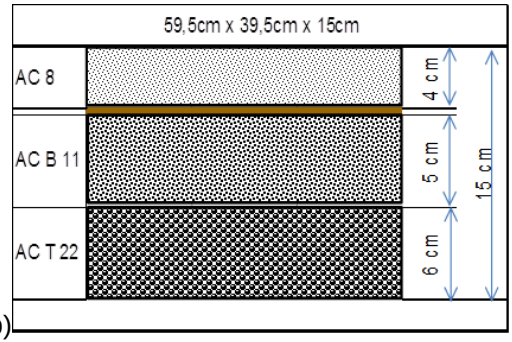
b) 

Abb. 4 *Geometrische Eigenschaften (Abmessung (a), Bsp. Lage Asphaltbewehrung(b)) für Probekörper des französischen Spurrinnentesters (LCPC Ornièreur)*

3.2.1 Applikation der Asphaltbewehrung

Je nach Angaben der Hersteller erfolgte die Applikation der auf Plattengröße zugeschnittenen Asphaltbewehrungen mit Bitumenemulsion bzw. Haftkleber oder aber auf der SAMI. Eine genaue Beschreibung der in Anwesenheit der Hersteller durchgeführten Applikationen ist den im Anhang befindlichen Protokollen zu entnehmen. Abb. 5 zeigt beispielhaft die Applikation der Asphaltbewehrung für die Herstellerfirma C.

a) b)

Abb. 5 *Einbau Produkt C, a) Aufbringen der Emulsion mit Pinsel, b) Andrücken des Gitters mit Schaumstoffrolle*

3.3 Prüfkörperentnahme und Prüfung des Schichtenverbunds

Zur Durchführung der Prüfungen im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die direkte Scherprüfung nach Leutner [2] mit der von der EMPA modifizierten Scherprüfform (siehe Abb. 6) verwendet. Die modifizierte EMPA-Prüfform ist in eine servohydraulische Prüfmaschine (z.B. eine konventionelle Marshallpresse) integrierbar und erlaubt die Prüfung von Bohrkernen mit einem Durchmesser zwischen d = 148mm und 15mm, wobei die beiden u-förmigen Scherbackeneinsätze dem Bohrkerndurchmesser im Millimeterabstand angepasst werden können [3, 4]. Bei der Prüfung liegt das eine Ende des Bohrkerns bis zur gewählten Scherebene auf einer u-förmigen Auflagefläche und wird von einer pneumatischen Einspannvorrichtung mit definiertem Druck angepresst, während das andere Ende des Prüfkörpers nicht gehalten wird. Die Scherkraft wird vom Kolben über den an einem Joch befestigten Scherbackeneinsatz mit einer Geschwindigkeit von 50.8 mm/min in die Scherebene eingeleitet. Dabei wird der Prüfkörper bis zum Bruch belastet.

Pro Ornièreur-Prüfkörper wurden 6 Bohrkerne entnommen, wodurch eine gewisse Repräsentanz hergestellt werden konnte. Dies ist ebenfalls in Abb. 6 dargestellt.

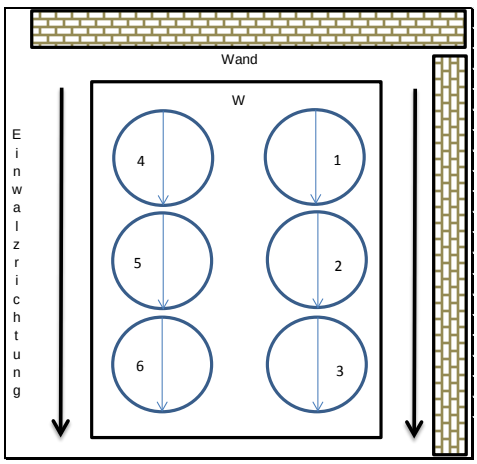
a) b) 

Abb. 6 *Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner, a) Prüfvorrichtung, b), Bohrschema*

3.4 Ergebnisse

In Abb. 7 und Abb. 8 sind die Ergebnisse der Prüfung des Schichtenverbunds zusammengefasst. In Abb. 7 sind die zwischen Deck- und Binderschicht, in Abb. 8 die zwischen Binder- und Tragschicht ermittelten Scherkräfte eingezeichnet. Bei den in den Diagrammen dargestellten Säulen handelt es sich um den Mittelwert aus je 6 Bohrkernen, zusätzlich ist die Standardabweichung angegeben.

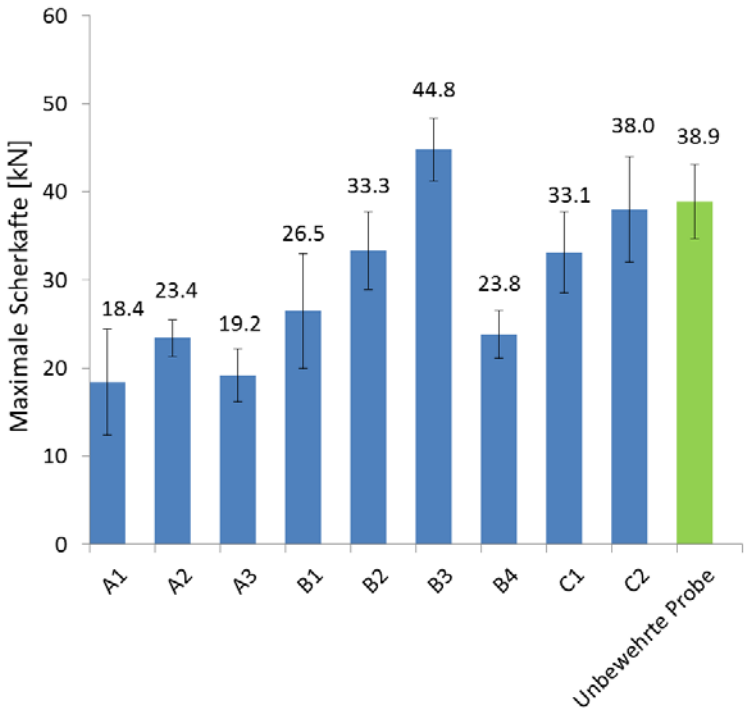


***Abb. 7** Ergebnisse der Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner zwischen Deck- und Binderschicht*

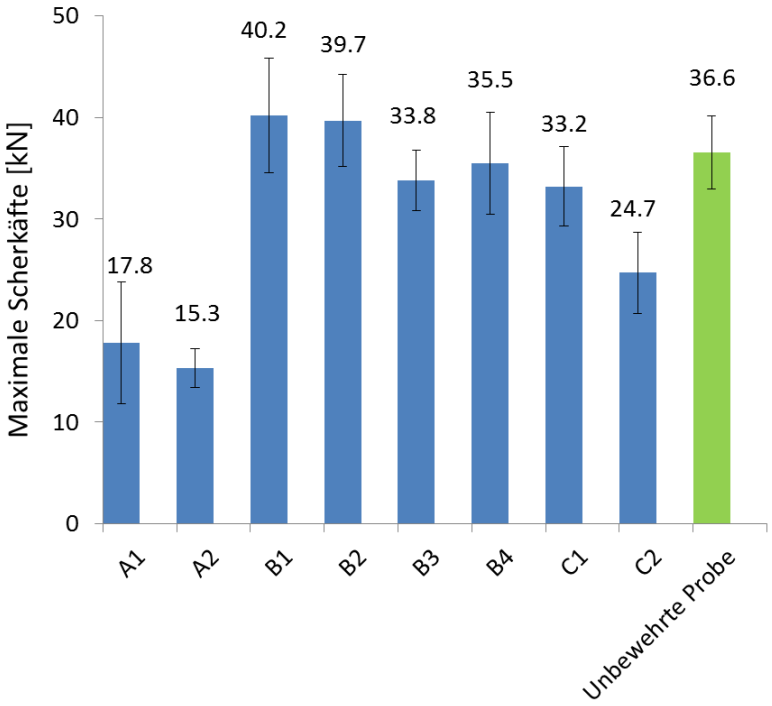


***Abb. 8** Ergebnisse der Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner zwischen Binder- und Tragschicht*

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Prüfung des Schichtenverbunds zeigt, dass für alle untersuchten Materialien Werte erreicht werden konnten, die den Anforderungen der Schweizer Norm entsprechenden (F_{max} >15kN für Deck-/Binderschicht und F_{max} >12kN für Binder-/Tragschicht). Auch wenn die Scherkraft teilweise durch den Einbau der Zwischenschicht, d.h. der Asphaltbewehrung geschwächt wird, sind die Werte für den Großteil der untersuchten Produkte sehr zufriedenstellend. Dies trifft vor allem im Fall der Asphaltbewehrung zwischen Binder- und Tragschicht zu, wobei hier mit den Karboneinlagen sogar höhere Mittelwerte der Scherkraft als im Fall des unbewehrten Prüfkörpers erreicht werden. Die Glaswehrungen der Firma A erzielen die geringsten Werte, wobei gerade das von der Firma favorisierte SAMI System nicht in jeden Fall, die höchsten Werte dieser Produktegruppe liefert.

3.5 Auswahl der Produkte für die Labor- und In-situ-Prüfungen

Die Auswahl der Produkte erfolgte daher durch die Herstellerfirmen, wobei das von ihnen favorisierte Produkt nicht notwendigerweise immer dasjenige mit den höchsten Schichtverbundwerten war, sondern das entweder für den Verwendungszweck oder der Marktlage von ihnen als das geeignete angesehen wurde. Im Fall der Glasbewehrung der Firma A wurde entgegen der ursprünglichen Absicht und der in der Begleitkommission vertretenen Ansicht, von der Firma das Produkt mit SAMI System gewählt.

Ausgewählt wurden die Produkte A2, B1 und C1, die im Folgenden nur noch mit A, B und C bezeichnet werden.

4 Laboruntersuchungen

4.1 Grundsätzliches

In den Laboruntersuchungen sollten grundsätzlich zwei für das Verhalten der Systeme (Aufbauten mit Asphalteinlagen im Vergleich mit Systemen ohne Asphalteinlage) massgebende Bereiche, nämlich der der Gebrauchstemperaturbereich einerseits und der Tieftemperaturbereich andererseits, betrachtet werden.

Für die Untersuchung im Gebrauchstemperaturbereich war die Untersuchung von Ermüdung und Rissüberbrückung mit dem kleinen Verkehrslastsimulator Model Mobile Load Simulator MMLS3 [5, 6, 7] geplant, für das Tieftemperaturverhalten war die Untersuchung des Rissüberbrückungsverhaltens bei tiefen Temperaturen mit dem sogenannten Joint Movement Simulator JMS [8, 9], der eigentlich für die Untersuchung des Tieftemperaturverhaltens von Fahrbahnübergängen verwendet wird vorgesehen.

4.2 Untersuchung von Ermüdung und Rissüberbrückung im Gebrauchstemperaturbereich (20°C)

4.2.1 Herstellung der Prüfkörper

Für die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens erfolgt die Herstellung von zweischichtigen Platten im Format des Model Mobile Load Simulators (MMLS3). Es wurde dabei für Deckschicht (AC 8S) und Binderschicht (ACB11S) das gleiche Mischgut wie für die Schichtverbundprüfplatten verwendet. Die Prüfkörper wurden mit Abmessung von 1800mm x 435mm mit dem in Abb. 10 dargestellten Walzenverdichter in zwei Lagen hergestellt. Dazu wurde das jeweilige Mischgut in einem Ofen erwärmt und dann in den vorgesehenen Holzrahmen gefüllt und verdichtet. Insgesamt wurden pro 2 Platten pro System (Systeme A, B, C und unbewehrtes System) hergestellt. Die untere Schichtdicke (Binderschicht) betrug dabei 50mm. Danach erfolgte das Aufbringen des Haftklebers und der Bewehrung bzw. der SAMI und der Bewehrung durch die jeweiligen Firmen (vgl. Abb. 10). Da es sich beim System um eine Bewehrung mit zwei unterschiedlichen Bewehrungseinlagen aus Karbon und Glas handelt, wurde diese so eingebaut, dass die Karbonfaser quer und die Glasfaser längs zum Riss zu liegen kam. Die unbewehrten Platten wurden ebenfalls mit einem Haftkleber behandelt. Das Aufbringen der SAMI für System A wurde wie in der Praxis mit einem mobilen Aufspritzsystem durchgeführt (vgl. Abb. 9) Nach dem Aufbringen der Asphaltbewehrung erfolgte der Einbau der Deckschicht mit einer Dicke von 40mm.

Abb. 9 *Aufbringen der SAMI für System A*

Abb. 10 *Walzverdichter und Probekörperherstellung für den Model Mobile Load Simulator (MMLS3)*

4.2.2 Verkehrslastsimulator MMLS3

Der in Südafrika entwickelte Verkehrslastsimulator (siehe Abb. 11) dient der beschleunigten Prüfung von Straßenbelägen und wird zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften unter Radlast eingesetzt [10, 11]. Das Gerät besteht aus einem steifen Stahlrahmen mit vier adjustierbaren Füßen. Die Belastung wird über 4 Räder mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Breite von 80mm aufgebracht, die sich wie bei einer Kettensäge in einer Richtung auf einem Umlaufriemen bewegen (vgl. Abb. 12). Der Reifendruck kann zwischen 560...800 kPa eingestellt werden. Das gesamte

Gerät besitzt eine Länge von 2400mm, eine Breite von 600mm, eine Höhe von 1150 mm und ein Gewicht von 800 kg. Die Länge der Prüfstrecke beträgt 1000 mm. Die pro Last wirkende Kraft kann zwischen 1.9...2.7 kN geregelt werden. Die maximale Geschwindigkeit der Maschine beträgt 9 km/h, womit etwa 7200 Lastzyklen pro Stunde aufgebracht werden können.

***Abb. 11** Model Mobile Load Simulator (MMLS3) und Detail: Rad*

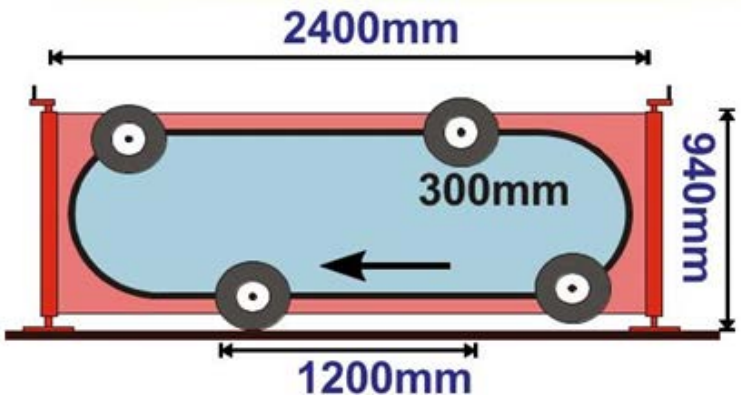


***Abb. 12** Schema des Model Mobile Load Simulator (MMLS3)*

4.2.3 Prüfaufbau

Nach der Fertigstellung wurden den Prüfkörpern an der Unterseite zwei Sollbruchstellen (Schnitte der Tiefe 35mm) eingeschnitten. Anschließend wurden die Prüfkörper auf zwei Auflager im Abstand von 175mm vom Prüfkörperrand aufgelegt. In der Mitte wurde eine elastische 12mm dicke Moosgummimatte gelegt. Der Prüfaufbau ist in Abb. 13 dargestellt. Wie in Abb. 14 dargestellt, wurden 6 Verformungssensoren (WA1…WA6) angebracht, die der Messung der Durchbiegung (Verformung) des Prüfkörpers unter MMLS3 Belastung dienten, da erwartet wurde, dass sich die Verformung des Prüfkörpers bei Versagen deutlich erhöhen würde. Die Raumtemperatur und die Prüfkörpertemperatur wurden während des Versuchs mit Hilfe von Thermoelementen ermittelt. Die Prüftemperatur des Prüfkörpers wurde in Prüfkörpermitte gemessen.

Während der gesamten Belastungszeit wurden zur Beobachtung der Rissbildung regelmäßig visuelle Inspektionen durchgeführt.

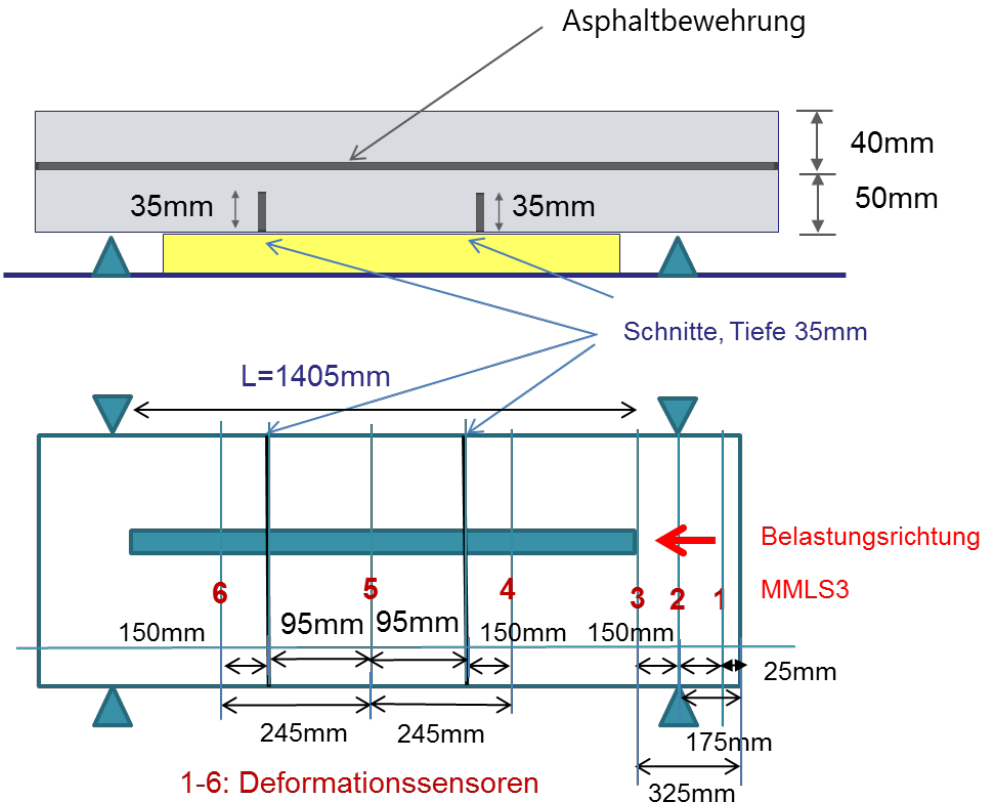


***Abb. 13** Prüfaufbau*

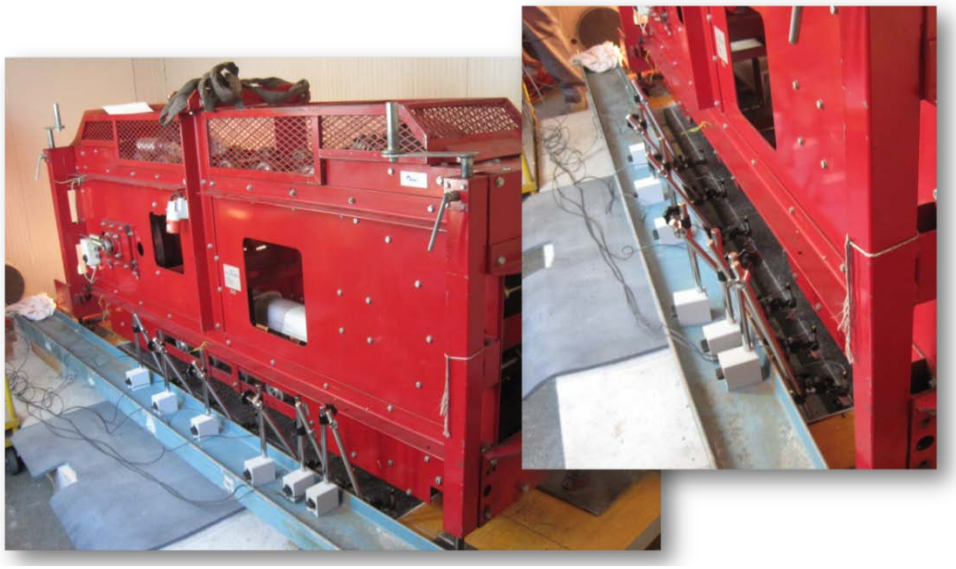


***Abb. 14** Model Mobile Load Simulator (MMLS3) mit 6 Verformungsmessern (Sensoren)*

4.2.4 Durchführung der Prüfung

Die Prüfung erfolgte mit dem Verkehrslastsimulator MMLS3 mit 7200 Überrollungen pro Stunde, einem Reifendruck von 6bar, einer Radlast von 2.1kN und bei einer Zieltemperatur (gemessen im Prüfkörper) von 20°C. Die Belastung wurde grundsätzlich Tag und Nacht aufgebracht, allerdings mit geplanten Unterbrüchen an den Wochenenden bzw. Feiertagen.

4.2.5 Ergebnisse

Die folgenden Abb. 15 bis Abb. 30 zeigen die Ergebnisse der Untersuchung mit dem Verkehrslastsimulator MMLS3 für die einzelnen Systeme. Dargestellt sind jeweils für alle untersuchten Prüfkörper die Deflektion in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen gemessen an den Weggebern WA4-WA6. Zusätzlich sind jeweils Aufnahmen der Prüfkörper der einzelnen Systeme beispielhaft abgebildet. Neben der regelmäßigen visuellen Kontrolle während der Prüfung gibt ein Anstieg der mit den Weggebbern gemessenen Deflektion Auskunft darüber, ob bei einer Platte ein Versagen in Form des Durchschlagens von Rissen erfolgt ist. Abb. 31 und Tab. 2 zeigen eine Zusammenfassung aller Prüfergebnisse.

System A

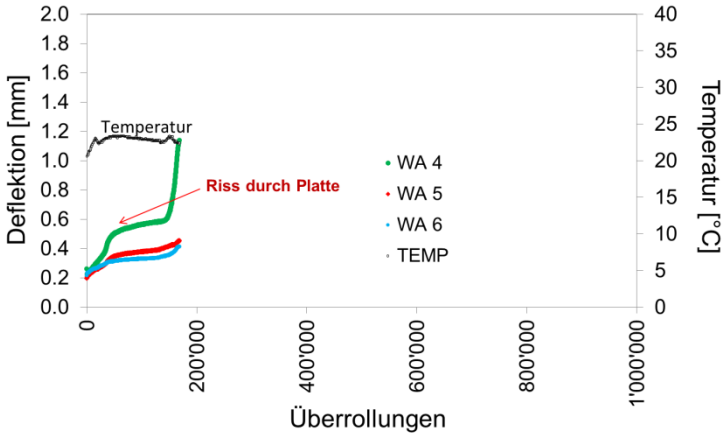


Abb. 15 *Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für System A, Prüfkörper 1*

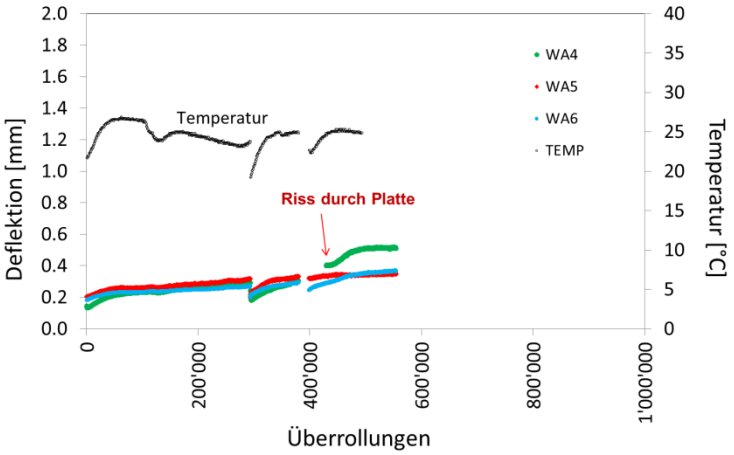


Abb. 16 *Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für System A, Prüfkörper 2*

Abb. 17 *System A, Prüfkörper 1 nach Versagen*

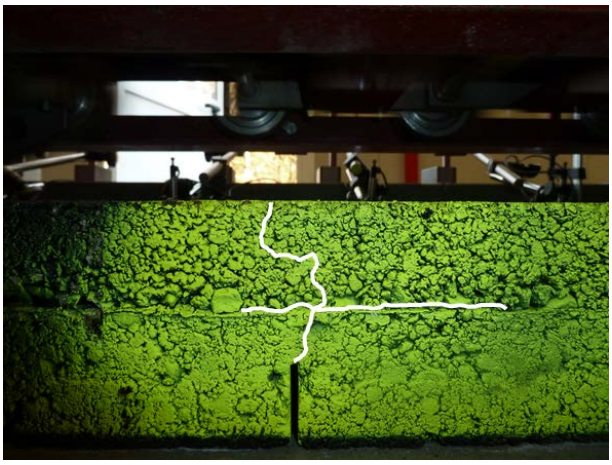


Abb. 18 *System A, Prüfkörper 2 nach Versagen*

System B

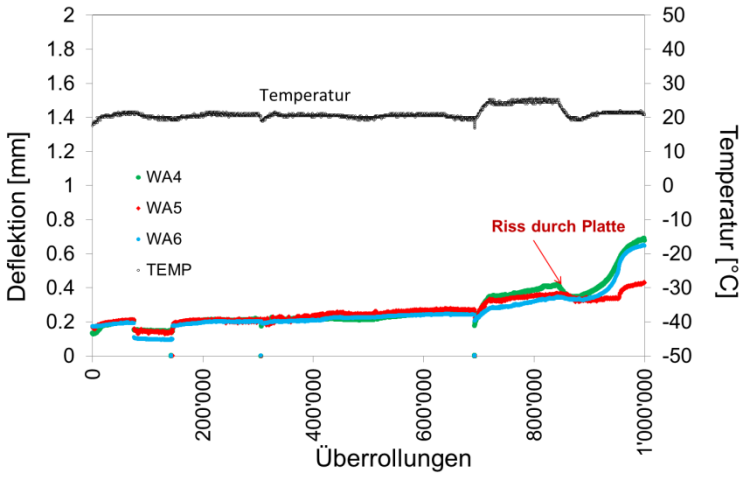


Abb. 19 *Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für System B, Prüfkörper 1*

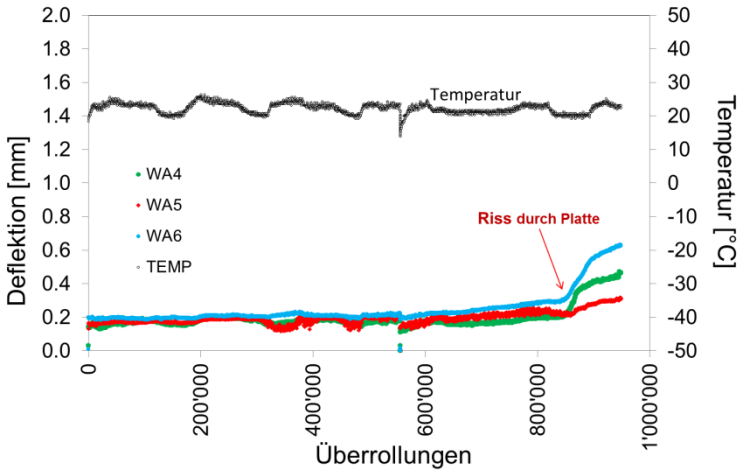


Abb. 20 *Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für System B, Prüfkörper 2*

Abb. 21 *System B, Prüfkörper 2 nach Versagen*

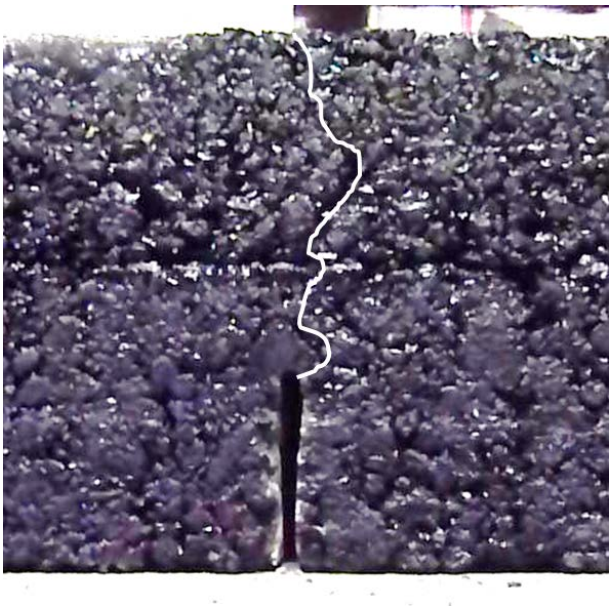


Abb. 22 *System B, Prüfkörper 2 nach Versagen*

System C

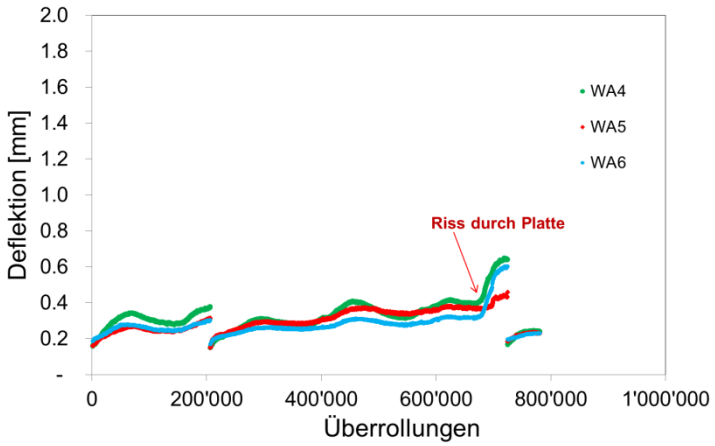


***Abb. 23** Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für System C, Prüfkörper 1 (Temperaturmessung wurde nicht aufgezeichnet)*

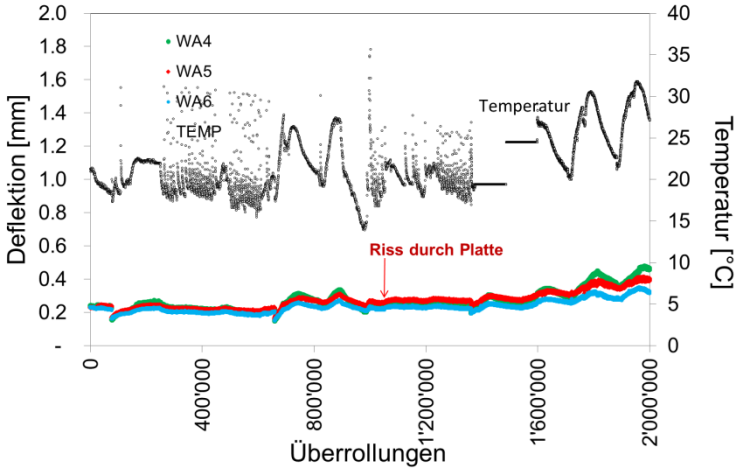


***Abb. 24** Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für System C, Prüfkörper 2*

Das Versagen des Prüfkörpers (Riss durch die Platte) wurde bei einer Anzahl von 1‘140‘000 Überrollungen festgestellt. Außerdem wurde anhand der Aufzeichnung festgestellt, dass einer der 4 Belastungsreifen platt war und so nicht zur aufgebrachten Belastung beitragen konnte. Aus diesem Grund wurde für die Anzahl Überrollungen bei Versagen mit ¾ der Anzahl der Überrollung bei der der Riss durch die Platte festgestellt wurde als Versagen definiert. Somit ergibt sich: (3/4 x 1‘140‘000 = 855‘000 (vgl. auch Abb. 27 und Tab. 2).

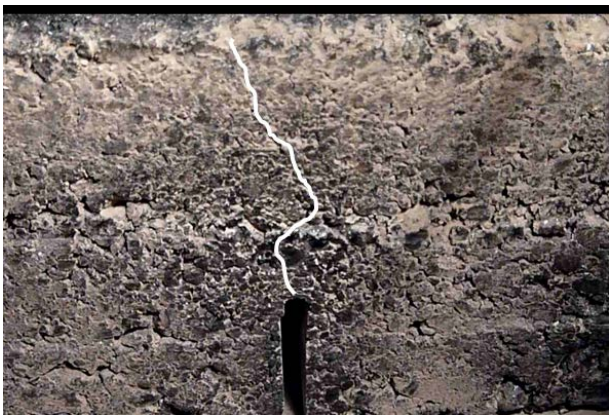


Abb. 25 *System C, Prüfkörper 1 nach Versagen*

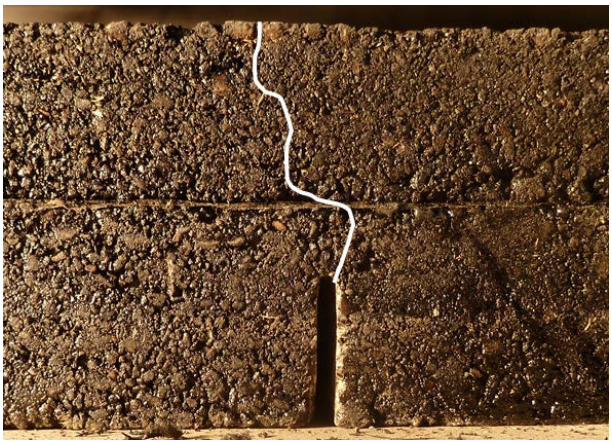


Abb. 26 *System C, Prüfkörper 2 nach Versagen*

Referenz

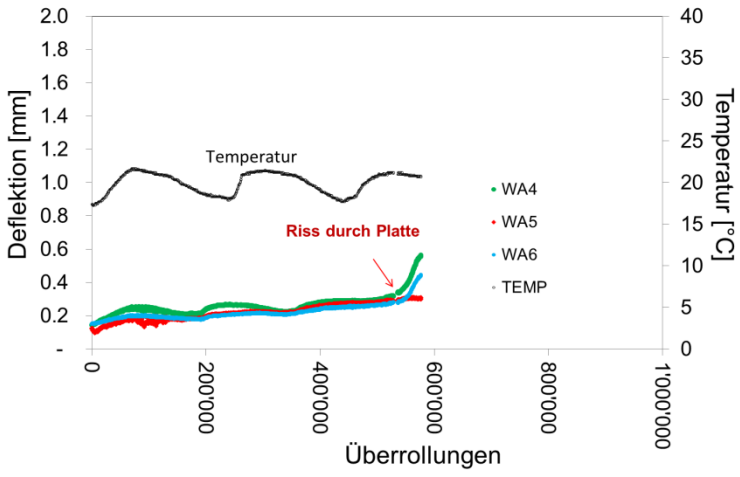


Abb. 27 *Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für Referenz, Prüfkörper 1*

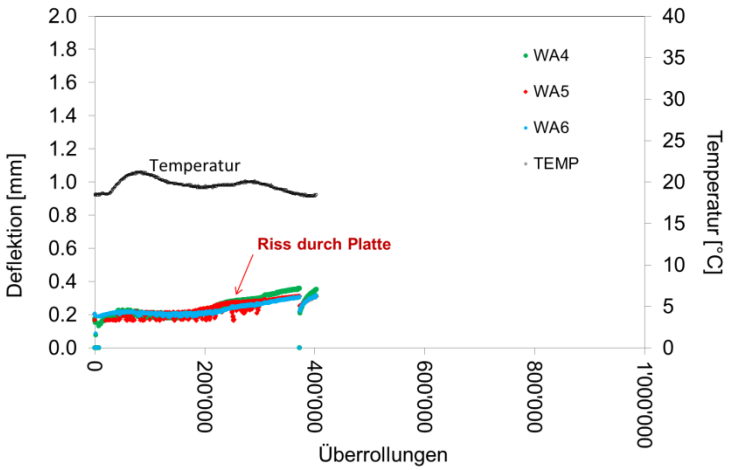


Abb. 28 *Deflektion gemessen an Weggebern WA4, 5 und 6 für Referenz, Prüfkörper 2*

Abb. 29 *Referenz, Prüfkörper 1 nach Versagen*

Abb. 30 *Referenz, Prüfkörper 2 nach Versagen*

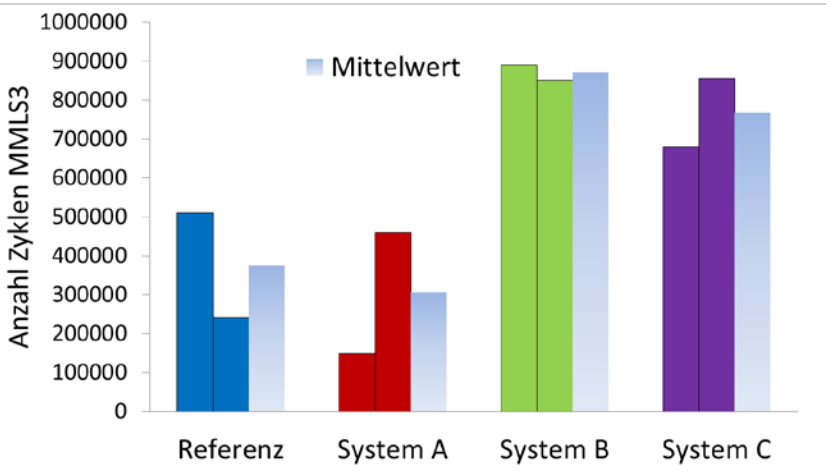


***Abb. 31** Auswertung aller Prüfkörper*

***Tab. 2** Anzahl Überrollungen bis Versagen*

Produkt	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Mittelwert
A	150’000	460’000	305’000
B	890’000	850’000	870’000
C	680’000	855’000	767’500
Referenz	510’000	240’000	375’000

4.2.6 Auswertung und Folgerungen

Wie aus Abb. 31 und Tab. 2 hervorgeht, gibt es deutliche Unterschiede in der Lebensdauer zwischen den einzelnen Systemen, aber teilweise auch zwischen den Prüfkörpern eines Systems. So zeigen beispielsweise schon für die beiden Referenzprüfkörper deutliche Unterschiede, dies gilt ebenfalls für die beiden Prüfkörper des Systems A.

Hinsichtlich des Versagens der Systeme konnte beobachtet werden, dass das Versagen wie erwartet mit einer Rissausbreitung an der Einschnittstelle (künstliche Schwächung des Systems) beginnt und sich von dort nach oben fortsetzt. Bei den Prüfkörpern des unbewehrten Referenzsystems breitet sich der Riss sehr schnell aus und führt zum Auseinanderbrechen der gesamten Platte und damit zu deren Zerstörung. Bei den bewehrten Systemen breitet sich der Riss ebenfalls von der Einschnittstelle von unten nach oben bis zur Bewehrung aus, nach weiteren Lastwechseln setzt sich die Rissausbreitung dann auch oberhalb der Bewehrungseinlage in die Deckschicht fort. Beim System A (System mit SAMI) konnte zudem eine durch die Belastung mit der MMLS3 hervorgerufene Schichtentrennung zwischen Deck- und Binderschicht beobachtet werden.

4.3 Untersuchung der Rissüberbrückung im Tieftemperaturbereich

4.3.1 Grundsätzliches

Zur Bestimmung des Rissüberbrückungsverhaltens im Tieftemperaturbereich gibt es grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten. Zu nennen sind hier zum einen eine Systemprüfung mit dem Dynamischen Joint Movement Simulator DJMS und zum anderen eine Systemprüfung mit dem Model Mobil Load Simulator MMLS.

4.3.1 Dynamischer Joint Movement Simulator DJMS

Der Dynamische Joint Movement Simulator JMS ist eine „Streckbank“ mit der ein langsamer Horizontalzug erzeugt werden kann [10, 11]. Das Gerät wurde ursprünglich für Prüfungen des Ermüdungsverhaltens von Fahrbahnübergangssystemen entwickelt. Die Prüfeinrichtung für diese Prüfung war so aufgebaut, dass die eine Seite des Fahrbahnüberganges zusammen mit der Betonunterlage auf der Prüfeinrichtung unbeweglich befestigt und die andere Seite durch einen hydraulischen Zylinder in Horizontalrichtung beweglich beansprucht wurde (siehe Schema in Abb. 32). Die Beanspruchung erfolgte weggeregelt bei konstanter Prüftemperatur. Mit einer Geschwindigkeit von 10mm/h wurde die Fuge (Abstand zwischen den Betonunterlagen) von einem ursprünglichen Fugenspalt von etwa W_0=30mm auf eine maximale Fugenöffnung von (W_0+Dehnweg) gedehnt und danach mit der gleichen Geschwindigkeit auf den ursprünglichen Fugenspalt W_0 zurück gestaucht.

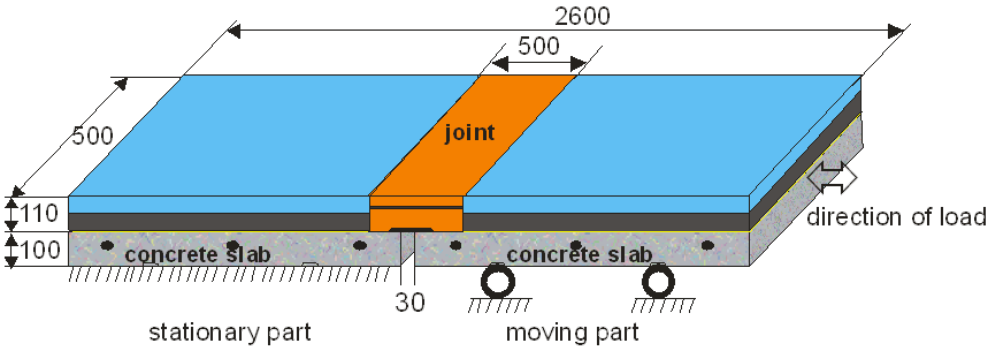


Abb. 32 *Schematische Darstellung der DJMS*

4.3.2 Versuchsdurchführung mit DJMS

Für die Untersuchung erfolgt die Herstellung von zweischichtigen Platten wie sich auch für die Untersuchung mit dem Model Mobile Load Simulator (MMLS3) gebraucht wurden (siehe auch Abschnitt 4.2.1). Zur Anpassung des Prüfkörpers an die Prüfvorrichtung wurden sie auf eine Länge von 800mm zugeschnitten und in der Mitte (400mm) wurde eine Nut mit einer Tiefe 35mm (Sollbruchstelle) eingefräst. Der Prüfkörper wurde dann auf die Betonplatten der Prüfvorrichtung aufgeklebt. Die Prüfkörper wurden auf eine Temperatur von -10°C gebracht und anders als bei der Prüfung von Fahrbahnübergangssystemen wurde der Prüfkörper mit einer Geschwindigkeit von 0.2mm/h auseinandergezogen. Der in einem Klimaraum befindliche Prüfaufbau ist in Abb. 33 dargestellt.

Abb. 33 *Prüfaufbau zur Rissüberbrückung im Tieftemperaturbereich mit DJMS*

Leider erwies sich die DJS bzw. der gewählte Prüfaufbau als nicht geeignet. Es kam u.a. zu Ablösungen und Verschiebungen des Prüfkörpers (vergleiche Abb. 34).

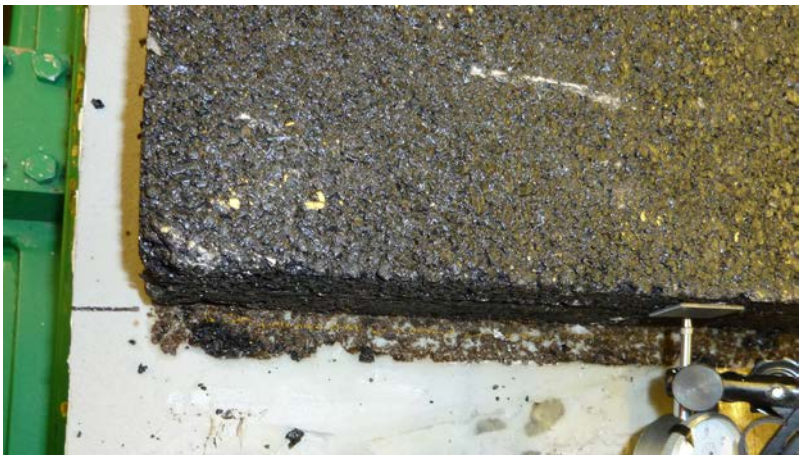


Abb. 34 *Prüfkörper nach der Prüfung (Detail)*

4.3.3 Versuchsdurchführung mit MMLS 3

Wegen der Nichteignung der ursprünglich vorgesehenen DJMS wurde beschlossen, die Prüfung der Rissüberbrückung im Tieftemperaturbereich ebenfalls mit Hilfe des Verkehrslastsimulators MMLS3 durchzuführen (siehe Abb. 35*).*

Hierzu wurden die gleichen Prüfkörper und der gleiche Prüfaufbau wie im Gebrauchstemperaturbereich gewählt (vergleiche Abschnitt 4.2.2). Dieser Prüfaufbau wurde in einem auf -20°C temperiertem Kälteraum aufgebaut.

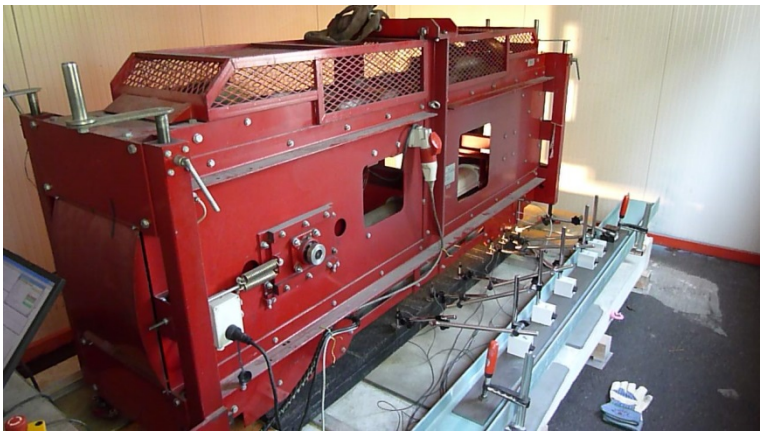


Abb. 35 *Prüfaufbau zur Rissüberbrückung im Tieftemperaturbereich mit der MMLS3*

Als erstes wurde das unbewehrte Referenzsystem geprüft. Es zeigte sich, dass nach 2‘000‘000 Lastwechseln weder Risse noch andere Schädigungen am Prüfkörper festgestellt werden konnten. Aufgrund dieser Beobachtung wurde die Prüftemperatur in zwei Schritten auf -5°C und später auf 0°C erhöht, wobei auch dies nach weiteren 1‘000‘000 Lastwechseln nicht zu einer Schädigung des Prüfkörpers führte.

4.3.4 Auswertung und Folgerungen

Aufgrund der Tatsache, dass selbst mit mehr als 1 Mio Lastwechsel im Tieftemperaturbereich keine Schädigung des unbewehrten Referenzprüfkörpers herbeigeführt werden konnte, muss gefolgert werden, dass dieser Temperaturbereich in Bezug auf die Rissüberbrückung nicht als kritisch anzusehen ist. Die Versuche wurden deshalb abgebrochen und an den bewehrten Platten nicht durchgeführt.

5 Felduntersuchungen

5.1 Grundsätzliches

Ziel der Untersuchungen mit dem Verkehrslastsimulator MLS10 war, die gewählten Systeme in situ, d.h. unter möglichst realistischen Bedingungen (Belastung, Klimabeanspruchung) vergleichend zu untersuchen. Zur Realisierung dieses Ziel und zur Gewährleistung dieser Bedingungen wurden zum einen realistische, jedoch relativ schwache Aufbauten hergestellt bzw. der aufgebrachte Belag wurde mit künstlichen Schwachstellen (gefräste Risse) versehen, um so rasch vergleichende Ergebnisse hinsichtlich Wirksamkeit und Performance zu erhalten. Zum anderen wurden insgesamt 2 Testfelder mit insgesamt 4 unterschiedlichen Versuchsfeldern bzw. Aufbauten (3 Felder mit Asphaltbewehrung, 1 nicht verstärktes Referenzfeld) erstellt (siehe auch Abb. 37), um so die Anzahl der Überrollungen zu verringern und innerhalb eines möglichst kurzen Zeitraums auch möglichst gleichmäßige Temperaturen zu gewährleisten.

5.2 Verkehrslastsimulator MLS10

Der MLS10 beruht auf einem neuartigen Konzept. Kernstück bildet eine mit 24 linearen Induktions-Motoren (LIM) angetriebene, in sich geschlossene Kette aus vier Schienenwagen (sog. Bogies), die innerhalb der Maschine in eine Richtung umlaufen (Abb. 36). Jeder dieser Bogies ist jeweils mit einer hydraulisch gelagerten, doppel- oder einzelbereiften Halbachse zum Aufbringen der Verkehrslast bestückt. Die Bereifung der Lasträder kann mit Zwillingsrädern der Größe 285/70 R19.5 oder mit Supersingles der Dimension 455/40 R22.5 erfolgen. Jeder Bogie wird auf den Umlaufschienen mit 12 Stahl-Doppelrädern geführt. Diese weisen einen Durchmesser von 250mm auf und sind derart konstruiert, dass je nach Position des Bogies in der oberen oder unteren Hälfte der Umlaufstrecke die Führungswirkung optimal ist. Die Form der Laufschienen im Umlenkbereich ist derart optimiert, dass die Lasträder möglichst stossfrei auf den Belag aufsetzen.

Mit den hydraulisch gegen die Belagsoberfläche gepressten Reifen des jeweils untersten Bogies wird die Strasse mit einer Halbachslast von bis zu 65kN belastet (entspricht einer Achslast von 130kN) und über eine Länge von ca. 4.2m mit einer maximalen Geschwindigkeit von 22km/h überrollt. Damit zeichnet sich der Verkehrslastsimulator durch eine hohe Leistungsfähigkeit von 6’000 unidirektionalen Überrollungen pro Stunde aus.

Der MLS10 ist ca. 11m lang, 3m hoch und 2.5m breit. Er hat ein Gewicht von ca. 34t und kann auf einem Spezialtieflader zur Prüfstelle transportiert werden. Einmal dort angekommen, kann der MLS10 selbstständig mit einem Hydraulikmotor auf seinen Transporträdern im Schritttempo von einer Prüfstelle zur anderen manövriert werden. Dieses Fahrsystem erlaubt auch das autonome Beladen des Tiefladers über eine maximal um 10% geneigte Rampe. Für periodische Messungen und Inspektionen der Belagsoberfläche lässt sich die Anlage mittels der hydraulisch beweglichen Arme der Transporträder um ca. 80cm anheben.

Im Betrieb benötigt der MLS10 eine elektrische Leistung von ca. 50kW, die von einem integrierten Dieselgenerator mit Partikelfilter erbracht wird. Die Anlage ist mit 3 Dieseltanks à 1‘300l bestückt, die einerseits die statische Steifigkeit der Maschine erhöhen und anderseits deren Energie-Autonomie sicherstellen. Die Lärmentwicklung beträgt ca. 83dB(A) und liegt damit im Bereich der am Tage in der Schweiz tolerierbaren Lärmemissionen des Strassenverkehrs. Um die einseitige Abnutzung der Laufschienen zu vermeiden ist die maximal zulässige Strassenneigung im Betriebszustand auf 3% zu beschränken.

Der MLS10 kann mit einem Zusatzsystem ausgerüstet werden, welches auch die Simulation des in der Praxis vorkommenden seitlichen Spurdriftens um ±300mm erlaubt.

Bedingt durch das Antriebssystem wird beim Überrollen kein definierter Horizontalschub aufgebracht, weshalb beispielsweise der Effekt des Bremsens nicht simuliert werden kann. Gewisse Untersuchungen des Abriebverhaltens lassen sich aber dennoch durchführen. Die Anlage kann zudem auch mit künstlicher Beregnung der Belagsoberfläche betrieben werden. Dies kann sich in jenen Fällen als zweckmässig erweisen, wo die Wirkung von Wasser auf das Verhalten des Strassenbelages untersucht werden soll.

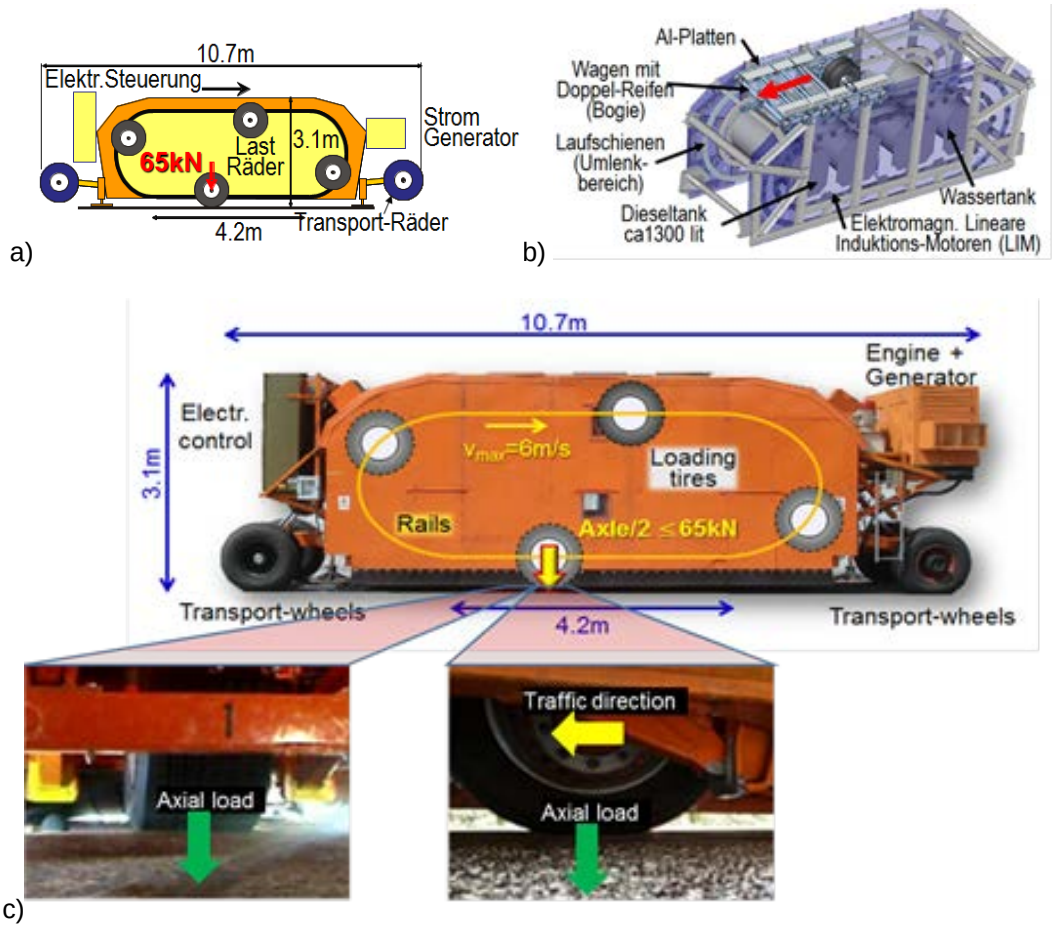


Abb. 36 Mobile Load Simulator MLS10: Funktionsprinzip (a); Umlaufsystem mit einem dargestellten Bogie (b); reale Ansicht inklusive Schema (c)

5.3 Einbau und Methodik

Das gesamte Versuchsfeld erstreckte sich über eine Fläche von 36.0m x 4.7m. Die 3 Bewehrungsprodukte und das Referenzfeld ohne Bewehrung wurden dabei auf einer Fläche von je 9.0m x 5.0m eingebaut. Für die Aufbringung der Belastungszyklen mit dem MLS10 erfolgt, wie oben erwähnt, eine Einteilung des Versuchsfeldes in 2 Testfelder, um auf diese Weise die Laufzeit des MLS10 zu verringern und für alle Produkte eine möglichst ähnliche Temperaturverteilung zu gewährleisten (vgl. Abb. 37). Jedes Testfeld umfasste daher zwei Versuchsfelder (Testfeld 1: Referenz und System A, Testfeld 2: System B und System C).

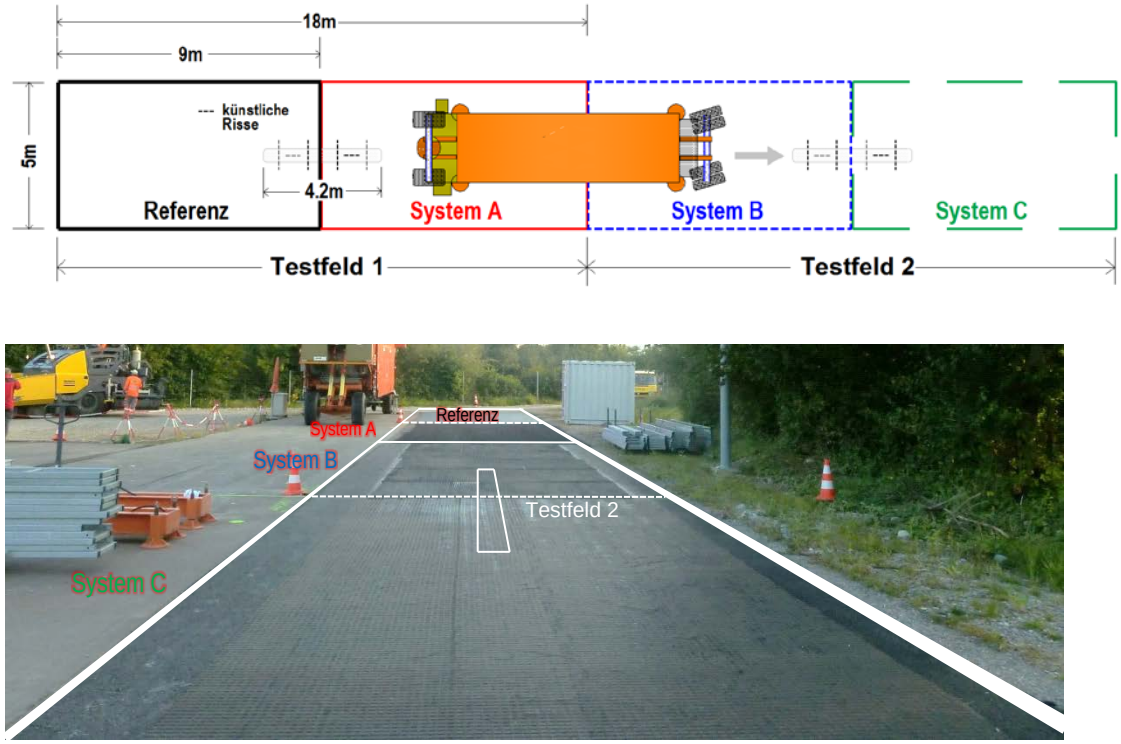


***Abb. 37** Aufbau der Testfelder für die MLS10 Prüfung*

Abb. 38 zeigt eine Skizze der Systemaufbauten (Material und Dicke) mit und ohne Bewehrung.

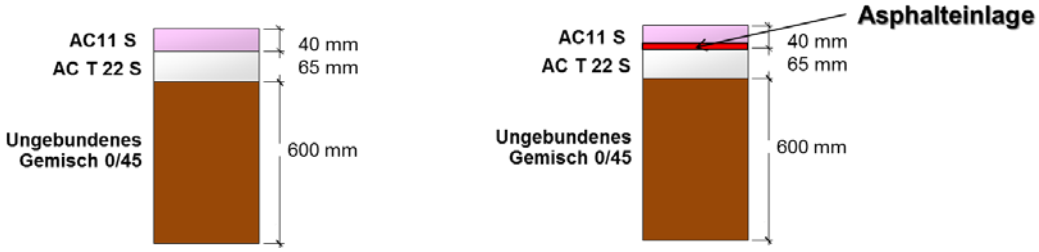


***Abb. 38** Aufbau der Testfelder für die MLS10 Prüfung*

Vor dem Einbau der Asphaltschichten wurden verschiedene Sensoren auf der ungebundene Fundationsschicht installiert (siehe Abb. 39).

Abb. 39 *Installation der Sensoren auf der ungebundenes Fundation 0/40*

Danach erfolgte der Einbau der Tragschicht AC-T 22 S mit einem Bitumen 50/70 und einer Schichtstärke von 65mmm (vgl. Abb. 40). Die Angaben zum Mischgut finden sich im Anhang VII.

Abb. 40 *Einbau der Tragschicht AC T 22 S*

Nach Abkühlung wurden in jedem Versuchsfeld Schnitte (künstlichen Risse mit 65mm Tiefe und 4mm Breite) in die Tragschicht gefräst. Abb. 41 zeigt das Schema dieser Schnitte, die anschließend mit Sand ausgefüllt wurden, um ein Eindringen des Mischguts zu verhindern.

***Abb. 41** Schema der Schnitte (künstliche Risse) in der Tragschicht AC T 22 S*

Jeder Bewehrungshersteller war für die Reinigung seines Feldes und auch für das Aufbringen des Voranstrichs bzw. des Haftvermittlers auf seiner Versuchsfläche zuständig. Der Einbau der Bewehrung erfolgte an zwei aufeinanderfolgenden Tagen (vgl. Abb. 42, Abb. 43 und Abb. 44).

***Abb. 42** Einbau des Systems A*

***Abb. 43** Einbau des Systems B*

Abb. 44 *Einbau des Systems C*

Nach Einbau der verschiedenen Bewehrungssysteme erfolgte der Einbau der Deckschicht (AC 11 S, Bitumen 50/70, nicht polymermodifiziert) mit einer Schichtstärke von 40mm durch die Firma WALO (siehe Abb. 45).

Abb. 45 *Einbau der Deckschicht AC 11 S*

5.4 Messungen und Sensorik: Methodik und Auswertung

Für Durchführung kontinuierlicher Messungen zur Aufnahme des Belagsverhaltens der einzelnen Systeme während der Belastungszyklen wurden verschiedene Sensoren installiert. Dazu gehören Dehnungsmessstreifen (DMS), Beschleunigungssensoren und da die Temperatur hat bekanntermaßen einen großen Einfluss auf das Verformungsverhalten des Asphalts hat, auch Thermoelementen. Diese Sensoren und die mit ihnen ermittelten Daten werden in den nachfolgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

5.4.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen

Für die Temperaturmessung wurden aus Nickel-Chrom gefertigte Thermoelemente des Typs K wie sie in Asphalt, Beton oder Luft verwendet werden können, verwendet. Sie wurden vor und während des Belagseinbaus in verschiedenen Tiefen platziert. Durch eine Teflonisolation können diese Elemente den hohen beim Belagseinbau auftretenden Temperaturen standhalten. Die Kabel wurden nach außen durch den Belag verlegt und in Kabelkanälen zur Messbox, welche die Hardware zur Datenerfassung beinhaltet, geführt. Die Position der Thermoelemente in einem Testfeld ist beispielhaft in Abb. 46 dargestellt.

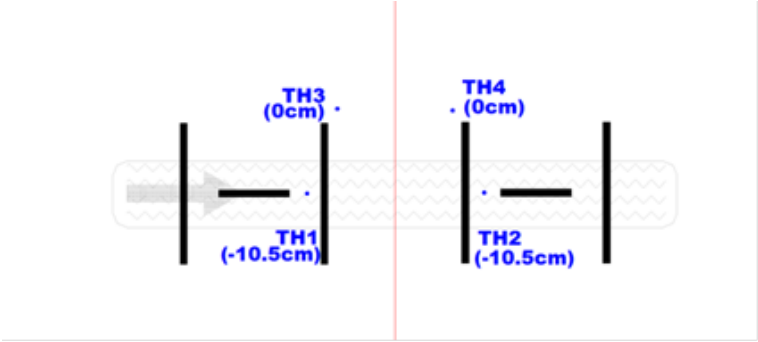


Abb. 46 *Position der Thermoelemente in einem Testfeld*

Die Temperatur wurde alle 5 Sekunden erfasst. Der Durchschnitt aller über einen Zeitraum 5 Minuten erfassten Werte wurde mit Datum und Zeitstempel in tabellarischer Form im internen Speicher des Datenerfassungsgeräts gespeichert. Die Daten wurden in regelmäßigen Abständen mit einer speziellen Software an einen Computer übertragen und als ASCII-Dateien gespeichert. Aus den gespeicherten Tabellen ist die zeitliche Temperaturentwicklung ersichtlich, womit sich das Temperaturprofil der Fahrbahn ermitteln lässt.

5.4.2 Dynamische Dehnungsmessung mit Dehnmessstreifen (DMS)

Zur Erfassung der dynamischen Dehnungen während der Belastung durch den MLS10 in Längs- und Querrichtung wurden Dehnmessstreifen (DMS) eingebaut. Ein Dehnungsmessstreifen stellt prinzipiell einen elektrischen Widerstand dar, welcher in einer Wheatstone'schen Brücke mit hochpräzisen Widerständen des gleichen Werts verschaltet ist. Bei einer auftretenden Dehnung des Messstreifens verändert sich dessen elektrischer Widerstand. Dies wird durch die Messbrücke registriert.

Die eingesetzten DMS der Firma Kyowa sind 120mm lang und in Acryl eingebettet. Die technischen Spezifikationen finden sich in [12, 13]. Es wurde ein Anschluss in Dreileitertechnik zwecks Temperaturkompensation verwendet. Um eine verlässliche Verankerung im Belag und eine bessere Krafteinleitung zu gewährleisten, wurden Aluminiumbalken an beiden Enden senkrecht zur Sensorrichtung angeklebt. Durch das Einhalten einer speziellen Installationsprozedur der Sensoren im Belag wurden die DMS von der Hitze des Belags beim Einbau und dem Gewicht der schweren Baumaschinen geschützt (Abb. 47). Die Originalkabel wurden durch verseilte, silberbeschichtete Kupferkabel mit Teflon Isolation ersetzt, um den hohen Belagstemperaturen beim Einbau Stand halten zu können. Direkt nach dem Aufbringen einer Asphaltschicht wurden aus Holz gefertigte Sensorschablonen an den entsprechenden Stellen im Belag eingearbeitet. Nach dem Erkalten des Belags wurden die Schablonen entfernt, die Alubalken an den Enden des DMS auf den Belag geklebt und mit Kaltmischgut überdeckt. Dieses Verfahren führte zu einer geringen Ausfallquote der Sensoren beim Belagseinbau. Die DMS wurden während des Belagseinbaus in beiden Versuchsfeldern zwischen die einzelnen Schichten platziert. Die Position der DMS ist beispielhaft für ein Testfeld in Abb. 48 dargestellt.

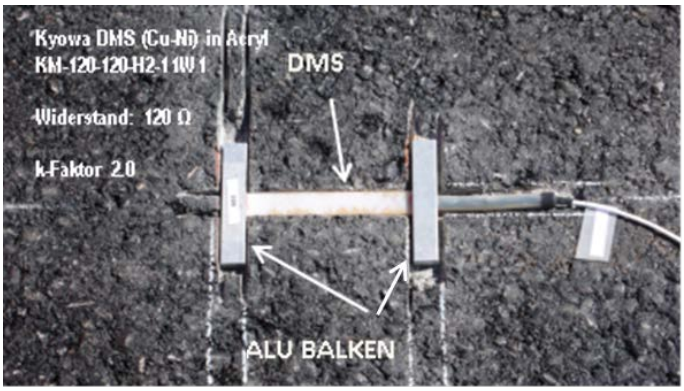


Abb. 47 *Dehnungsmessstreifen nach Fertigung und Einbau in den Belag*

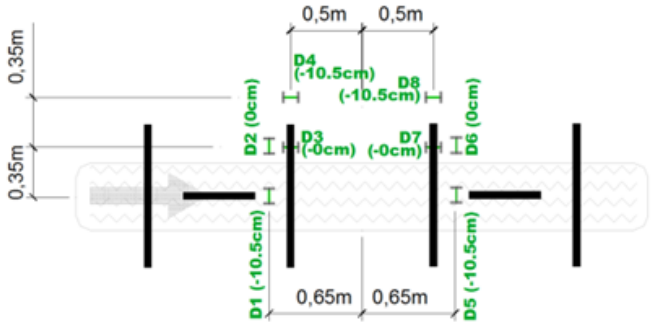


Abb. 48 *Position der DMS in einem Testfeld*

Die Abtastrate für die Dehnungsmessungen wurde auf 1200Hz eingestellt. Die Dehnungssignale wurden alle 5 Minuten für eine Zeitdauer von 30 Sekunden gemessen. Somit besitzt jeder Datensatz eine zeitliche Länge von 30 Sekunden. Die gespeicherte ASCII-Datei wird nach dem Zeitstempel der Messung benannt.

Abb. 49 zeigt einen typischen Dehnungsverlauf unter MLS10 Belastung. In diesem Beispiel werden nur 2 Sekunden des Signals gezeigt, welches in dieser Zeitspanne 3 Peakwerte aufweist. Dies sind die einzelnen Überrollungen durch den MLS10. Die Abbildung enthält auch den Zeitstempel der Datei sowie die gemessenen Temperaturen. Zug- und Druckdehnungen sind mit positiven bzw. negativen Werten dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen permanenten (statischen) Dehnungen im Belag ist es schwierig, eine gemeinsame Nulllinie für alle Sensoren zu definieren. Um dem entgegenzuwirken und wirklich nur die durch die Belastung des MLS10 erzeugten, dynamischen Dehnungen zu messen, wurden alle Sensorsignale vor Beginn der Aufzeichnung tariert, d.h. softwaremäßig auf null gesetzt. Aufgrund der intensiven, repetitiven Belastung durch den MLS10 ist es nicht auszuschließen, dass sich im Belag während des Tests kumulierte Dehnungen ergeben, die zu permanenten Deformationen führen könnten.

Aufgrund der gewählten Messmethode sammelten sich sehr große Datenmengen an. Es ist daher kaum möglich, einen vollständigen Überblick über alle Daten zu geben. Im Folgenden wurde daher eine Methode entwickelt, um den Zustand des Belags für bestimmte Überrollungszeitpunkte zu beurteilen.

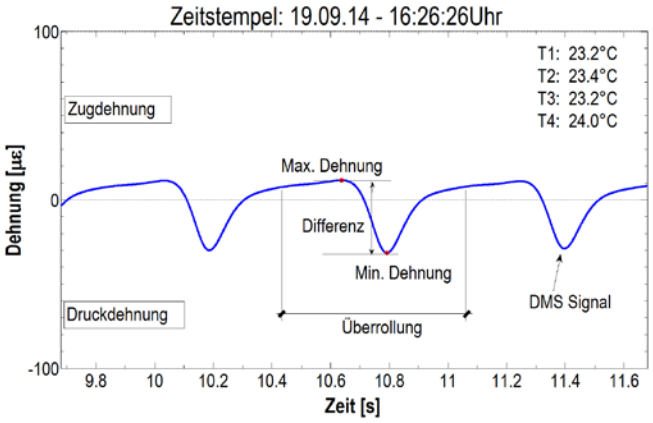


***Abb. 49** Beispiel für gemessene Dehnungen im Belag*

Im Hinblick auf die Datenauswertung ist es wichtig zu berücksichtigen, dass jede Änderung in den gemessenen Dehnungsamplituden über die Zeit (oder der Anzahl der Überrollungen) eine Veränderung der strukturellen Substanz bedeuten könnte. Es wurde daher angenommen, dass die Rissbildung und deren Fortschreiten oder aber auch ein schlechter Schichtverbund einen Einfluss auf die Einsenkungsmulde unter Belastung und somit auf die gemessenen Dehnungen haben.

Allerdings ist nicht nur eine Veränderung der strukturellen Substanz verantwortlich für eine Änderung der Einsenkungsmulde und der daraus folgenden Dehnungen. Auch Temperaturschwankungen während des Tages ändern die Steifigkeit des Asphaltbetons. Normalerweise findet an jedem Tag eine charakteristische Temperaturschwankung statt. Erwärmt sich der Belag im Laufe des Tages, so nehmen gleichzeitig der Modul der Asphaltschichten ab und die Dehnungen zu. Die Überrollgeschwindigkeit der Radlasten hat ebenfalls einen Einfluss auf die Dehnungen: langsame Belastungen erzeugen dabei größere Dehnungen. Der Grund hierfür ist, dass die Steifigkeit der Asphaltschichten abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit ist. Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Verformung des Belages nicht nur durch den Verlust der Steifigkeit infolge der verkehrsbedingten Schäden erfolgt, sondern dass auch Änderungen der Temperatur und der Überrollgeschwindigkeit die viskoelastischen und mechanischen Eigenschaften des Asphaltbetons beeinflussen.

Um den Faktor der Überrollgeschwindigkeit bei den gemessenen Dehnungen zu eliminieren wurden mit dem MLS10 nur Messungen mit einer Geschwindigkeit von 18 km/h durchgeführt. Ziel der Datenauswertung war die Charakterisierung der Dehnungen im Belag durch einen Wert, der unabhängig von der Temperatur und der Überrollgeschwindigkeit ist. Dafür wurde die im Folgenden beschriebene Kompensations-Methode angewendet.

Die gespeicherten Daten wurden automatisch mit einem Matlab – Skript bearbeitet und analysiert. Das Skript verwendet die Dehnungen, die gemessenen Temperaturen und die Anzahl MLS10 Überrollungen. Als Ergebnis liefert es eine Tabelle, welche die Dehnungen in Abhängigkeit von den Anzahl Überrollungen zeigt.

In einem ersten Schritt wurden die Daten überprüft und bereinigt. Beschädigte Dateien und/oder Dateien mit zu hohem Rauschen, Ausreißern, usw. wurden dabei eliminiert. Die ausgewählten Dateien wurden in einem Ordner mit dem entsprechenden Zeitstempel der Messung gespeichert. Das Skript liest jeden Ordner einzeln aus und führt die folgenden Schritte aus:

a. Durchführen einer Tiefpassfilterung der Datensätze mit 20Hz Grenzfrequenz um Hochfrequenzrauschen zu beseitigen.

b. Berechnen der absoluten Differenz zwischen der maximalen und minimalen Dehnung jeder Überrollung, unabhängig davon, wo sich die Null-Linie befindet.

c. Bestimmung des Durchschnitts aller Differenzen der einzelnen Überrollungen. Dies liefert als Ergebnis einen einzigen Wert, die Dehnungsamplitude. Dies wird für jeden Zeitstempel durchgeführt und mit dem Zeitstempel der jeweiligen Datei verknüpft.

d. Die Zeitstempel werden benutzt, um die Werte der Thermoelemente aus der Datei mit den Temperaturen zu erhalten. Die Temperaturen werden danach mit der Dehnungsamplitude kombiniert in einer Tabelle gespeichert.

e. Zudem werden die Dehnungsamplituden eines Tages mit der Anzahl der kumulierten Überrollungen bis zu diesem Zeitpunkt verknüpft und in der gleichen Tabelle gespeichert.

Das Verfahren wurde für jeden Tag mit den vorliegenden Messungen durchgeführt, so dass als Ergebnis eine Tabelle mit vier Spalten entstand: In der ersten Spalte befindet sich der Zeitstempel, in der zweiten die Dehnungsamplitude des entsprechenden Tages, in der dritten die Belagstemperatur und in der letzten die kumulierte Anzahl der Überrollungen. Die Anzahl der Zeilen entspricht der Anzahl gültiger Messungen. Danach führt das Skript Berechnungen zur durchschnittlichen Temperatur während der MLS10 Betriebszeiten durch. Danach werden nur die Dehnung bei diese Durchschnitts-temperatur +/-0.5°C benutzt.

5.4.3 Dynamische Verformungsmessung mit Beschleunigungssensoren

Zur Erfassung der dynamischen Durchbiegung des Belags unter der Last des MLS10 wurden Beschleunigungssensoren verwendet. Ein kapazitiver Beschleunigungssensor Typ KXR94 der Firma Kionix. wurde auf die Belagsoberfläche geklebt und die Kabel in einem Kabelkanal zum Messcontainer geführt. Die Position der Beschleunigungs-sensoren in einen Testfeld ist in Abb. 50 dargestellt.

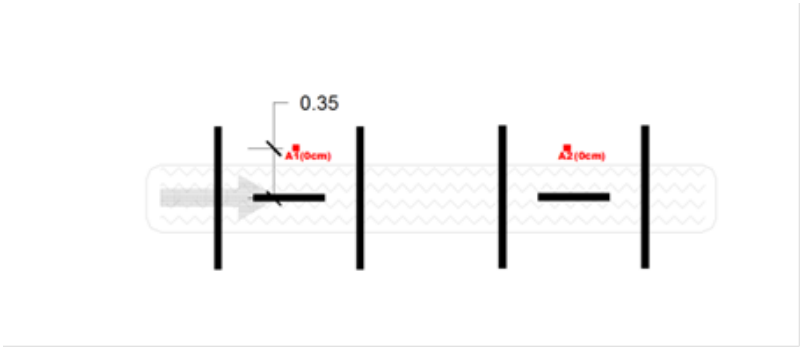


Abb. 50 *Position die Beschleunigungssensoren in einem Testfeld*

5.4.4 Rissermittlung durch visuelle Inspektionen

Zur Ermittlung auftretender Risse und anderer struktureller Schädigungen wurden regelmäßig visuelle Inspektionen der Belagsoberfläche durchgeführt und der Zustand der Belagsoberfläche mit Fotos dokumentiert.

5.4.5 Spurrinnenbildung durch Querprofilmessung

Es wurden Querprofilmessungen mit einem Profilometer vorgenommen, um Spurrinnenbildung und permanente Deformation des Belags zu erfassen.

Das verwendete Profilometer besteht aus einem Stahlbalken mit einem sich darin bewegenden Messrad (Abb. 51), welches sich in ständigem Kontakt mit dem Belag entlang eines Trägers bewegt. Während der Messung wird der Balken an dessen Enden mit Hilfe von zwei auf den Belag geklebten Aluplatten fixiert. Diese stellen die Referenzpunkte der Messung dar und bleiben während der gesamten Testphase auf dem Belag bestehen. Mit diesem Messsystem können Unebenheiten von bis zu 1mm aufgezeichnet werden. Die Kombination von horizontaler und vertikaler Bewegung ermöglicht es, das Querprofil und dessen Änderungen während des Testverlaufs zu messen.

a)

b)

Abb. 51 *Foto des Profilometers zur periodischen Querprofilmessung (a) und schematische Skizze der Messanordnung (b)*

Insgesamt wurden, wie in Abb. 52 dargestellt, 4 Querprofile gemessen (P1-P4, 2 Querprofile pro Testfeld).

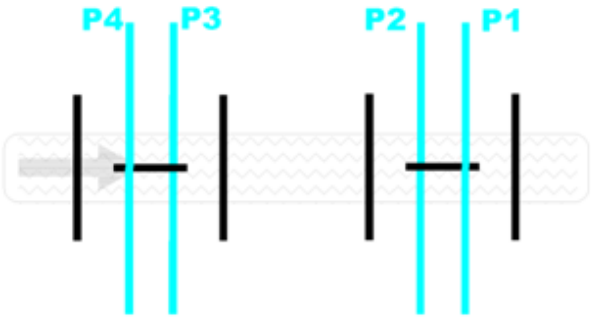


Abb. 52 *Position der Querprofile P1 bis P4*

Für die Datenauswertung wurden nur die Querprofile P2 und P3 berücksichtigt. Die anderen beiden wurden als Backupmessungen durchgeführt. Die Daten des Profilometers wurden während der Messung auf dem PC in Form einer ASCII – Datei gespeichert. Die Datei enthält eine Tabelle mit der Position des Messrades entlang des Balkens und des damit gemessenen Abstandes zur Belagsoberfläche. In diesem Fall wurde die Länge des Profils auf 1400mm begrenzt. Eine Messung fand alle 5mm statt. Die Rohdaten wurden zunächst bereinigt, d.h. es wurden Ausreisser entfernt, verursacht etwa durch kleine im Weg des Messrades befindliche Steine. Danach wurden die bereinigten Daten unter Berücksichtigung eines 5mm Fensters gemittelt. Die erste Messung wird als Referenz gesetzt. Als nächstes wurde jedes weitere gemessene Profil von der Referenz subtrahiert, woraus sich als Resultat das relative Querprofil in Bezug auf das Referenzprofil ergab. Um die maximale Spurrinnentiefe zu berechnen, wurde zuerst die maximale Verformung der Fahrspur unter dem Reifen ermittelt. Aufgrund eines Materialtransports zu den Seiten der Fahrspur hin kann es sein, dass die

Belagsoberfläche an den Fahrspurrändern über das Referenzprofil wanderte. Die maximale Spurrinnentiefe wurde demzufolge berechnet, als Differenz zwischen der maximalen Verformung nach oben an den Fahrspurrändern und der maximalen Verformung nach unten in der Fahrspur (Abb. 53). Zum Schluss wurde die berechnete maximale Spurrinnentiefe über der Anzahl Lastwechsel der MLS10 aufgetragen. Die Entwicklung der Spurrinnenbildung kann mit einer Exponentialfunktionen beschrieben und abgeschätzt werden.

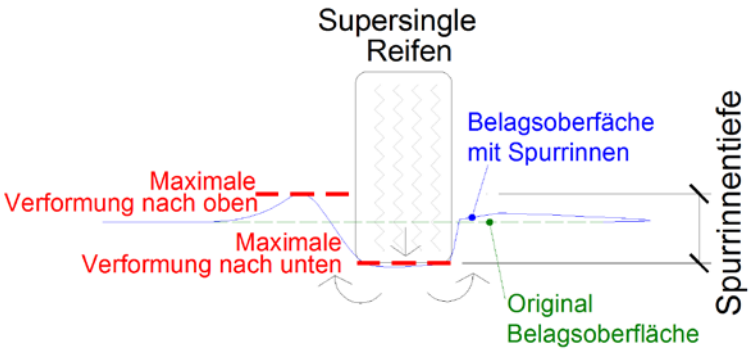


Abb. 53 *Auswertung der Spurrinnentiefe*

5.4.6 Verformungsmessung mit FWD (Falling Weight Deflectometer)

Zur Ermittlung der Verformungen (Deflektionen) wurden Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer FWD nach Ende der MLS10 Belastungszyklen (3. Messtermin: 300‘000 Überrollungen) durch die Firma Infralab SA aus Romanel (Lausanne) durchgeführt.

FWD Messungen wurden an 45 Punkten vorgenommen. Abb. 54 zeigt die Position der gewählten Punkte. Messpunkte 21 bis 25 befinden sich in der Mitte der Fahrspur. Die Abstände zwischen den Messpunkten wurden auf 1m festgelegt, jedoch wurde die Dichte der Punkte im Bereich der Fahrspur erhöht. Temperatur und Schädigungen haben einen Einfluss auf die Werte der Durchbiegung. Messungen ausserhalb der belasteten Fläche können deshalb für Vergleichszwecke herangezogen werden.

Die Messungen mit dem FWD erfolgten mit einem dynamisches Messverfahren, bei dem ein Kraftimpuls auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht wird. Das FWD besitzt eine Masse, die auf einen Gummipuffer fällt, der über einer Grundplatte angeordnet ist. Auf die Strassenoberfläche wirkt so ein Kraftstoss, der für den Messpunkt eine Radüberrollung simulieren soll. Es wird die kurzzeitige Verformung der Straßenoberfläche im Lastzentrum und in verschiedenen Abständen zu diesem gemessen (Muldenmessung).

Die Bewertung der Tragfähigkeit von Straßenbefestigungen erfolgt anhand einer approximierten Deflektionsmulde (Berechnung von Tragfähigkeitskennzahlen, Rückrechnung von Schichtsteifigkeiten). Als Ergebnis der durchgeführten Rückrechnung wird der elastische Modul der verschiedenen Schichten in jedem der 90 Messpunkte bestimmt. Dafür wurden die Messungen gemäss Tab. 3 nach den einzelnen Schichten gegliedert und zusammengefasst.

***Tab. 3** Schichtmodell für die Rückrechnung*

Bezeichnung	Schichten	Dicke [mm]
E1	Asphaltschichten (Trag-, Binder- und Deckschicht)	105
E2	Fundationsschicht (Ungebundenes Gemisch 0/45)	600
E3	Untergrund	unbekannt

Abb. 54 *Messpunkte der FWD Messungen*

5.4.7 Statische Verformungsmessung mit Benkelman-Balken

Zur Bestimmung der statischen Verformung in den verschiedenen Aufbauten im belasteten und unbelasteten Zustand wurden Messungen mit einem modifizierten Benkelman-Balken Verfahren durchgeführt. Dabei wurde der MLS10 als Belastungskörper eingesetzt. Die durch das Rad aufgebrachte Belastung wurde mit einer statische Waage gemessen (siehe Abb. 55).

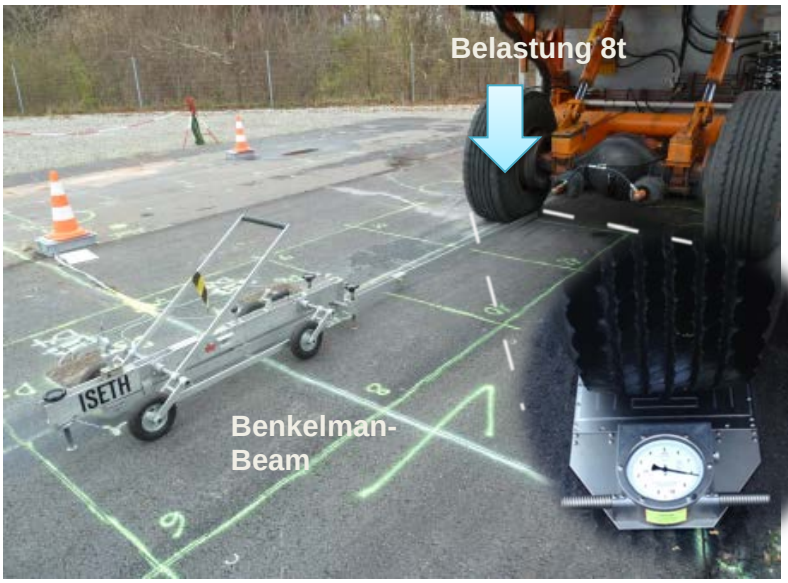


Abb. 55 *Messungen mit Benkelman-Balken*

6 Ergebnisse der in situ Versuche

6.1 Belastungsgeschichte und Temperaturverlauf

Die Belastung der Testfelder durch den MLS10 wurde von Oktober bis Anfang Dezember 2014 durchgeführt. Diese Jahreszeit wurde gewählt, um hohe Temperaturen im Belag zu vermeiden. Die Belastung erfolgte wie in Kapitel 5.3 beschrieben in 2 verschiedenen Testfeldern. Testfeld 1: Referenz und System A, Testfeld 2: System B und C. Um in jedem Testfeld möglichst ähnliche Temperaturbedienungen zu haben, wurde der MLS10 während der insgesamt 600‘000 Überrollungen 3-mal verschoben. Wie aus Abb. 56 ersichtlich wurden in der ersten Etappe im Testfeld 1, 100‘000 Überrollungen durchgeführt. Danach wurde der MLS10 ins Testfeld 2 verschoben und dort 200‘000 Überrollungen durchgeführt. Im nächsten Schritt erfolgten die restlichen Überrollungen im Testfeld 1 und anschließend diejenigen im Testfeld 2. Zusätzlich wurde der Verkehrslastsimulator MLS10 jeweils nach 5‘000, 10‘000, 20‘000, 50‘000, 100‘000, 150‘000, 200‘000, 250‘000 and 300‘000 Überrollungen gestoppt, um Profilmessungen der Spurrinnentiefe durchzuführen und die Belagsoberfläche visuell zu begutachten.

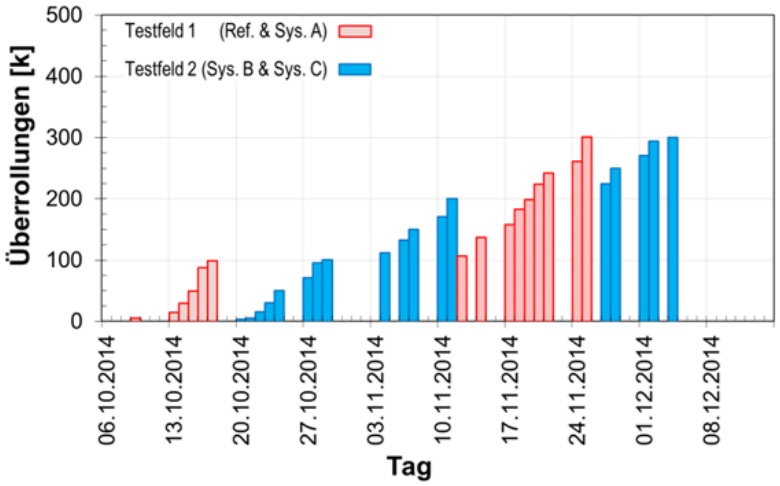


Abb. 56 *Schema der Überrollungen mit MLS10*

In Abb. 57 sind einerseits die typischen Tagespeaks und andererseits die Tendenz einer Temperaturabnahme von Oktober bis Dezember sichtbar.

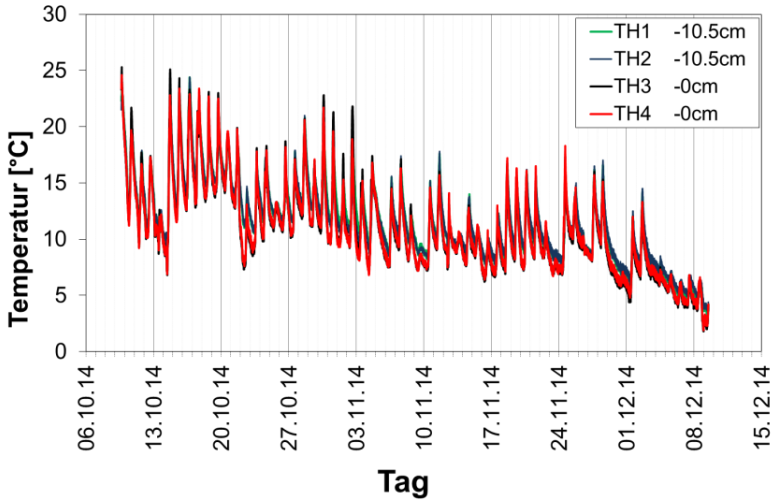


Abb. 57 *Verlauf der Temperatur während der MLS10Testphase*

Abbildung 53 gibt eine noch detaillierte Übersicht über die Temperaturentwicklung: Die linke Grafik (Abb. 58 (a)) zeigt die Temperaturentwicklung, wie sie über 2 Tage von jedem der 4 Temperaturelemente gemessen wurde, einschließlich der Belastungszeit durch den MLS10. Man sieht gut, wie die Belagstemperatur durch die Belastung ansteigt, wobei der Anstieg in allen gemessenen Tiefen gleich ist. Im Gegensatz dazu, ist in (Abb. 58 (b) die Aufheizung des Belags durch das Sonnenlicht über einen Tag dargestellt, Hier nimmt die Temperatur nach der Mittagszeit deutlich zu und erreicht ihren Peak am späten Nachmittag. Anders als bei der Erwärmung durch die Überrollungen des MLS10 ist hier ein deutlicher Temperaturgradient zwischen Belagsoberflächen und tieferen Belagsschichten festzustellen.

a) b)

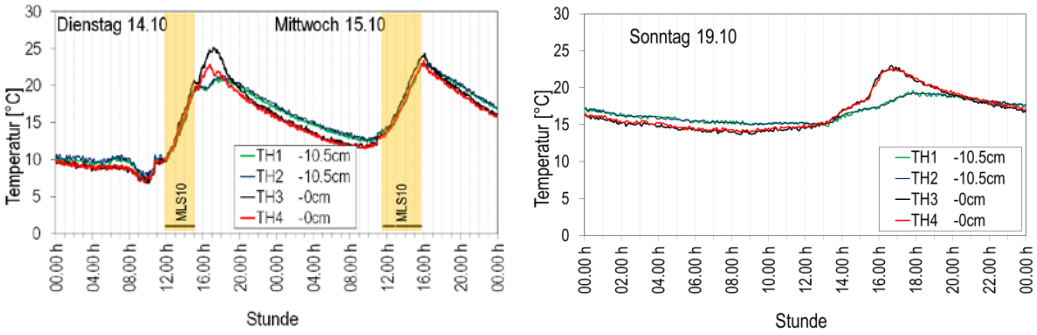


Abb. 58 *Detaillierte Ansicht des Temperaturverlaufs an verschiedenen Tagen, (a) Temperaturverteilung während zweier Tage während der Belastungszyklen. (b) Temperaturverteilung an einem Tag ohne Belastungszyklen.*

Die Temperatur hat einen großen Einfluss auf das Verformungsverhalten des Asphaltbelags unter Belastung. Als mittlere Temperatur während der Belastung wurde für Testfeld 1 14.7°C und für Testfeld 2 13.1°C ermittelt. Die Differenz von 1.5°C kann dabei als irrelevant angesehen werden. Allerdings, darf der geringe Unterschied der mittleren Temperaturen nicht darüber hinwegtäuschen, dass kurzzeitig aufgetretene hohe Temperaturen das Spurrinnenverhalten beeinflussen können. Deshalb wurden zwischen jedem Lastunterbruch die mittleren, minimalen und maximalen Temperaturen bestimmt. Eine grafische Darstellung findet sich in Abb. 59.

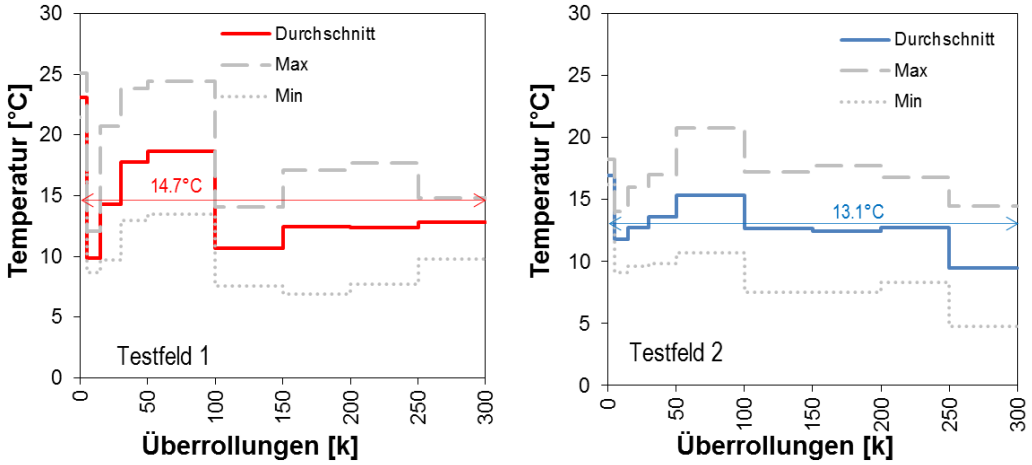


Abb. 59 *Durchschnittliche Temperatur während der Belastung Testfeldern 1 und 2.*

In Abb. 60 ist die Häufigkeitsverteilung der Temperatur in Temperaturintervallen von 1°C für jedes der beiden Testfelder dargestellt. Auch wenn aus der Grafik ersichtlich ist, dass die Belastungszyklen im Testfeld 1 teilweise bei Temperaturen von mehr als 21°C aufgebracht wurden, ist der Modalwert (Temperaturwert, der am häufigsten vorkommt) für beiden Testfeldern gleich und korrespondiert mit der Intervallklasse von 13°C bis 14°C.

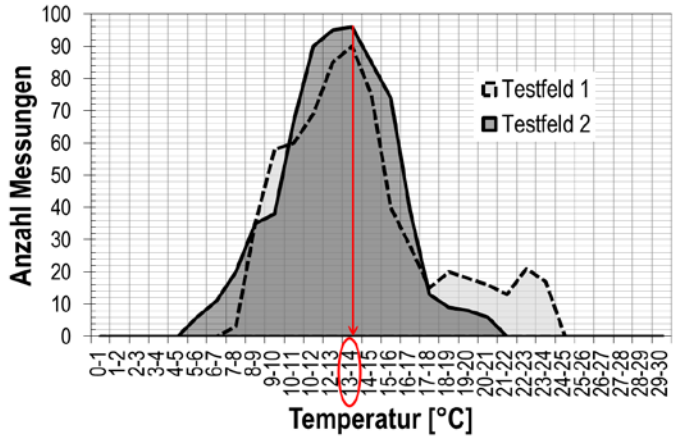


Abb. 60 *Häufigkeitsverteilung der Temperatur in den Testfeldern*

6.2 Spurrinnenbildung

In Abb. 61 und Abb. 62 sind die Spurrinnenbildung in Abhängigkeit der aufgebrachten Belastungszyklen und die Spurrinnentiefe nach Ende der Belastungszyklen mit Angabe der mittleren Temperatur für alle Systeme dargestellt. Anhang I zeigt zusätzlich detailliert die in den einzelnen Versuchsfeldern gemessene Spurrinnenbildung für die verschiedenen Systeme.

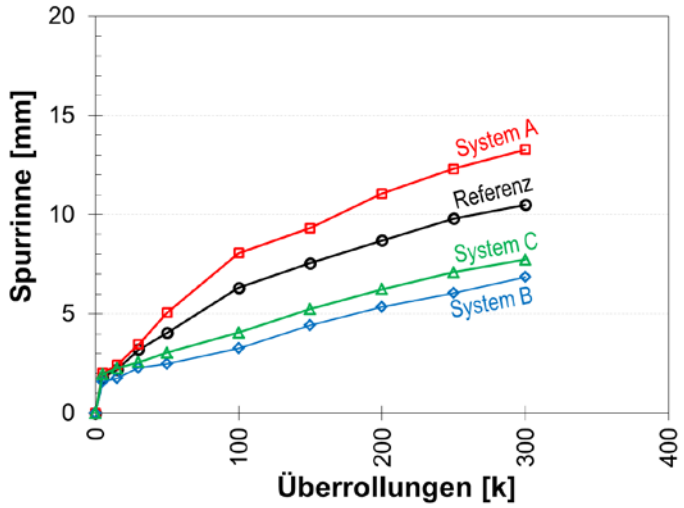


Abb. 61 *Spurrinnenbildung aller Systeme und Testfelder im Vergleich*

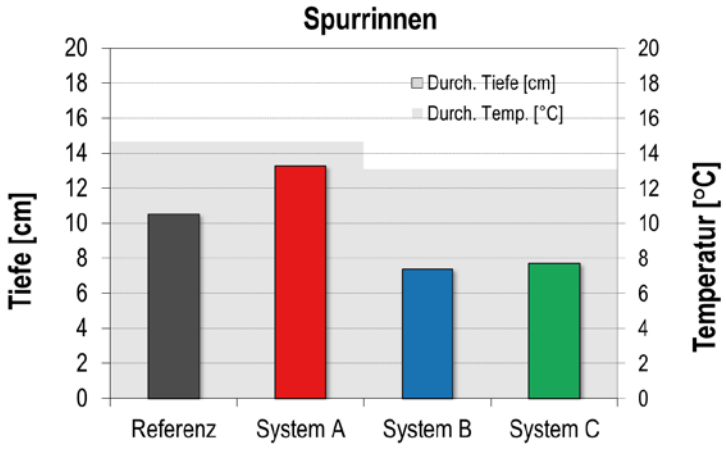


Abb. 62 *Spurrinnen aller Systeme und Testfelder in Vergleich*

Beim Vergleich der Spurrinnenbildung zwischen den beiden Testfeldern, zeigt sich, dass die Spurrinnenbildung im Testfeld 1 größer ist als im Testfeld 2. Ein Teil dieser größeren Spurrinnenbildung kann dem Temperaturunterschied zwischen den beiden Feldern angelastet werden. Demgegenüber zeigt der Vergleich der Referenz und des A, dass die Spurrinnenbildung in letztem höher ist, obwohl die Temperatur für beide Systeme gleich war. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die Asphalteinlage mit SAMI sich kontraproduktiv auswirkt und zu einer größeren Spurrinnentiefe führt als das Referenzsystem.

6.3 Risse an der Oberfläche

Anhand einer visuellen Beurteilung wurde die sich ergebende Rissbildung in den einzelnen Versuchsfeldern analysiert. Abb. 63 und Abb. 64 geben einen Überblick über die Risse am Ende der Belastungszyklen. Die Fotos veranschaulichen das Aussehen der Risse nach Abschluss der Belastungszyklen: Die Risse mit Breiten < 1mm waren sehr schwer zu erkennen und konnten oft nur mit Hilfe von Feuchtigkeit sichtbar gemacht werden.

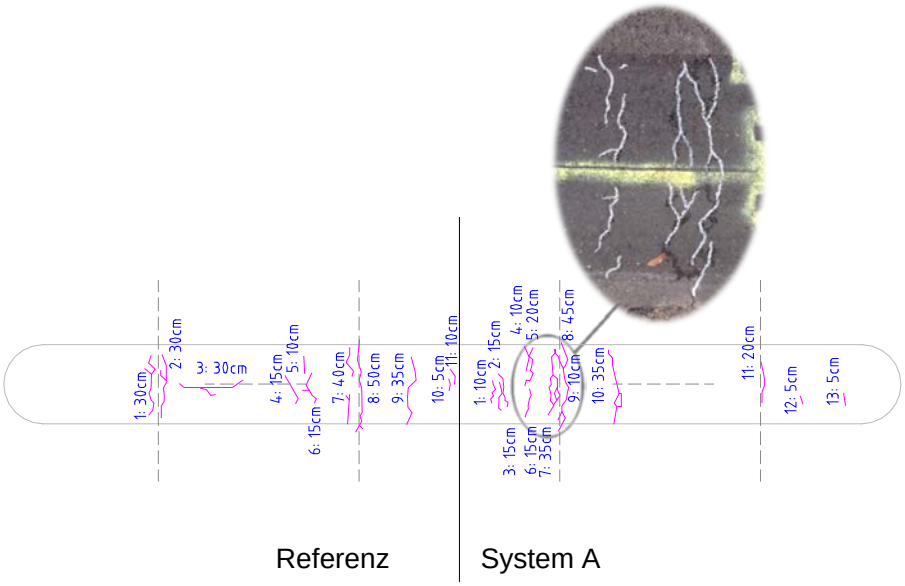


Abb. 63 Rissverteilung im Testfeld 1

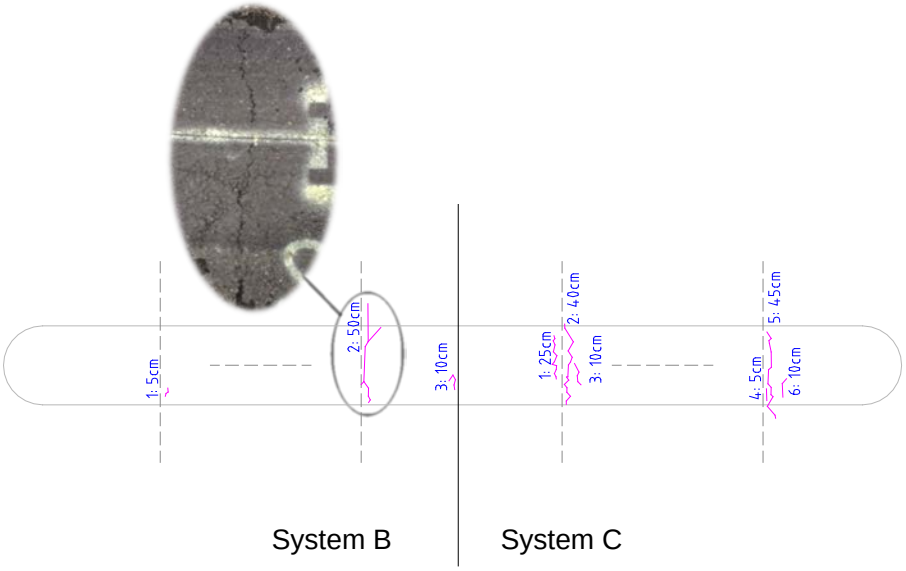


Abb. 64 Rissverteilung im Testfeld 2

Die Entstehung und Entwicklung von Rissen war unterschiedlich im Referenzfeld im Vergleich mit den Versuchsfeldern mit Bewehrung. Die ersten Risse an der Oberfläche waren, wie aus Abb. 65. ersichtlich, nach 130‘000 Überrollungen in der Referenz Versuchsfeld und nach 300‘000 Überrollungen in den Systemen A, B und C sichtbar. Das bedeutet, dass bei den Systemen mit Asphaltbewehrung die Risse erst nach fast doppelt so vielen Belastungszyklen an der Belagsoberfläche sichtbar sind. Die Risse treten größtenteils in Querrichtung auf. Nur im Referenzfeld bildete sich ein Längsriss (vgl. Abb. 63).
Auch war die Anzahl Risse nach Abschluss der Belastungszyklen, wie Abb. 65 zeigt, zumindest in Systemen B und C deutlich geringer. Im System C Versuchsfeld sind keine Risse in der Fahrrichtung. Die Länge der Risse sind deutlich weniger in System B und System C.
Wie bereits oben erwähnt, sind die Risse sehr schmal (weniger als 1mm breit) und ließen sich oft nur mit Hilfe von Wasser sichtbar machen. Wie später in Kapitel 7.4 festgestellt wurde, handelt es sich bei diesen Risse um von der Belagsoberfläche ausgehende Risse

(Top-Down Risse) und auch wenn sie vor allem an den Stellen mit künstlichen Rissen auftraten, haltet es sich entgegen einer ersten Vermutung, nicht um Reflektionsrisse.

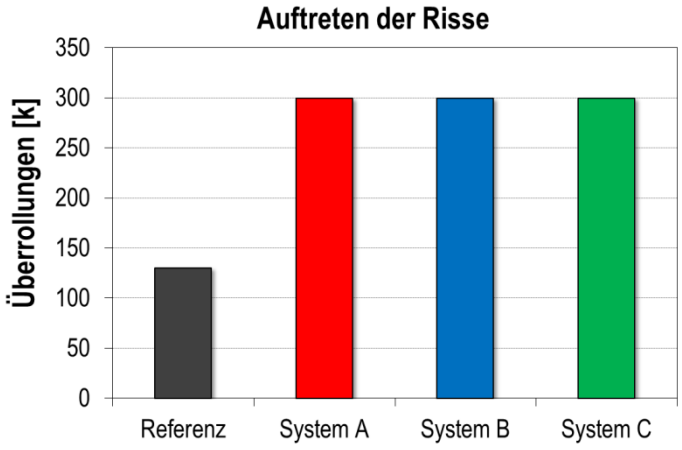


Abb. 65 Anzahl Überrollungen beim Auftreten erster Risse

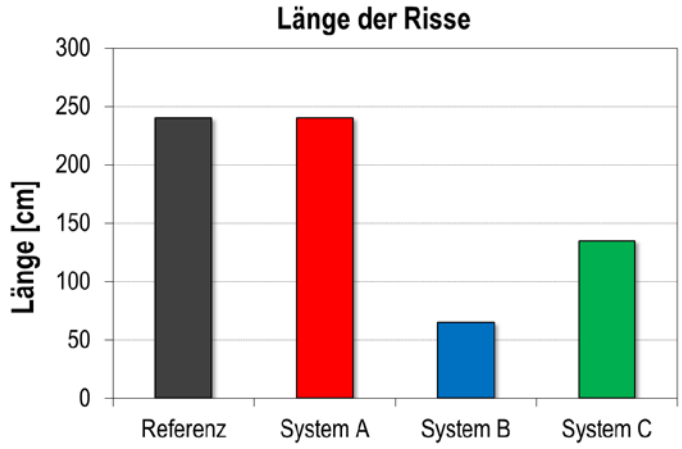


Abb. 66 *Länge der Risse am Ende der Belastungsphase*

6.4 Dehnungen im Belag

Von den eingebauten Sensoren wurde Sensor D6 durch den Belagseinbau geschädigt und konnte somit für eine Analyse nicht herangezogen werden. Weiterhin lieferten 2 der 8 Kanäle des Datenerfassungssystems DAQ fehlerhaften Output, womit nur noch 6 Kanäle für 8 Sensoren übrig blieben. Somit wurden die letzten beiden Kanäle des Messsystems DAQ abwechslungsweise für die Aufnahme von 4 Sensoren benutzt, was die Datenmenge dieser Sensoren deutlich reduzierte.

Die in Abb. 67 dargestellten Messplots zeigen die Dehnungsmessungen zu Beginn der Belastungsphase. Jeder Plot hat eine Länge von 3 Sekunden, also lange genug, um die durch die vier MLS10 Räder verursachten Dehnungspeaks zu sehen. Jeder Plot ist zudem mit dem Zeitpunkt der Messerfassung, der Temperatur des Belags und der abgeschätzten Anzahl Überrollungen versehen. Jede Messkurve ist zudem mit der Systembezeichnung und der DMS Nummer bezeichnet. Die linke Reihe der Plots zeigt die im Testfeld 1, die rechte Seite die im Testfeld 2 aufgezeichneten Messungen, was einen direkten Vergleich der jeweiligen Systeme erlaubt. Zuoberst findet sich ein Schema

der Position der DMS im Belag. Abb. 68 ist vergleichbar aufgebaut und zeigt aber die Dehnungen am Ende der Belastungsphase.

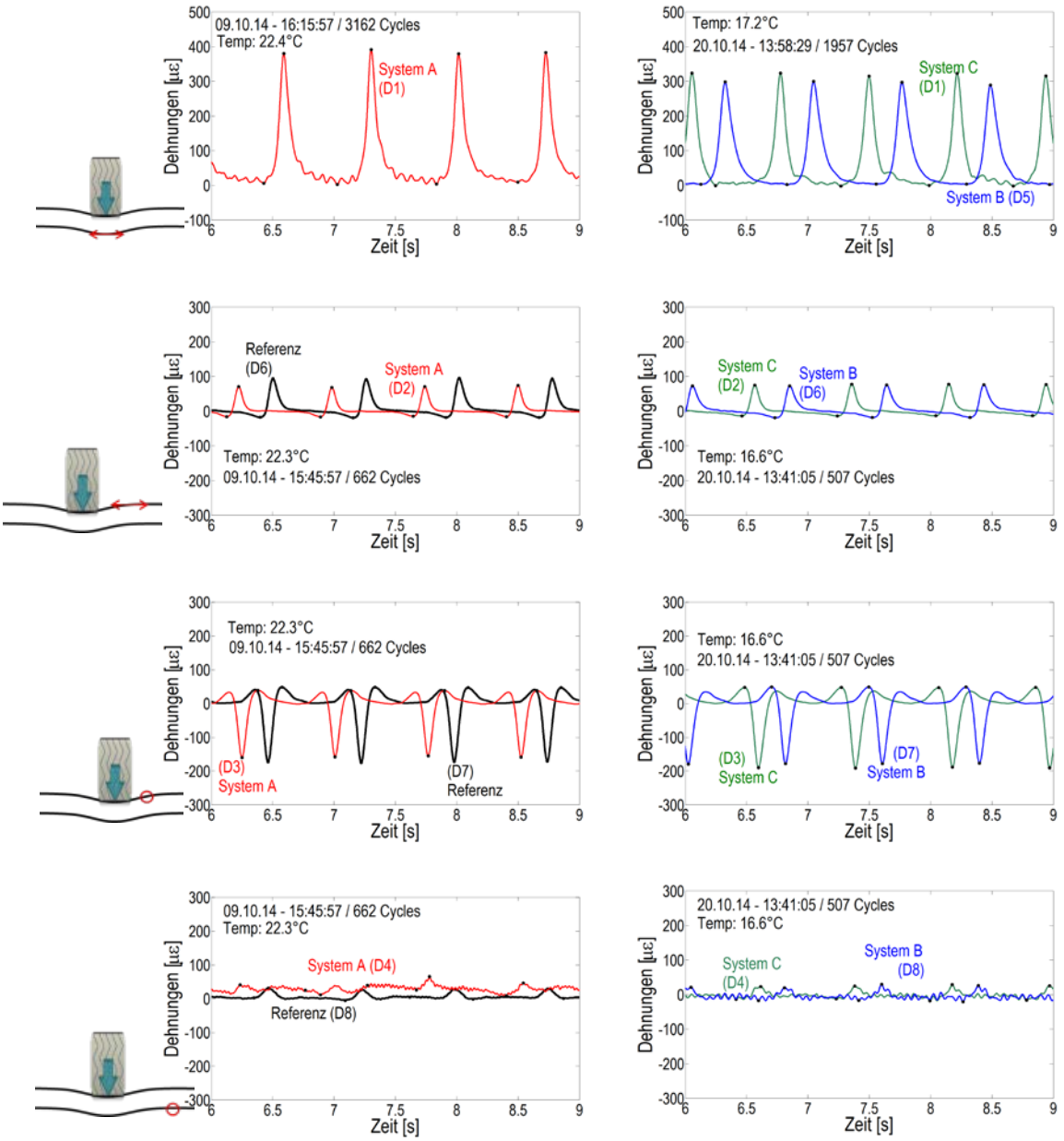


Abb. 67 *Dehnungen einer Überrollung am Anfang Belastungsphase für beide Versuchsfelder*

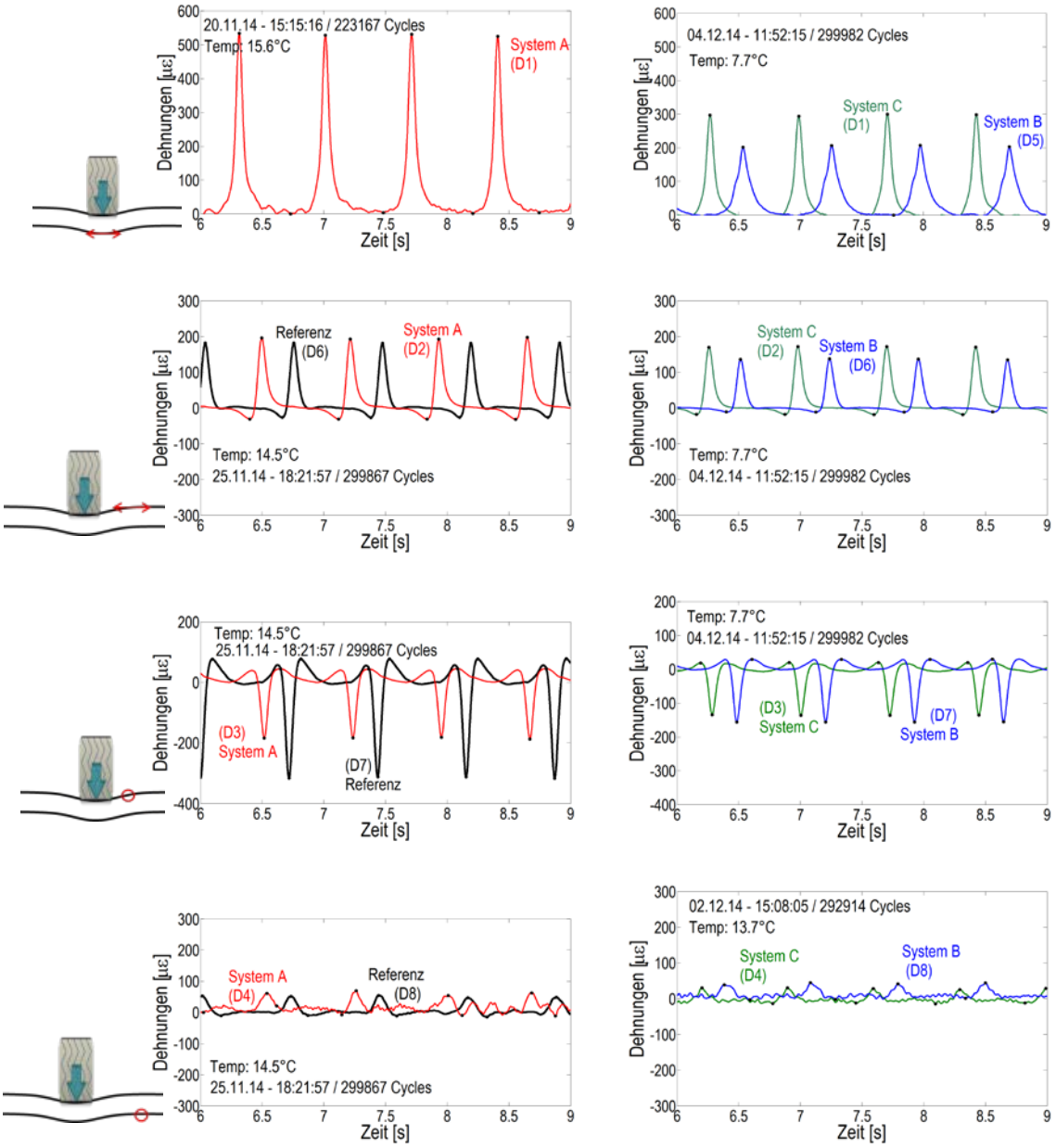


Abb. 68 *Dehnungen einer Überrollung am Ende der Belastungsphase für beide Versuchsfelder*

Auf den ersten Blick zeigen die Messkurven logisch erscheinende und übereinstimmende Formen:

- DMS D1/D5, direkt unter dem Rad und lotrecht zur Fahrrichtung befindlich, zeigen in allen Feldern reine Zugmaxima.
- DMS D2/D6 in der Fahrbahnoberfläche, aber neben dem Rad befindlich, messen Dehnungen senkrecht zur Fahrrichtungen und zeigen kleine Druckmaxima gefolgt von großen Zugmaxima.
- DMS D3/ D8 direkt auf der Fahrbahnoberfläche, neben dem Rad befindlich, misst Dehnungen in Fahrrichtung und zeigt 3 Maxima: Zug-Druck-Zug., wobei die Druckmaxima die vergleichsweise die bedeutendsten sind.
- DMS D4/D8 zwischen der ungebundenen Fundationsschicht und den Asphaltschichten, halbseitig in der Radspur befindlich, zeigt kleine Zugmaxima.

Abb. 69 zeigt, wie in Kapitel 5.4.2 erläutert, die berechneten Dehnungsamplitude unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Differenz zwischen den Peaks über den ganzen

Zeitraum der Belastungsphase. In der gleichen Abbildung ist außerdem die Temperatur über der Anzahl Überrollungen aufgetragen.

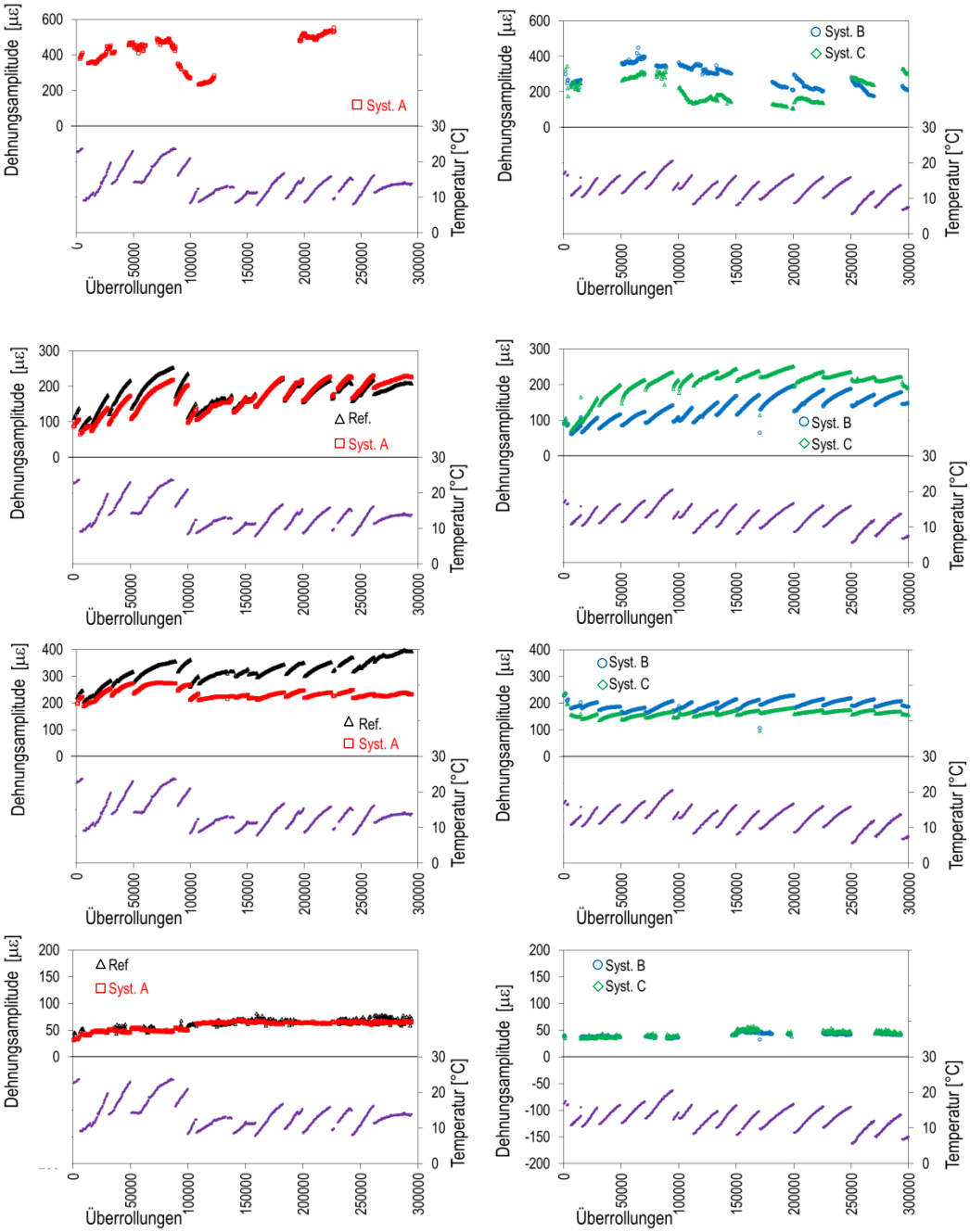


Abb. 69 *Dehnungsamplituden und Temperaturen über die gesamte Belastungsphase*

Abb. 68 zeigt dieselben Dehnungsamplituden wie die vorherige Abbildung aber für eine Temperatur zwischen 13°C und 14°C, wodurch ein temperaturbereinigter Vergleich ermöglicht wird.

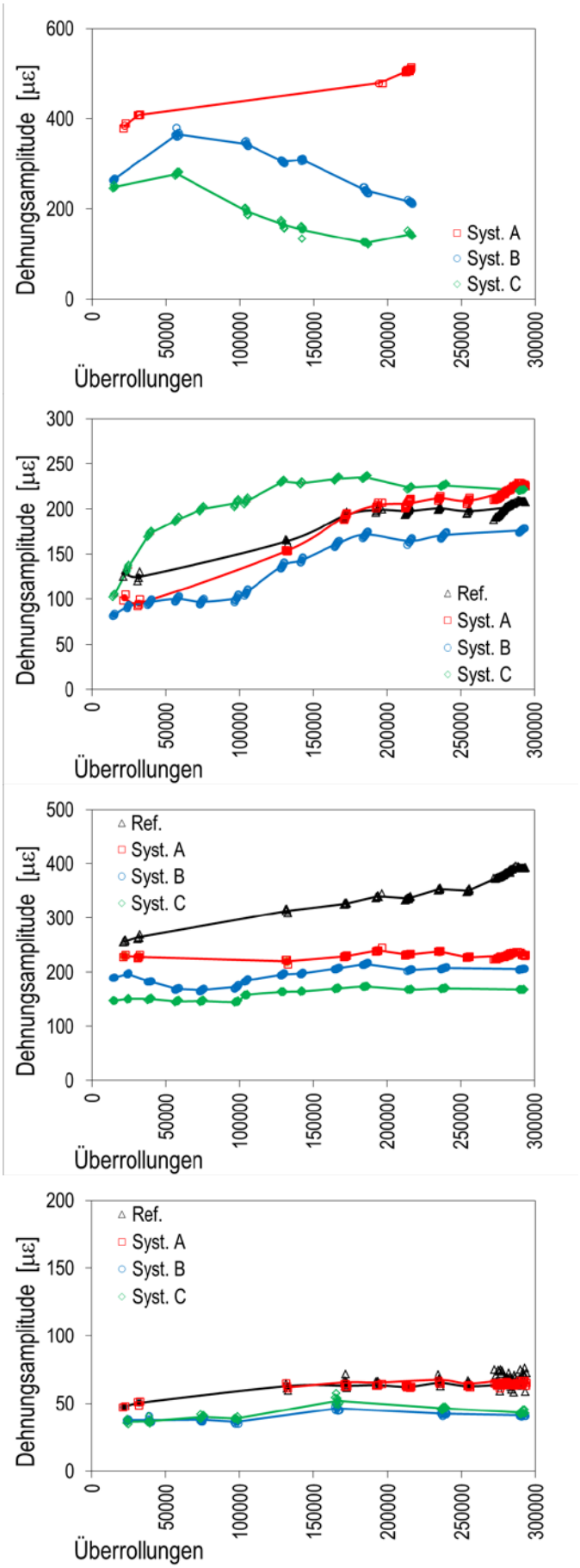


Abb. 70 *Dehnungsamplituden über die gesamte Belastungsphase bei einer Temperatur zwischen 13°C und 14°C*

In der Regel nehmen alle Dehnungen mit der Anzahl der Überrollungen zu, was als Abnahme der Steifigkeit der Struktur mit der Belastung interpretiert werden kann. Einzigen für DMS D1 und D5 im Testfeld 2, die quer zur Fahrtrichtung und bei -10.5cm eingebaut sind, stellt man eine Abnahme der Dehnungen fest, wobei berücksichtigt werden muss, dass Verdichtung oder Risse großen Einfluss auf die lokale Dehnungen haben können. In der Regel sind die Dehnungen in Referenzfeld (unbewehrtes System) am grössten.

6.5 Dynamische Beschleunigungsmessungen

Die in Abb. 71 dargestellten Messplots zeigen die Beschleunigungsmessungen am Ende der Belastungsphase. Jeder Plot hat eine Länge von 3 Sekunden, also lange genug, um die durch die vier MLS10 Räder verursachten Dehnungspeaks zu sehen. Jeder Plot ist mit dem Zeitpunkt der Messerfassung, der Temperatur des Belags und der abgeschätzten Anzahl Überrollungen versehen. Jede Messkurve ist zudem mit der Systembezeichnung und der Beschleunigung Nummer bezeichnet. Die linke Reihe der Plots zeigt die im Testfeld 1, die rechte Seite die im Testfeld 2 aufgezeichneten Messungen, was einen direkten Vergleich der jeweiligen Systeme erlaubt.

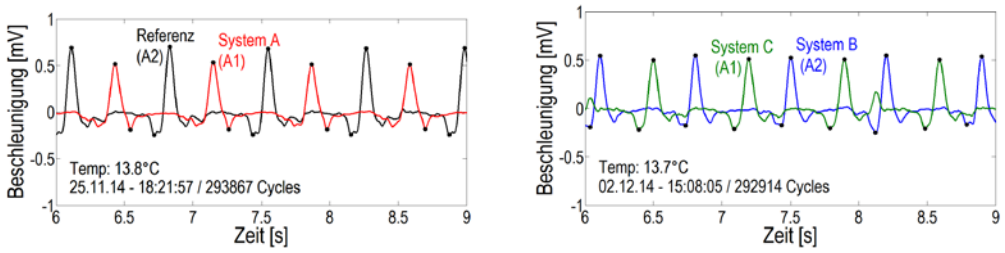


Abb. 71 *Beschleunigung für vier Überrollungen am Ende der Belastungsphase für beide Versuchsfelder*

Abb. 72 zeigt, wie in Kapitel 5.4.2 erläutert, die berechneten Dehnungsamplitude unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Differenz zwischen den Peaks über den ganzen Zeitraum der Belastungsphase. In der gleichen Abbildung ist außerdem die Temperatur über der Anzahl Überrollungen aufgetragen.

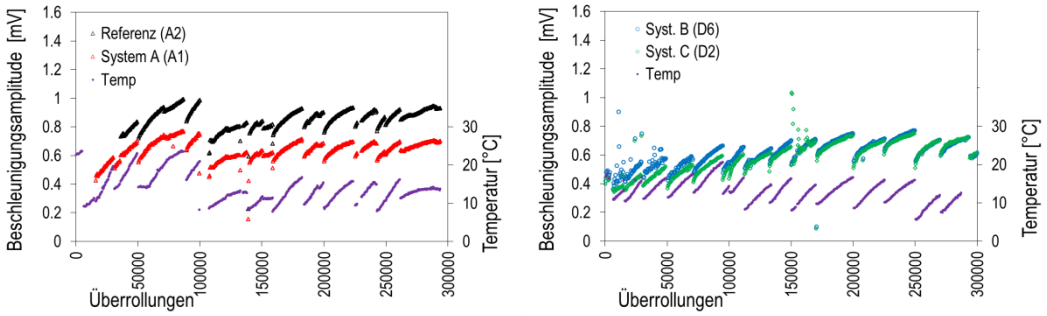


Abb. 72 *Beschleunigungsamplituden und Temperaturen über die gesamte Belastungsphase*

Abb. 73 zeigt dieselben Beschleunigungsamplituden wie die vorherige Abbildung aber für eine Temperatur zwischen 13°C und 14°C, wodurch ein temperaturbereinigten Vergleich ermöglicht wird.

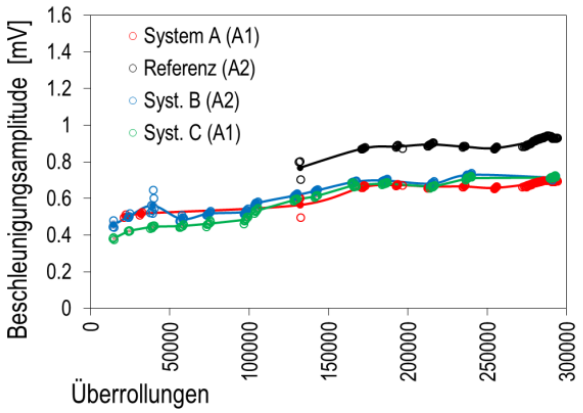


Abb. 73 *Beschleunigungsamplituden bei verschiedenen Anzahl Überrollungen. bei einer Temperatur zwischen13°C und 14°C*

Man erkennt, dass die Beschleunigungen im Referenz Versuchsfeld am grössten ist. Das zeigt, dass der Belag mit Bewehrung steifer als derjenige ohne Bewehrung ist. Die Beschleunigung nimmt mit der Anzahl der Überrollungen zu, was bedeutet, dass die Steifigkeit aller Beläge abnimmt.

6.6 Falling Weight Deflectometer (FWD)

FWD Messungen wurden nach Abschluss der Belastungszyklen durchgeführt. Abb. 74 zeigt eine Ansicht der durch Messungen an den in Kapitel 5.4.6. beschriebenen Messpunkten aufgezeichneten Deflektionen. Dunkle Farben bedeuten größere Deflektionen, hellere Farben kleinere Deflektion, gemäß des seitlich dargestellten Farbschemas. Die Konturlinien der Oberflächentemperatur sind ebenfalls eingezeichnet. Die Fahrspur des Verkehrslastsimulators und die künstlichen Schnitte in der AC T 22S Tragschicht sind ebenfalls in der Abbildung sichtbar.

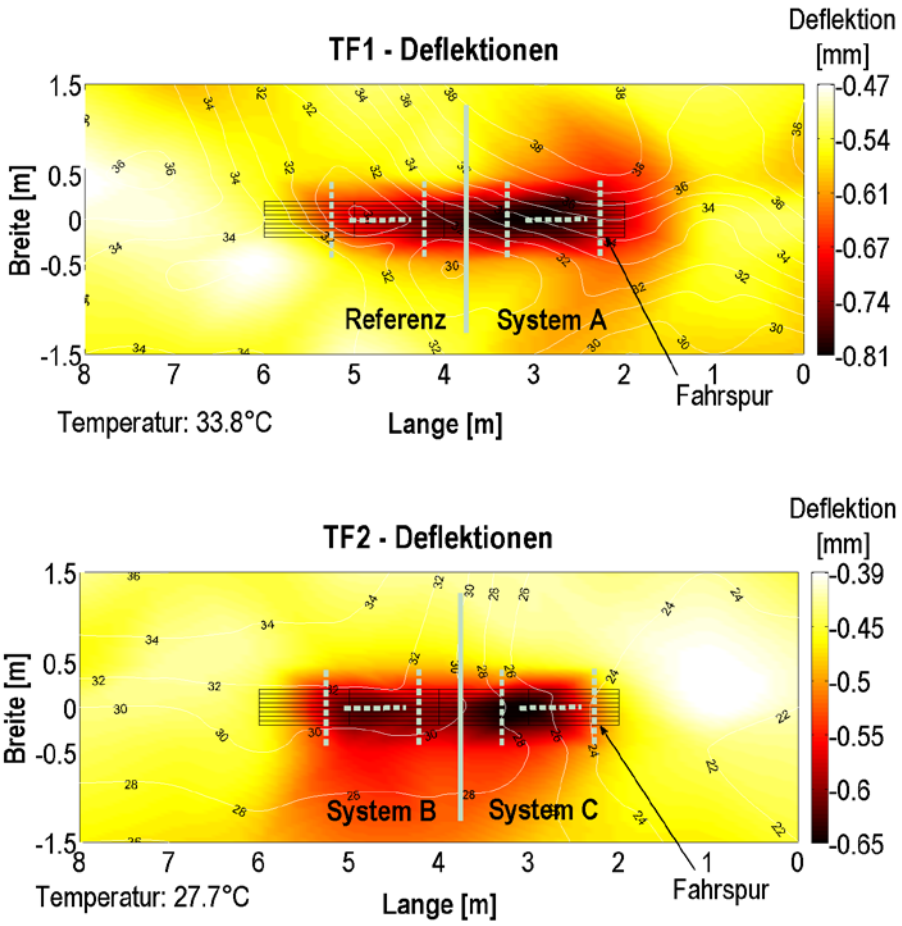


Abb. 74 *Ansicht der gemessenen Deflektionen in Testfeldern 1 und 2. Die Kontourlinien zeigen die Temperatur an der Belagsoberfläche*

Die Abbildung zeigt gut, dass die größten Deflektionen sich entlang der Radspur (Belastungsspur des MLS10) finden. Dies bedeutet, dass der Belag im belasteten Bereich schwächer ist, was einerseits auf die sich dort befindlichen künstlichen Risse und andererseits auf eine durch die Belastung hervorgerufene Ermüdung des Belags zurückzuführen ist. Die größten Deflektionen, aber auch die höchsten Temperaturen wurden dabei im Testfeld 1 gemessen.

Der elastische Modul jeder Belagsschicht wurde, wie in Kapitel 5.4.6 erklärt, aus der FWD Deflektionsmulde rückgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 75 in Form einer Matrix dargestellt. Die Abbildung ist dabei in 3 Reihen unterteilt, wobei jede Reihe dem Modul einer Schicht entspricht. Jede Zelle der Matrix entspricht einem Messpunkt und enthält den Wert des rückgerechneten Moduls. Zur besseren Übersicht sind kleinere Module mit hellerem, höherem Module mit dunklerer Schattierung dargestellt.

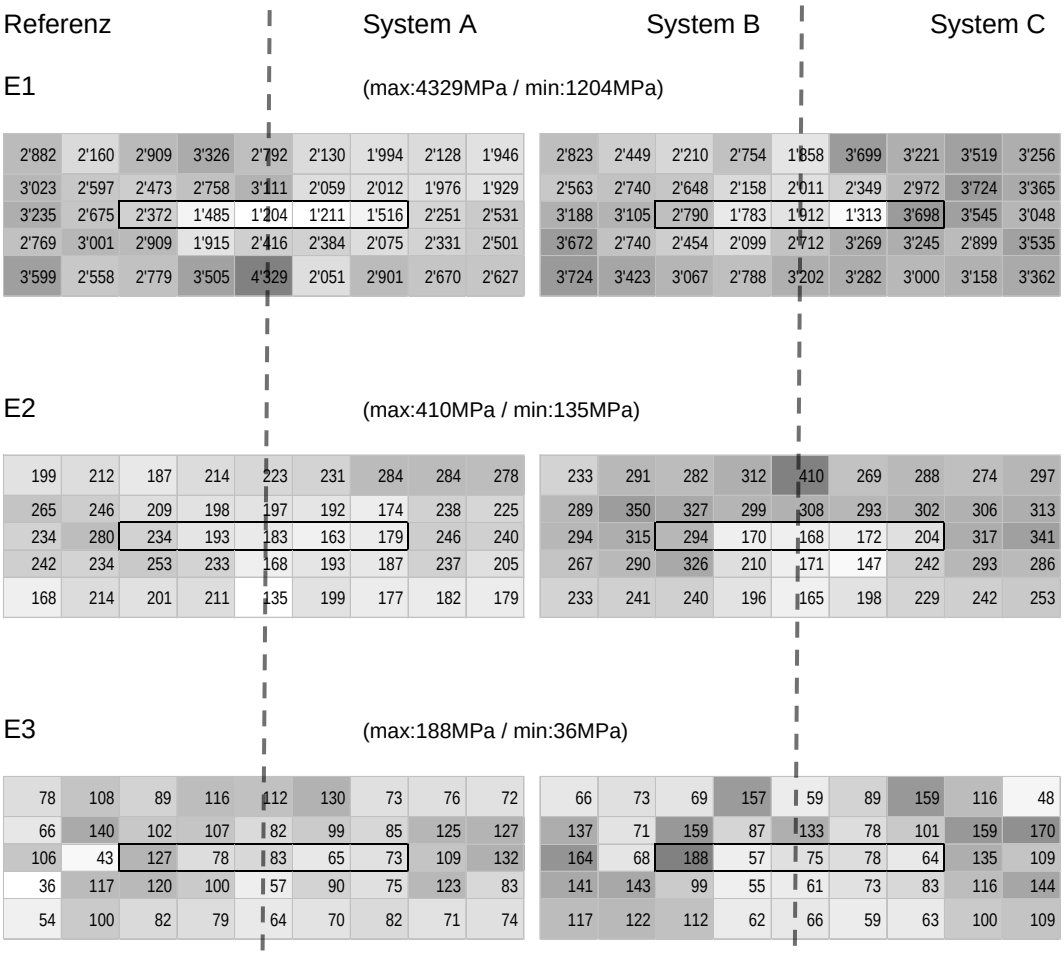


Abb. 75 *Rückgerechneter (backcalculated) elastischer Modul in [MPa]*

Der elastische Modul der Asphaltschichten besitzt die niedrigsten Werte in der Radspur, was beweist, dass die Schichten an dieser Stelle schwächer sind. Die Module der ungebundenen Schicht und der Fundation zeigen dagegen kaum Unterschiede zwischen belasteten und unbelasteten Bereichen. Zur besseren Visualisierung enthält der Anhang V die auf den maximalen Wert normalisierten Temperaturen, Deflektionen und elastische Module.

6.7 Benkelman-Balken Messungen

In Abb. 76 und Abb. 76 sind die sich aus der Benkelman-Balken-Messung ergebenden Verformungen aller Systeme im Vergleich zur Referenz im belasteten und unbelasteten Zustand einzeln bzw. zusammenfassend dargestellt. Diese Messungen zeigen kleinere Verformungen für die Versuchsfelder mit Bewehrung (Systeme A, B und C), was bedeutet, dass der Belag mit Bewehrung wie zu erwarten steifer ist als derjenige ohne Bewehrung. Weiterhin wird deutlich, dass die Steifigkeit in allen Versuchsfeldern durch die Belastung zunimmt.

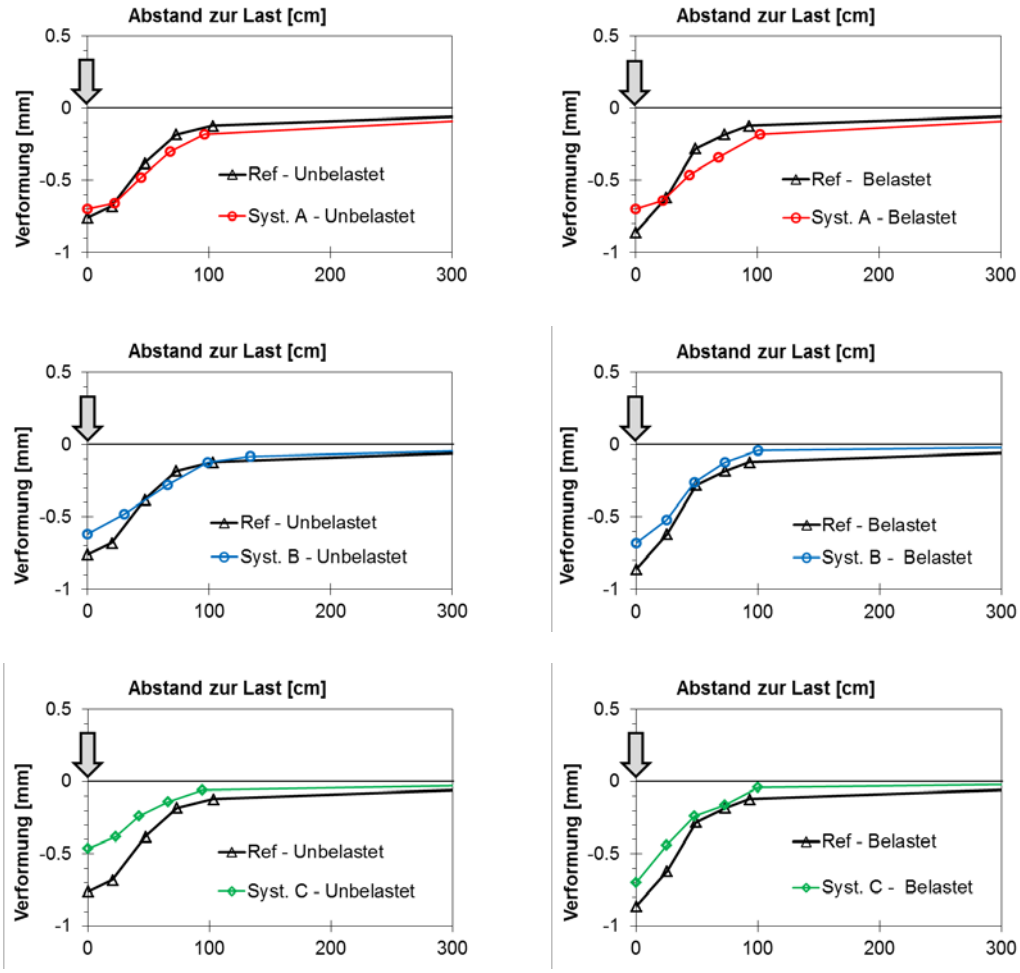


Abb. 76 *Verformungen der einzelnen Systeme im Vergleich mit der Referenz*

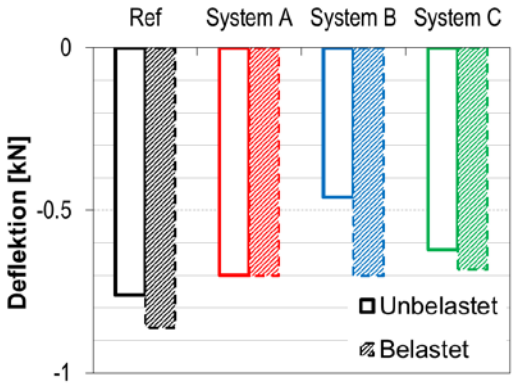


Abb. 77 *Vergleich der Verformungen aller Systeme*

7 Untersuchungen an Bohrkernen

Nach Abschluss der MLS10 Belastung und nach der Durchführung aller zerstörungsfreien Prüfungen wurden mehrere Bohrkerne von 100mm und 150mm Durchmesser in der Fahrspur (befahrener Bereich) und ausserhalb der Fahrspur (unbefahrener Bereich) zur Durchführung verschiedener Laboruntersuchungen entnommen. Zusätzlich wurden 400mm Bohrungen gemacht, um Messungen auf dem ungebundenen Gemisch mit dem Leichten Fall Gewicht (LFG) durchführen zu können, was aber wegen der hohen Steifigkeit des Untergrundes nicht möglich war. So wurden die 4 großen Bohrkerne (Ø 400mm) für eine visuelle Beurteilung (forensische Untersuchung) verwendet. Die Entnahme- bzw. Bohrpläne für beide Testfelder sind in Abb. 78 und Abb. 79 dargestellt.

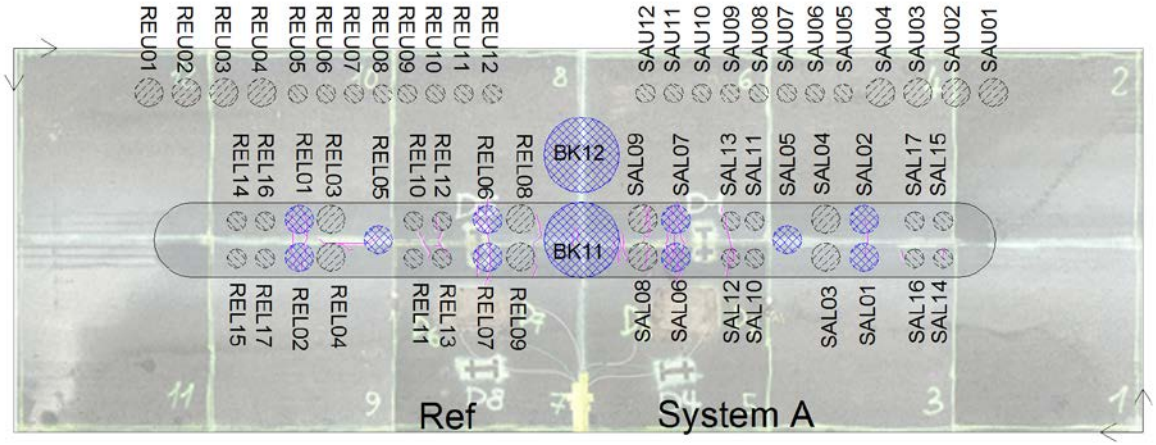


***Abb. 78** Entnahmeplan Testfeld 1*

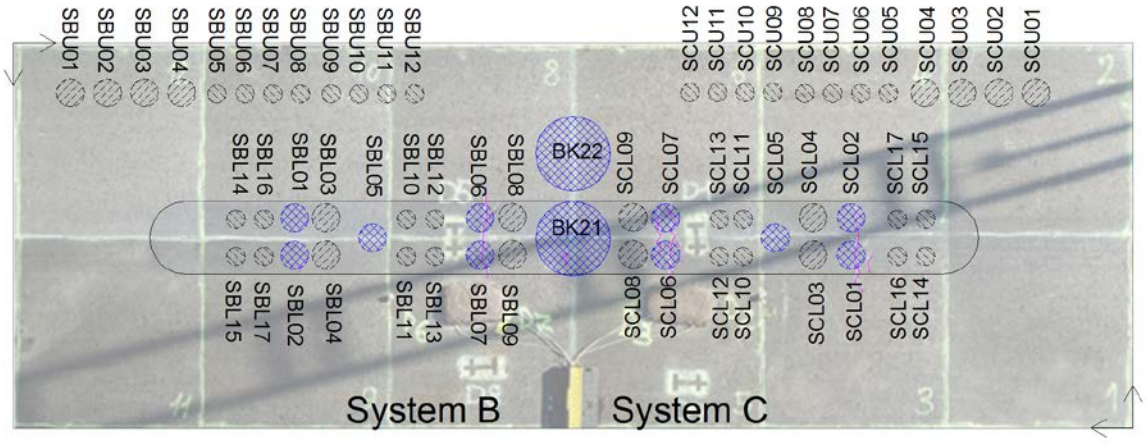


***Abb. 79** Entnahmeplan Testfeld 2*

Kapitel 7.1 und 7.2 zeigen die Ergebnisse von zu Kontrollenzwecken durchgeführten Materialuntersuchungen. Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150mm wurden zur Bestimmung des Schichtenverbunds unter realen Bedingungen verwendet. Die kleineren Bohrkerne wurden zur Bestimmung der Schichtsteifigkeiten herangezogen, wobei jeweils Bohrkerne aus dem belasteten und dem unbelasteten Bereichen verglichen wurden. Die

grossen Bohrkerne (Durchmesser von 300mm) wurden letztendlich für eine forensische Untersuchung zur Feststellung von Schäden verwendet.

7.1 Materialuntersuchung an Bohrkernen

Zur Bestimmung der Materialeigenschaften der Deck- und Tragschicht wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Löslicher Bindemittelanteil SN 670 401, EN 12697-1 [14]
- Korngrößenverteilung SN 670 402, EN 12697-2 [15]
- Rohdichte Mischgut SN 670 405, EN 12697-5 [16]
- Bestimmen der Raumdichte, Berechnen des Hohlraumgehalts SN 670 406, EN 12697-6 [17]

Bei allen Untersuchungen handelt es sich um eine Doppelbestimmung. Die Untersuchungen wurden jeweils im belasteten und im unbelasteten Bereich durchgeführt.

Die Ergebnisse der Bindemittelanteil, Korngrossverteilung und Rohdichte sind in Tab. 4 und Abb. 80 und Abb. 81 und Abb. 82 dargestellt.

***Tab. 4** Ergebnisse der Bohrkernuntersuchung*

		Probe 1	**Probe 2**	**Mittelwert**
AC 11 S	Bindemittelanteil [%]	5.3	5.3	5.3
	Rohdichte [kg/m^3]	2.465	2.481	2.473
AC T 22S	Bindemittelanteil [%]	4.4	4.3	4.4
	Rohdichte [kg/m^3]	2.501	2.520	2.510

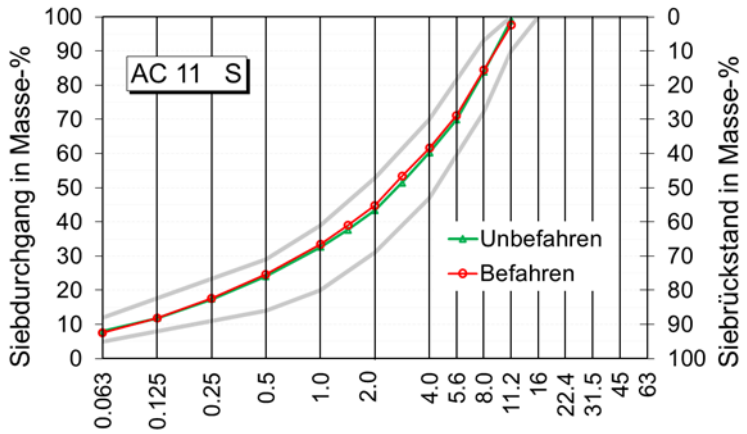


***Abb. 80** Korngrößenverteilung Deckschicht AC 11 S im unbefahrenen und befahrenen Bereich*

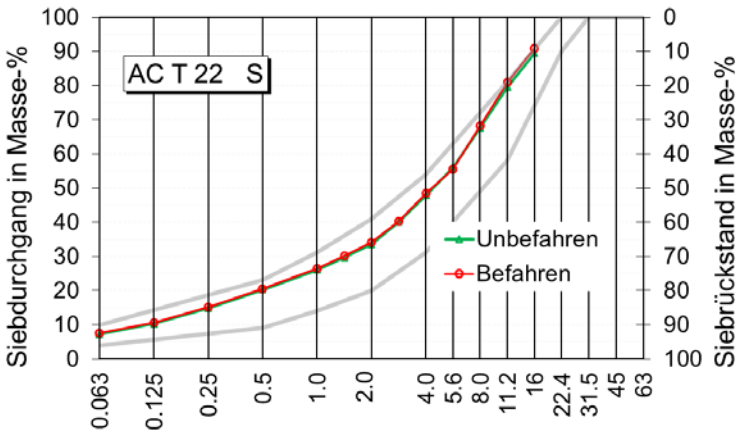


Abb. 81 *Korngrößenverteilung Tragschicht AC T 22S im unbefahrenen und befahrenen Bereich*

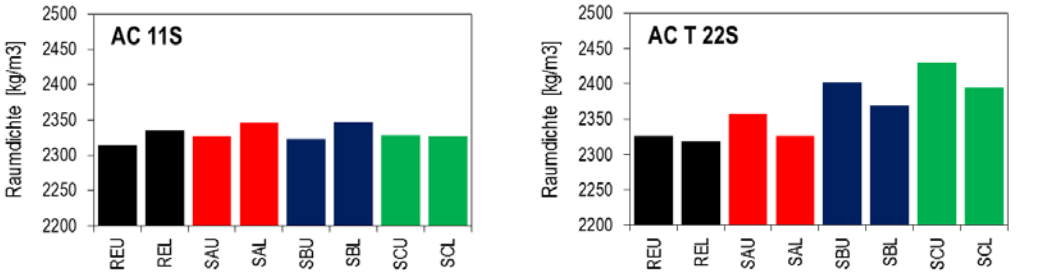


Abb. 82 *Raumdichte*

7.2 Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner

Für die Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner wurden jeweils 4 Bohrkerne mit Durchmesser 150mm aus dem unbelasteten und aus dem belasteten Bereichen jedes Systems entnommen und der Schichtenverbund zwischen Deck- und Tragschicht wie in Kapitel 3.3 beschrieben geprüft. Tab. 2 im Anhang III fasst die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper zusammen. Abb. 83 stellt die Kurven vom befahrenen und unbefahrenen Bereich für jeden Schichtverbund dar und Abb. 84 stellt die maximalen Werte zusammen.

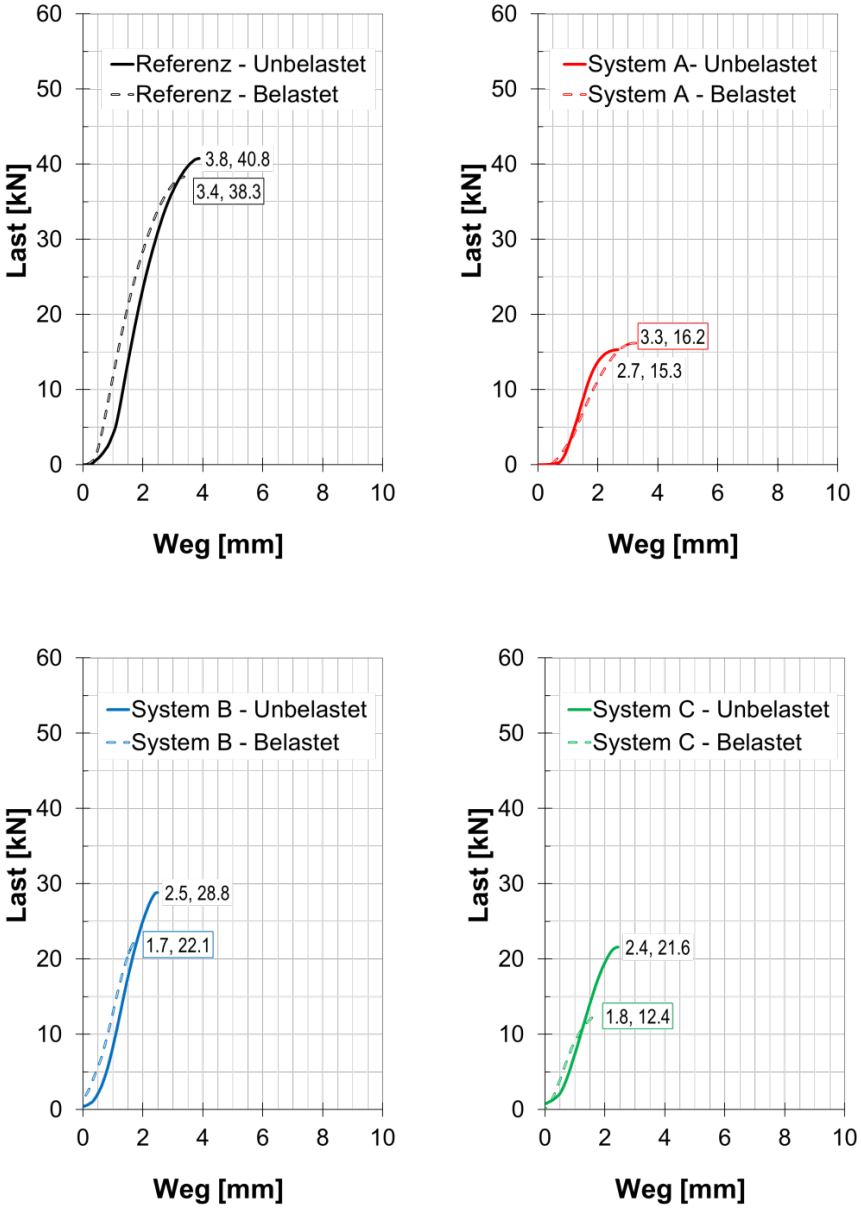


Abb. 83 *Ergebnisse der Schichthaftung zwischen Deckschicht AC 11 S und Tragschicht AC T 22S, Mittelwert aus je 4 Prüfkörpern (erster Wert: Weg [mm], 2. Wert: Kraft [kN]*

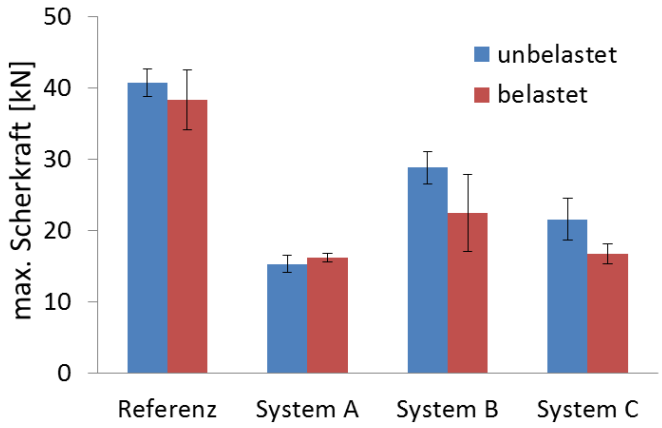


***Abb. 84** Ergebnisse der Schichthaftung zwischen Deckschicht AC 11S und Tragschicht AC T 22S, aus 8 Prüfkörpern*

Die Ergebnisse zeigen, dass Bewehrungseinlagen in situ eine Trennschicht darstellen, die zu einer Beeinträchtigung des Schichtenverbunds führt, der Schichtenverbund im Referenzfeld also die höchsten Werte erreicht. Die in den bewehrten Feldern gemessenen Mittelwerte erfüllen aber in allen Fällen (im Fall von System A allerdings nur knapp) den von der Schweizer Norm angegebenen Anforderungswert von 15kN zwischen Deck- und Tragschicht. Die niedrigsten Werte werden für System A erreicht, während Systeme B und C mit Werten über 20kN völlig problemlos erscheinen. Die Werte des Schichtenverbundes nehmen durch die Belastung ab, was wahrscheinlich auf die extrem kanalisierte Belastung durch den MLS10 zurückzuführen ist.

Vergleicht man die Schichthaftungswerte aus den in situ Testfeldern mit denjenigen aus den Laboruntersuchungen (siehe Abb. 85), so sieht man deutliche Unterschiede. Bleibt die maximale Scherkraft der Referenz nahezu unverändert, ist diejenige der bewehrten Systeme in situ deutlich niedriger. Allerdings bleibt das in den Laborversuchen ermittelte Ranking bestehen, so dass System B die höchsten und System A die niedrigsten Verbundwerte erreicht.

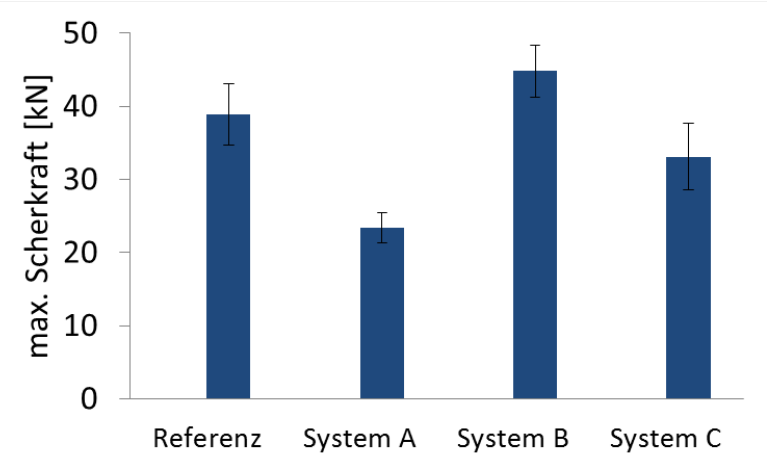


***Abb. 85** Ergebnisse der Schichthaftung in der Laborprüfung zwischen Deckschicht AC 11 S und Tragschicht AC T 22 N*

7.3 Modulbestimmung mit Spaltzugversuch

Der Steifigkeitsmodul wurde an Bohrkernen mit Hilfe des indirekten Zugversuchs nach der deutschen Prüfvorschrift AL-Sp-Asphalt 09 “Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgrosse in die Dimensionierung“ bestimmt [18]. Bei dieser Prüfung werden zylindrische Prüfkörper mit einer zyklischen Drucklast an diametral entgegengesetzten Stellen der Mantelfläche angebrachten Laststreifen belastet (Abb. 86). Während der Prüfung werden die Last und die Änderung der Verformung des Prüfkörpers in horizontaler Richtung gemessen und zur Berechnung verwendet.

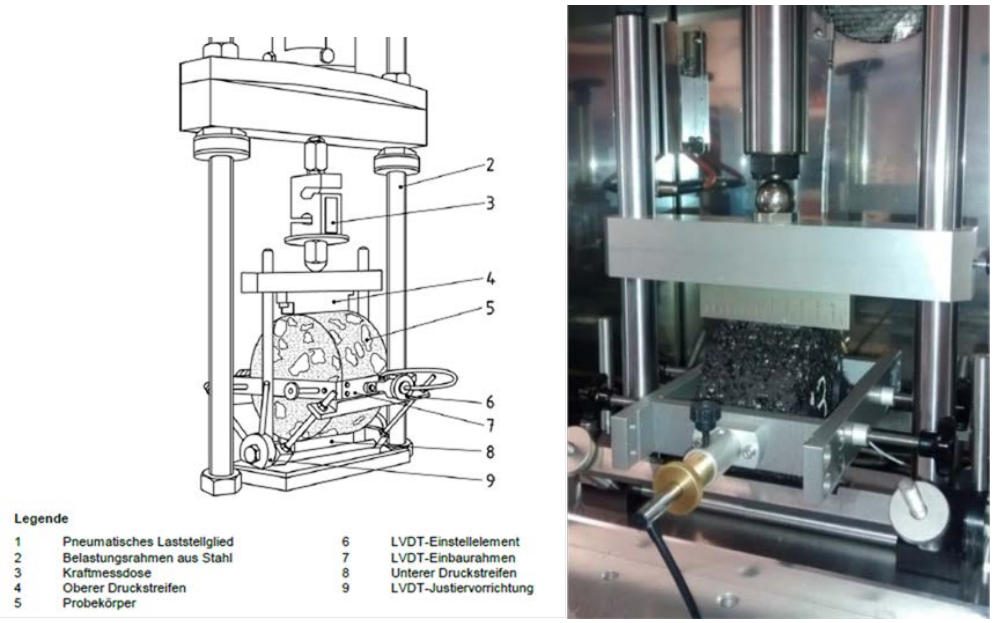


Abb. 86 *Prüfeinrichtung für den indirekten Zugversuch IT-CY gemäss AL-Sp-Asphalt 09 [18], links Schema, rechts Empa-Prüfeinrichtung*

Nach Norm werden mindestens 3 Prüfkörper zur Bestimmung des Steifigkeitsmoduls eines Materials verwendet. Die Last wird bei einer bestimmten Frequenz in Form einer kraftgesteuerten harmonischen Sinusschwingung ohne Ruhepausen aufgebracht. Die in diesem Versuch verwendeten Frequenzen und Temperaturen waren 10Hz, 1Hz und 0.1Hz sowie 5°C, 15°C und 25°C.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die aus den Schichten AC 11S und AC T 22S entnommenen Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100mm und einer der Schichtdicke entsprechenden Höhe verwendet. Die genauen Abmessungen und die Raumdichte wurden nach den europäischen Normen EN 12697-29 [19] und EN 12697-6 [17] bestimmt.

Die Ergebnisse der Steifigkeiten der einzelnen Prüfkörper und die Masterkurven für 20°C sind im Anhang IV dargestellt. Abb. 87 bis Abb. 90 zeigen einen Vergleich der jeweils gleichen Materialien im unbelasteten und im belasteten Zustand.

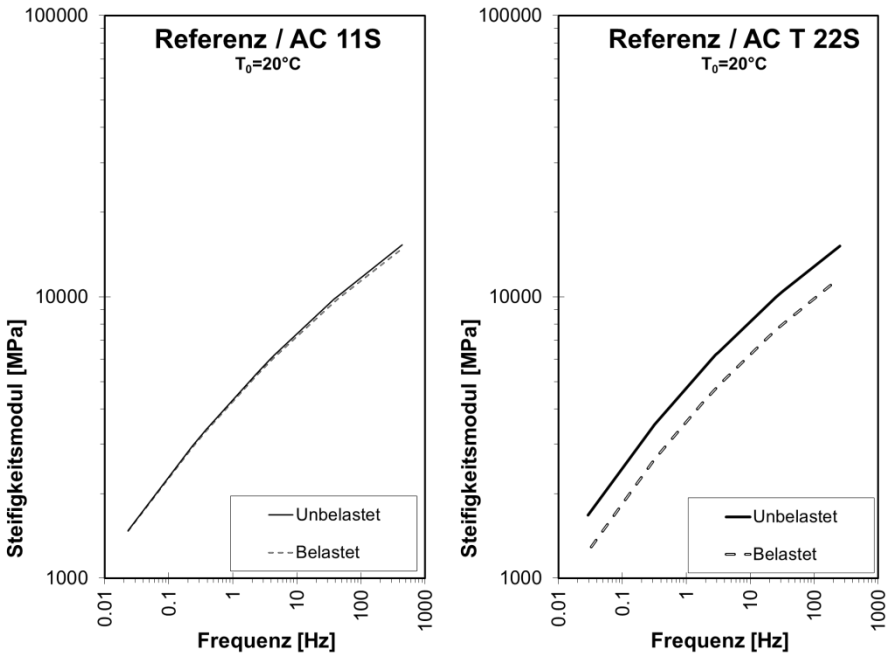


Abb. 87 *Masterkurven der Materialien der Schichten AC 11 S und AC T 22S im Referenz*

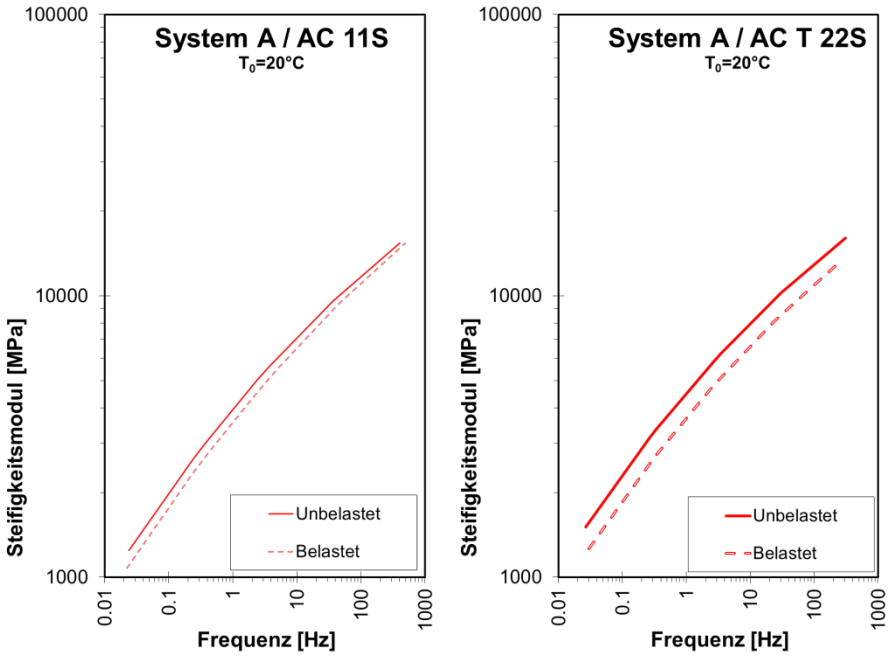


Abb. 88 *Masterkurven der Materialien der Schichten AC 11S und AC T 22S im System A*

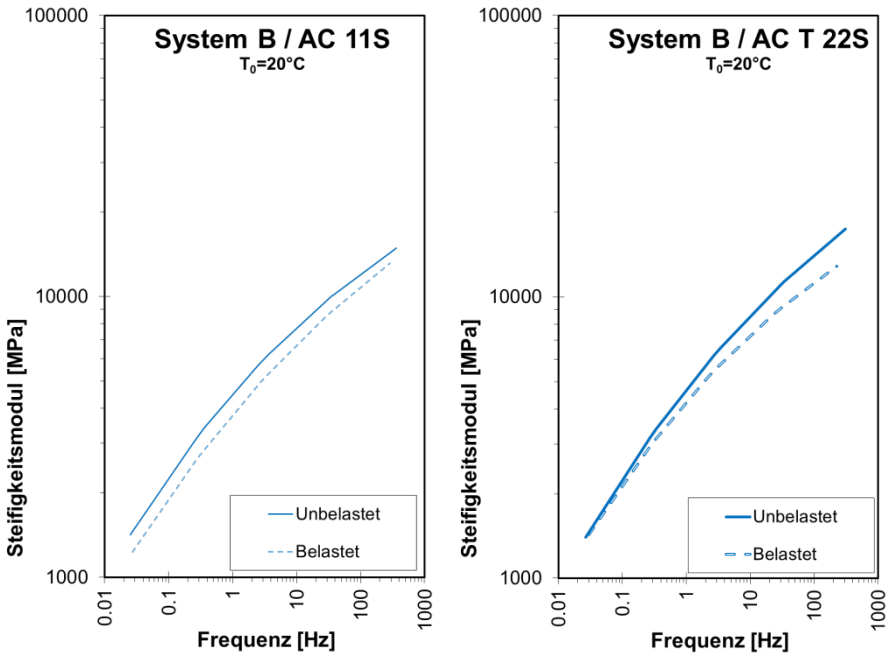


Abb. 89 *Masterkurven der Materialien der Schichten AC 11S und AC T 22S im System B*

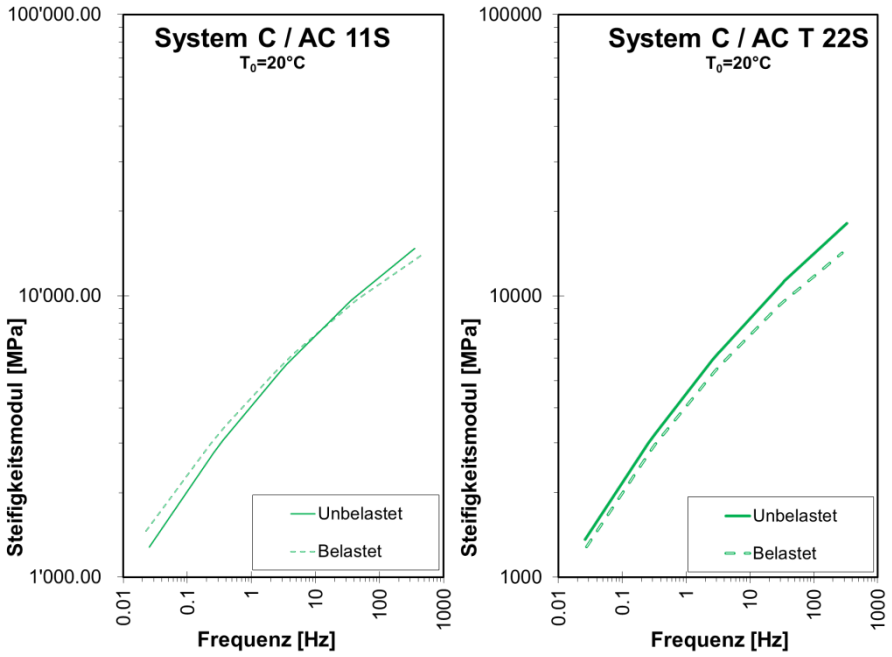


Abb. 90 *Masterkurven der Materialien der Schichten AC 11S und AC T 22S im System C*

Wie ein Vergleich der Kurven zeigt, weisen die Prüfkörper aus den Systemen A und B lediglich eine kleine Abnahme der Steifigkeit auf. Dagegen besitzen die aus dem belasteten Bereichen der Tragschicht AC T 22 dieser Systeme entnommenen Prüfkörper geringere Steifigkeiten als die aus den unbelasteten Bereichen entnommenen. Der größte Unterschied wurde dabei an den aus dem Referenzsystem entnommenen Prüfkörpern festgestellt. Diese Beobachtungen können mit der im nächsten Kapitel

beschriebenen Entstehung von Rissen an der Belagsunterseite in Zusammenhang gebracht werden.

7.4 Forensische Untersuchung

Die visuelle Untersuchung der Bohrkerne ergab, dass unter der Fahrspur das gesamte Asphaltpaket ohne wesentliche Dickenänderung in die Fundationsschicht aus ungebundenem Gemisch durchgestanzt wurde. Der Grund hierfür könnte in der tiefenwirkenden, hohen repetitiven Belastung des MLS10 liegen, welche eine verminderte Rückfederung des Belags hervorruft.

Die bereits bei der visuellen Begutachtung des Belags in der Fahrspur festgestellten Risse (Abb. 63 und Abb. 64) sind nur wenige Millimeter tief (Abb. 91). Weiterhin waren an der Unterseite des Asphaltbelags weitere Risse sichtbar (Abb. 92). Diese Risse fangen an der Unterseite der Tragschicht AC T 22S an und gehen nur bis in die Mitte dieser Schicht. Sie sind auf höhere Biegezugspannungen an der Unterseite des Belags zurückzuführen. Die Risse finden sich vor allem quer zur Fahrtrichtung.

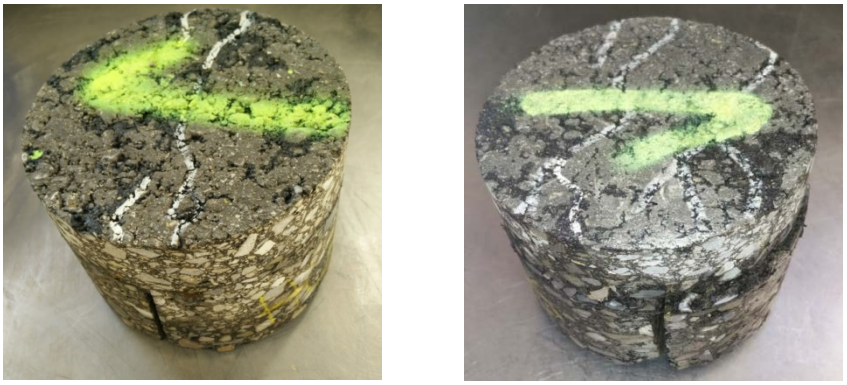


***Abb. 91** Risse an der Oberfläche der Bohrkerne*

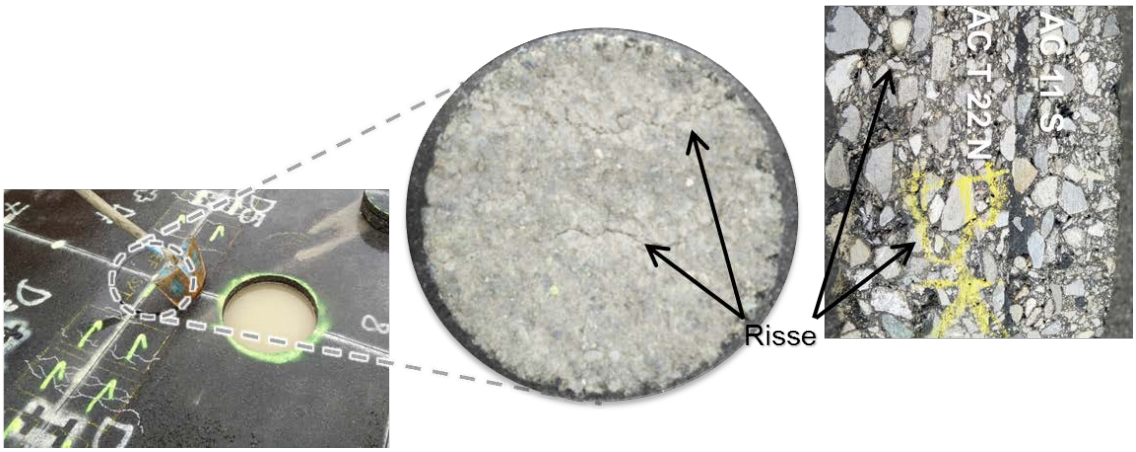


***Abb. 92** Entnahme von Belagsausschnitten und Querschnittsdetail mit Durchstanzen und Schichtentrennung*

In keinem der Testfelder gibt es eine Verbindung zwischen der Rissen von unten und oben. Ein ähnliches Phänomen wurde bereits bei anderen Untersuchungen festgestellt [2].

8 Finite Element Simulation und Bestimmung der optimalen Lage der Asphalteinlage im Belagsaufbau

8.1 Geometrie und Eigenschaften des Modells

Mit Hilfe der Finite Element Methode (FEM) wurde eine theoretische Analyse der Spannungen und Dehnungen im Belagsaufbau durchgeführt. Das entwickelte Modell basiert auf der kommerziell erhältlichen Software Abaqus 6.14 [21]. Zu Beginn der Analyse wurde die gemessenen Beanspruchungen des Belagsaufbaus mit denjenigen aus dem Modell verglichen, wobei ausgewählte experimentelle Konditionen simuliert wurden. Es wurden reale Belastungen, reales Materialverhalten, auftretende Geschwindigkeiten und gemessene Belagstemperaturen etc. berücksichtigt. Insgesamt wurden 3D Belagsgeometrien berechnet, eine ohne (Referenz) und eine mit Bewehrungseinlage (mit Asphalteinlage). Die Asphalteinlage wurde als extrem dünne Schicht (ultra thin layer) modelliert, wobei die Unterschiede zwischen den drei Systemen (A, B, und C) nicht berücksichtigt wurden. Die künstlichen Risse wurden durch Einfügen einer Unstetigkeit in der AC T 22 Tragschicht, wie in Abb. 93 (a) dargestellt, berücksichtigt. In allen Fällen wurde der Modellbelag statisch an unterschiedlichen Punkten belastet, wodurch die Überfahrt eines Good-Year R22.5 455/40 super-single des MLS10 simuliert wird. Die Simulationen wurden deshalb mit einer Last in der Mitte des Modells und -400mm, -200mm, 200mm, 400mm, 600mm, 800mm and 1000mm entfernt von der Mitte, wie in Abb. 94 dargestellt, durchgeführt. Insgesamt wurden also 8 Lastpositionen untersucht. Die halb-infinite Geometrie der Struktur wurde als Block mit 3m Länge und 2m Breite modelliert. Die Grösse des Blocks wurde so gross wie möglich gewählt, um so den Einfluss der Randbedingungen so gering wie möglich zu halten und gleichzeitig eine halbwegs erträgliche Rechenzeit zu gewährleisten. Das Modell besteht aus den Asphaltschichten und der ungebundenen Fundationsschicht, es besitzt eine totale Dicke von 705mm. Im Bereich der Lastaufbringung wurde das Netz verfeinert, um so die sich in diesem Bereich schneller ändernden Dehnungen berücksichtigen zu können (siehe Abb. 93(c)). Es wurde linear elastisches Materialverhalten zur Charakterisierung der Asphaltschichten und der ungebundenen Fundationsschicht verwendet. Dabei wurde „voller Verbund“ zwischen den Schichten vorausgesetzt. Die Materialkennwerte wurden aus der mit dem Benkelman-Balken ermittelten Deflektion rückgerechnet (vgl. Kapitel 6.7). Da diese Messung bei einer Temperatur von 15°C stattfanden, wurden der rückgerechnete elastische Modul und die FE Simulation für die gleiche Temperatur angesetzt. Abb. 95 zeigt einen Screenshot des Rückrechnungs-programms (Backcalculation) [21].

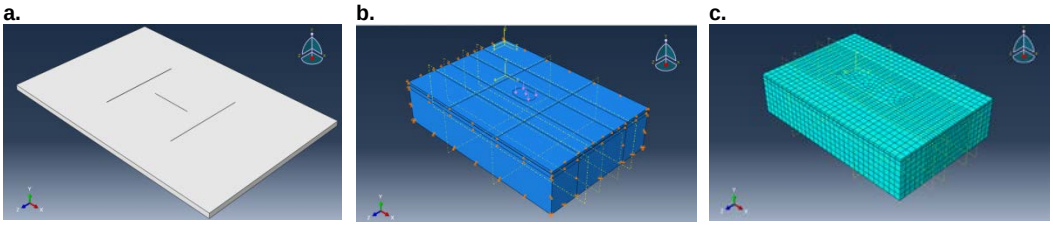


***Abb. 93** Ansicht der künstlichen Risse (a.), Belastungszentrum (b.) Netz (c.)*

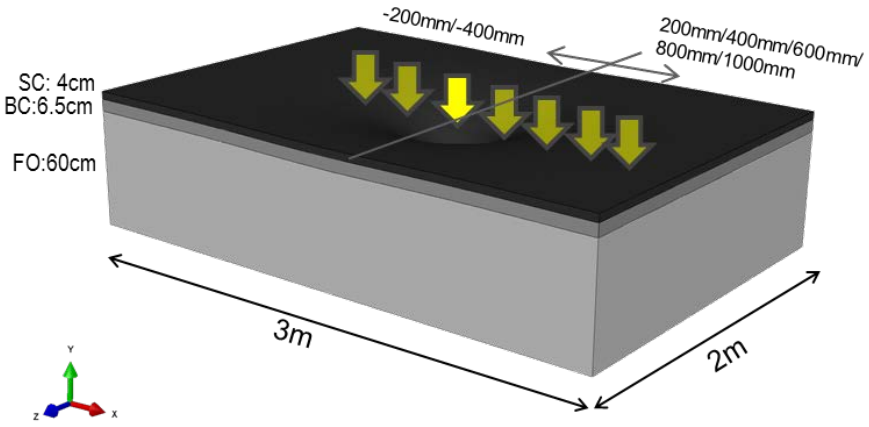


Abb. 94 *Geometrie des Modells und schematische Darstellung der Lastpositionen SC.*

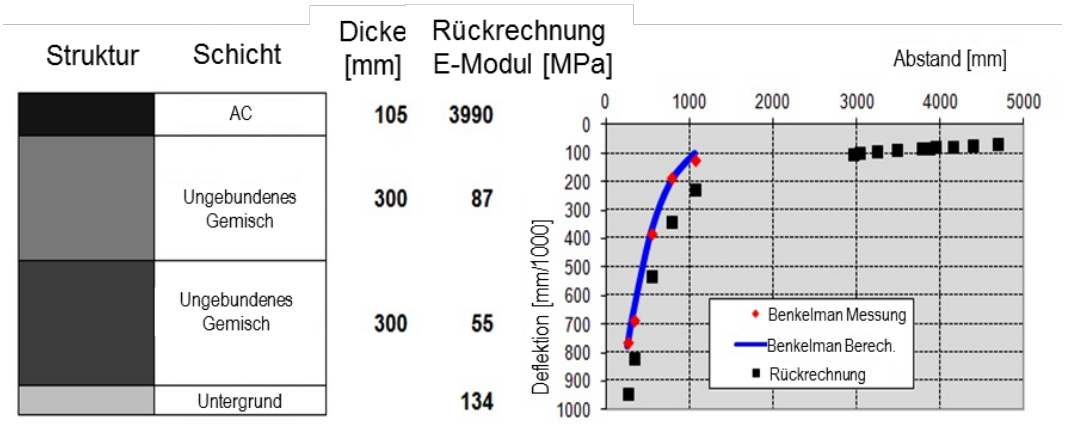


Abb. 95 *Screenshot der Backcalculation Software (Rückrechnungssoftware)*

In der nachfolgenden Analyse wurde eine Sensitivitätsstudie zur Lage der Bewehrungseinlage im Belagsaufbau durchgeführt. Die die Bewehrungseinlage darstellende Schicht wurde dabei in unterschiedlichen Tiefen des Belagsaufbaus angebracht und die sich daraus ergebenden Dehnungsverteilungen berechnet. Die geometrischen und mechanischen Parameter jeder Schicht sind in Tab. 5 angegeben.

Tab. 5 *Geometrische und mechanische Parameter der FEM*

Schicht	**Dicke [mm]**	**E-Modul [MPa]**
SC (AC 11 S)	40	3500
GR (Asphalteinlage)	3	50000
BC (AC T 22 S)	65	9000
FO (Ungebundenes Gemisch 0/45)	60	100

8.2 Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Dehnungen

Zur Validierung des Modells wurden die in der Simulation erhaltenen Dehnungen mit denjenigen des realen Belagsaufbaus unter Belastung verglichen. Dazu wurden die Dehnungen spezifischer Elemente des FE Modells und die mit den Dehnungsmesstreifen gemessenen Dehnungen herangezogen. Die FEM Elemente wurden wie Abb. 96 zeigt, so ausgewählt, dass sie genau den Positionen der Dehnmessstreifen im Belagsaufbau und der im Modell aufgebrachten Last entsprachen. Als Beispiel einer FEM Berechnung zeigt der rechte Teil der Abbildung ein Dehnungsfeld einer solchen Simulation in Längs- und Querrichtung.

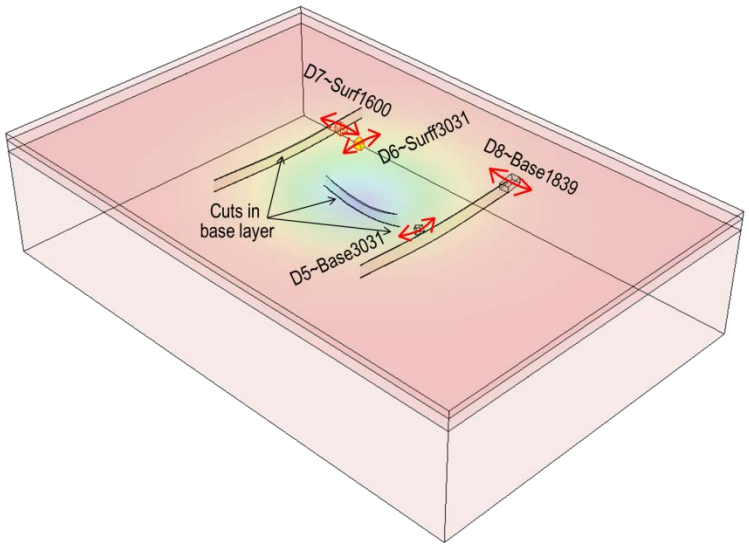


Abb. 96 *Ansicht des FE Modells: Elemente, die zum Vergleich der Dehnungen mit den in situ Messungen verwendet wurden*

Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit der vom Verkehrslastsimulator MLS10 aufgebrachten Last ist es möglich, die Position in eine Zeitrelation zu setzen, so als ob die Last sich auf dem Modell bewegt. Aus diesem Grund entspricht der Abstand von 200mm zwischen der Position der statischen Lasten einem Zeitschritt von 0.04s. Womit alle 8 Simulationen eine Zeitspanne von 0.28s entspricht. Die Bewehrungseinlage wurde als eine 3mm dicke Schicht mit einem elastischen Modul von 50’000 MPa modelliert. Abb. 97 veranschaulicht die im Modell ohne (links) und mit (rechts) Asphalteinlage ermittelten Dehnungen.

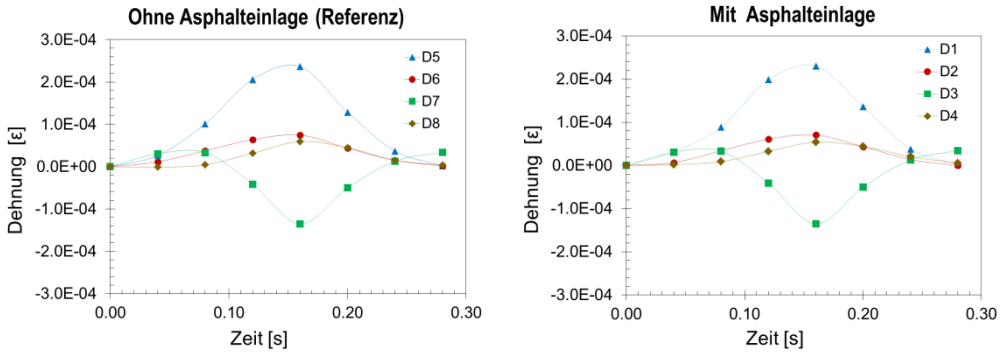


Abb. 97 *Berechnete Dehnungen des FEM Modells der Referenz und des Belags mit Asphalteinlage*

Nachfolgende Plots in Abb. 98 zeigen einen Vergleich zwischen den in situ bei einer MLS10 Überrollung gemessenen und den simulierten Dehnungen. Die schwarz gepunkteten Kurven entsprechen den gemessenen und die durchgehenden Kurven den aus der Simulation erhaltenen Dehnungen. Die zum Vergleich herangezogenen gemessenen Dehnungen wurden bei etwa 8000 Lastzyklen und einer Temperatur von 15°C bestimmt. Tab. 6 und Tab. 7 zeigen die Werte der gemessenen und der berechneten Dehnungsamplitudenmaxima.

Mit Asphalteinlage | Referenz (ohne Einlage)

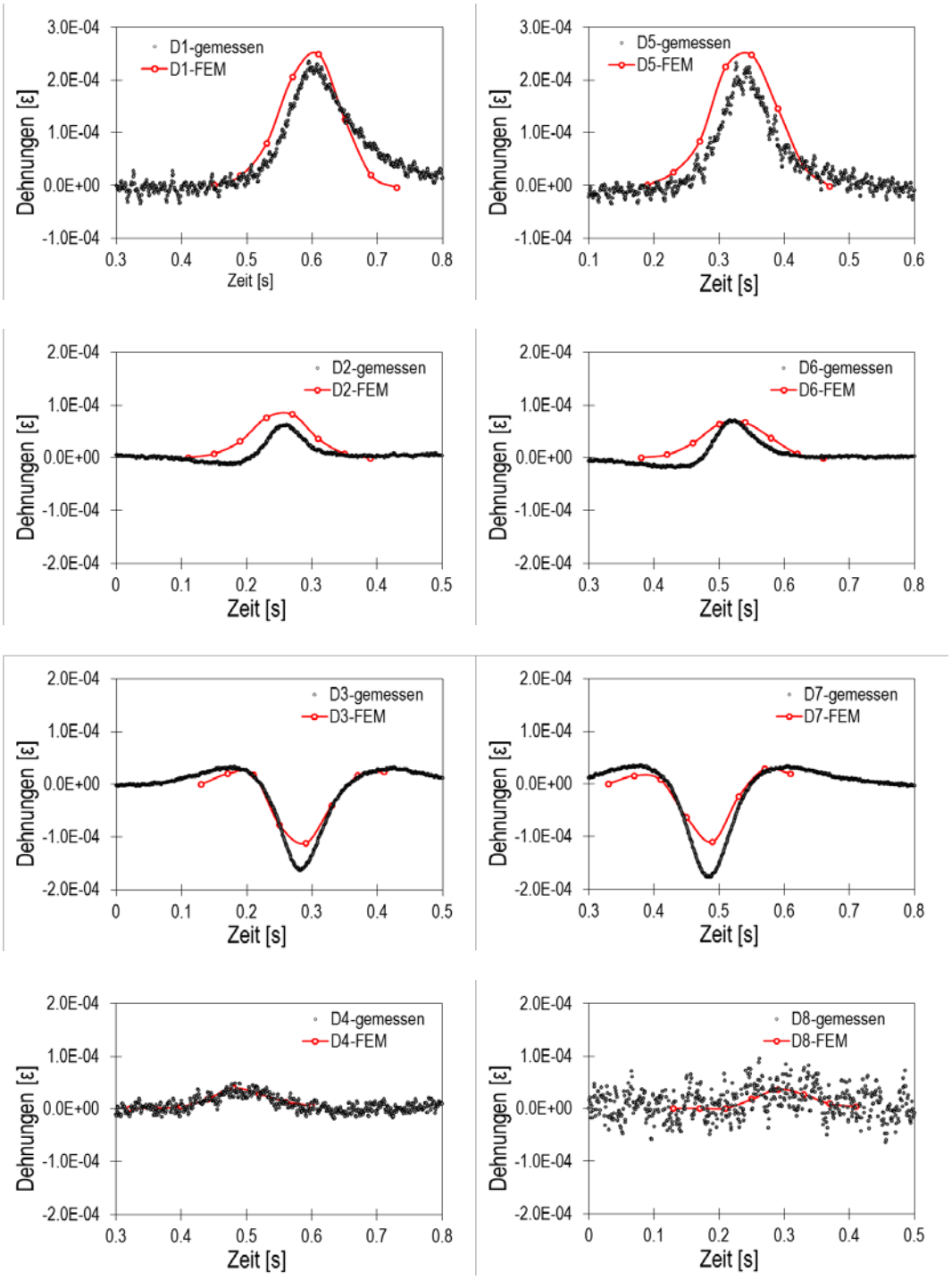


Abb. 98 *Vergleich der gemessenen und berechneten Dehnungen. Die Abbildungen zeigen links die Ergebnisse des Belags mit Asphaltbewehrung und rechts die Ergebnisse des Referenzbelags*

Tab. 6 *Max. Dehnung in [$\mu\varepsilon$] gemessen in situ und vom FEM für den Belag ohne Bewehrung*

Schicht / DMS	D5	D6	D7	D8
Referenz - gemessen	233	70	-177	76
Referenz - FEM	254	80	-123	43
Differenz	9%	14%	31%	43%

Tab. 7 *Max. Dehnung in [$\mu\varepsilon$] gemessen in situ und vom FEM für den Belag mit Bewehrung*

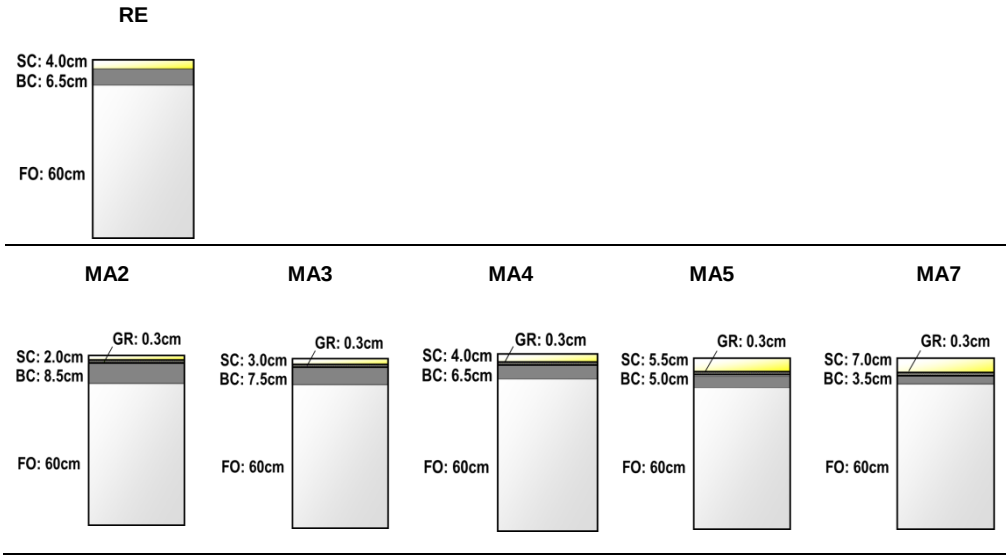
Schicht / DMS	D1	D2	D3	D4
Mit Asphaltbewehrung - gemessen	229	60	-163	48
Mit Asphaltbewehrung - FEM	251	74.7	-115	34
Differenz	10%	25%	29%	29%

Die Auswertung der in Abb. 98 dargestellten Plots zeigt, dass das FE Modell die Form der gemessenen Dehnungen recht gut widerspiegelt. Auch die Maximalwerte sind vergleichbar und bestätigen damit das Modell als für die Simulation brauchbar. Insgesamt sind die Dehnungen mit und ohne Bewehrungseinlage ähnlich, was darauf hinweist, dass die Bewehrungseinlage keinen substanziellen Einfluss auf die Dehnungen hat. Auch wenn die in den Systemen mit Bewehrungseinlage gemessenen Dehnungen in der Regel kleiner sind, ist doch der Unterschied relativ gering.

8.3 Sensitivitätsuntersuchung zur Position der Bewehrung im Belagsaufbau

Mit Hilfe der im vorausgegangenen Kapitel erhaltenen und validierten Parameter wurde eine Untersuchung des Einflusses der Position der Bewehrung im Belagspaket durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde die Geometrie des FE Modells mit Bewehrungseinlage durch Variation der Dicken der AC 11S (genannt SC im Modell) und der AB T 22S (genannt BC im Modell) so geändert, dass die Gesamtdicke immer 10.8cm betrug. Das Referenzmodell ohne Bewehrungseinlage und fünf Modelle mit Bewehrungseinlagen in unterschiedlichen Tiefen wurden, wie in Tab. 8 ersichtlich, erstellt. Zur besseren Unterscheidung wurden die Modelle mit RE, MA2, MA3, MA4, MA5 and MA7 bezeichnet. Die Zahlen in der Bezeichnung entsprechen dabei der Tiefe der Bewehrungseinlage in der Belagsschicht.

***Tab. 8** FEM Aufbauten für die Sensitivitätsuntersuchung*



Die an den Sensorpositionen D1 bis D4 gemessenen Dehnungen sind in Abb. 99 dargestellt.

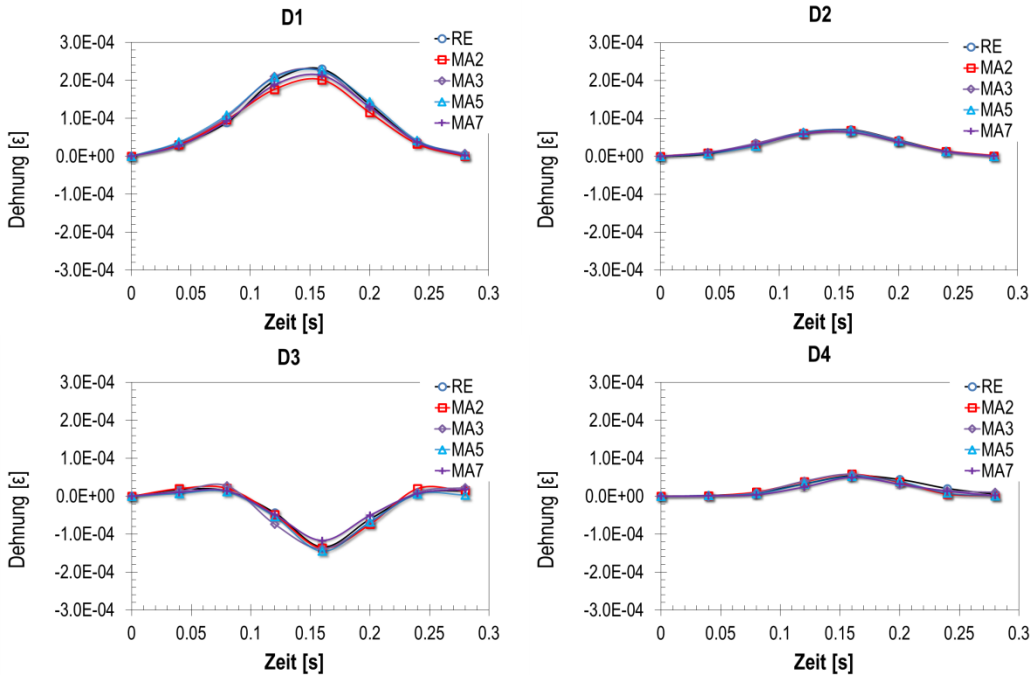


***Abb. 99** Dehnungen der Dehnmessstreifen D1 bis D4 für die unterschiedlichen Positionen der Bewehrungslage*

Tab. 9 zeigt die in den einzelnen Modellen erhaltenen Dehnungsmaxima für die mit den Dehnungsmessstellen übereinstimmenden Positionen. Positive Werte bedeuten Zugspannungen und negative Werte entsprechen Druckspannungen.

Tab. 9 *Vergleich der maximalen Dehnungen für alle Belagsmodelle [με]*

Modell \ DMS	D1	D2	D3	D4
Referenz	254.0	79.7	-123.1	43.4
MA2	224.3 (-12%)	70.2 (-12%)	-120.3 (-2%)	38.8 (-11%)
MA3	240.5 (-5%)	73.4 (-8%)	-117.7 (-4%)	38.4 (-12%)
MA4	251.3 (-1%)	74.7 (-6%)	-114.8 (-7%)	34.2 (-21%)
MA5	246.4 (-3%)	70.8 (-11%)	-122.4 (-1%)	35.8 (-18%)
MA7	230.4 (-9%)	66.1 (-17%)	-101.2 (-18%)	37.0 (-15%)

Der Vergleich zeigt, dass die Maximalwerte in der mit Bewehrung (Asphalteinlage) modellierten Struktur kleiner sind als in der unbewehrten Struktur. Insgesamt scheinen die Dehnungen grösser zu sein, wenn sich die Asphalteinlage 4cm unter der Belagsoberfläche und kleiner, wenn sich die Einlage in der höher bzw. tiefer in der Asphaltschicht befindet. Dies kann man auch in Abb. 100 deutlich erkennen.

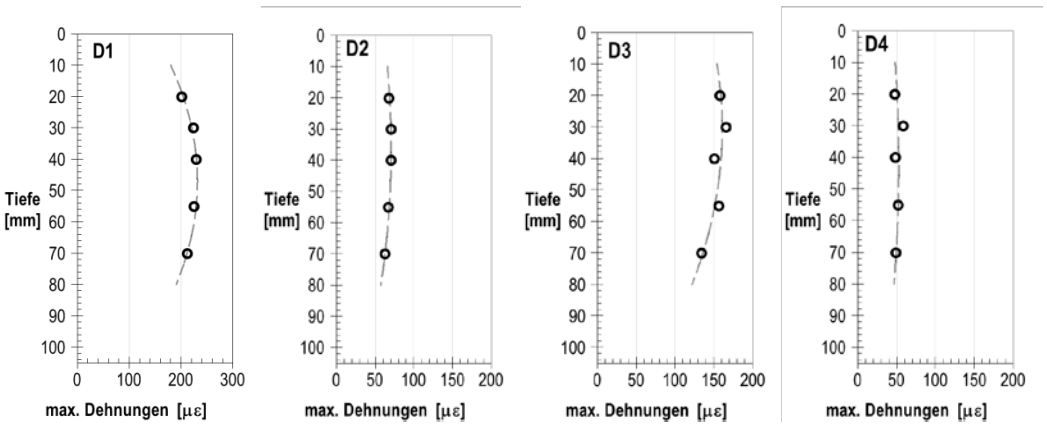


Abb. 100 *Durch Simulation erhaltene maximale Spannungen an den Dehnungs-messstellen D1 bis D4*

9 Erkenntnisse

9.1 Auswahl der Systeme: Schichtenverbund

Die aufgrund der Schichtenverbundes durchgeführte Auswahl der Systeme zeigte, dass die Erzielung eines guten Schichtenverbunds unter Laborbedingungen unkritisch ist und dass praktisch alle untersuchten Systeme und Schichten (Deck-Binderschicht bzw. Binder-Tragschicht) hohe, die Anforderung des Schweizer Normenwerks (15kN bzw. 12 kN) deutlich übertreffende Verbundkräfte erreicht werden. Das einzige System, welches sich mit mittleren maximalen Verbundkräften um 15 kN bewegt, ist das System mit SAMI.

9.2 Laboruntersuchungen: Rissüberbrückung

In den durchgeführten Laboruntersuchungen erweisen sich alle Systeme mit Asphalteinlage mit Ausnahme des Systems mit SAMI bezüglich der Rissüberbrückung im Gebrauchszustand als dem unbewehrten System deutlich überlegen. Systeme B und C führen im Gebrauchstemperaturbereich zu einer mindestens doppelt so hohen Lebensdauer wie das unbewehrte Referenzsystem.

Im Tieftemperaturbereich scheint die Rissüberbrückung dagegen auch für das unbewehrte System unkritisch zu sein. Insgesamt muss die Anzahl der pro System untersuchten Prüfkörper im Sinne einer statistischen Auswertung als zu gering betrachtet werden. Gerade im Hinblick auf die teilweise großen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Prüfkörper ist es daher notwendig, weitere Untersuchungen durchzuführen.

9.3 In situ-Untersuchungen

9.3.1 Rissverhalten

Anhand einer visuellen Beurteilung wurde die sich ergebende Rissbildung in den einzelnen Versuchsfeldern analysiert: Die Risse mit Breiten < 1mm waren sehr schwer zu erkennen und konnten oft nur mit Hilfe von Feuchtigkeit sichtbar gemacht werden.

Rissentstehung und -entwicklung unterschied sich deutlich zwischen Referenzfeld im Vergleich mit den Versuchsfeldern mit Bewehrung. Die ersten Risse an der Oberfläche waren im Referenz Versuchsfeld nach 130‘000 Überrollungen und nach 300‘000 Überrollungen in den Systemen A, B und C sichtbar. Das bedeutet, dass bei den Systemen mit Asphaltbewehrung die Risse erst nach fast doppelt so vielen Belastungszyklen an der Belagsoberfläche sichtbar waren. Die Risse treten größtenteils in Querrichtung auf. Nur im Referenzfeld bildete sich ein Längsriss. Auch war die Anzahl Risse nach Abschluss der Belastungszyklen, zumindest in Systemen B und C deutlich geringer als im Referenzfeld. Wie anhand der Untersuchung an Bohrkernen festgestellt wurde, handelt es sich bei diesen Rissen um von der Belagsoberfläche ausgehende Risse (Top-Down Risse) mit geringer Breite und Tiefe. Auch wenn sie vor allem an den Stellen mit künstlichen Rissen auftreten, handelt es sich entgegen einer ersten Vermutung, nicht um Reflektionsrisse.

Die forensische Untersuchung an aus der Fahrspur entnommenen Bohrkernen ergab weiterhin Risse an der Unterseite des Asphaltbelags (Tragschicht). Diese Risse fangen an der Unterseite der Tragschicht AC T 22S an und gehen nur bis in die Mitte dieser Schicht. Sie finden sich vor allem quer zur Fahrtrichtung, stehen aber nicht mit den Oberflächenrissen in Verbindung. Sie sind auf höhere Biegezugspannungen an der Unterseite des Belags zurückzuführen.

9.3.2 Spurrinnenbildung

Beim Vergleich der Spurrinnenbildung zwischen den beiden Testfeldern, zeigt sich, dass die Spurrinnenbildung im Testfeld 1 größer war als im Testfeld 2. Ein Teil dieser größeren Spurrinnenbildung kann dem Temperaturunterschied zwischen den beiden Feldern angelastet werden. Demgegenüber zeigt der Vergleich der Referenz und des Systems A, dass die Spurrinnenbildung in letztem höher ist, obwohl die Temperatur für beide Systeme gleich war. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die Asphalteinlage mit SAMI sich kontraproduktiv auswirkt und zu einer größeren Spurrinnentiefe führt als das Referenzsystem.

9.3.3 Schichtenverbund

Die Ergebnisse zeigen, dass Bewehrungseinlagen in situ eine Trennschicht darstellen, die zu einer Beeinträchtigung des Schichtenverbunds führt, der Schichtenverbund im Referenzfeld also die höchsten Werte erreicht. Die in den bewehrten Feldern gemessenen Mittelwerte erfüllen aber in allen Fällen (im Fall von System A allerdings nur knapp) den von der Schweizer Norm angegebenen Anforderungswert von 15kN zwischen Deck- und Tragschicht. Die niedrigsten Werte werden für System A erreicht, während Systeme B und C mit Werten über 20kN völlig problemlos erscheinen. Die Werte des Schichtenverbundes nehmen durch die Belastung ab, was wahrscheinlich auf die extrem kanalisierte Belastung durch den MLS10 zurückzuführen ist.

Vergleicht man die Schichthaftungswerte aus den Testfeldern mit denjenigen aus den Laboruntersuchungen, so sieht man deutliche Unterschiede. Bleibt die maximale Scherkraft der Referenz nahezu unverändert, ist diejenige der bewehrten Systeme in situ deutlich niedriger. Allerdings bleibt das in den Laborversuchen ermittelte Ranking bestehen, so dass System B die höchsten und System A die niedrigsten Verbundwerte erreicht.

9.3.4 Dynamisches Verhalten: Dehnungs- und Beschleunigungs-messungen

Die an unterschiedlichen Positionen im Belagsaufbau durchgeführten kontinuierlichen Dehnungsmessungen zeigen für alle Systeme (mit und ohne Asphalteinlage) ein ähnliches Verformungsbild unter Last. Auch während der Belastung ändert sich die Form der Verformungsmulde wenig, d.h. die Dehnungen am Anfang und am Ende der Belastung zeigen dieselbe Form. Erwartungsgemäß ist die Dehnungsamplitude aber von der Belagstemperatur abhängig. Unter Annahme einer Temperaturspanne zwischen 13°C und 14°C ergibt sich eine stetige Zunahme der Dehnungsamplitude. Diese Zunahme der Dehnungsamplitude kann auf die Abnahme der Steifigkeit des Belags infolge fortschreitender Schädigung durch die zyklische Belastung zurückgeführt werden. Nur für DMS D1 und D5 im Testfeld 2, die quer zur Fahrtrichtung und bei -10.5cm eingebaut sind, stellt man eine Abnahme der Dehnungen fest. In diesen Fällen kann die Abnahme der Dehnungsamplitude auch mit dem Einfluss der lokalen Verdichtungsverhältnisse oder dem Vorhandensein von Rissen erklärt werden. Größtenteils hat das System ohne Asphaltbewehrung die höchsten Dehnungsamplituden, was darauf hinweist, dass die Asphalteinlagen zur Steifigkeit des Belagsaufbaus beitragen.

Ähnliche Aussagen lassen sich auch für die Beschleunigungsmessungen machen. Auch hier sind die Amplituden im Referenzfeld größer, was bedeutet, dass dieses die geringste Steifigkeit besitzt. Wie im Fall der Dehnungen nehmen auch hier die gemessenen Beschleunigungen infolge der Belagsermüdung während der Belastung ab.

9.3.5 Dynamische und statische Verformung mit FWD und Benkelman Balken

Die mit Hilfe des Benkelmanbalkens in den unterschiedlichen Testfeldern gemessenen Verformungen bestätigen ebenfalls die Feststellung, dass die Steifigkeit des Testfelds ohne Asphaltbewehrung am geringsten ist. Auch hier zeigt sich die fortschreitende Belagsschädigung anhand der im Laufe der Belastung zunehmenden Verformungen.

Für die mit dem Falling Weight Defectometer (FWD) gemessenen dynamischen Verformungen stellt man ebenfalls eine deutliche Abnahme der Steifigkeit im Bereich der Belastung fest, wobei allerdings keine Unterschiede zwischen bewehrten und unbewehrten Feldern.

9.3.6 Laborprüfungen an Bohrkernen und forensische Untersuchungen

Die Bestimmung der Steifigkeitsmodule an Bohrkernen bestätigt die Abnahme derselben im Bereich der durch den MLS10 beanspruchten Bereiche. Die gilt insbesondere für die Tragschicht AC T 22S, wobei sich der Steifigkeitsverlust aus der Bildung von Rissen an der Belagsunterseite ergab. Diese in der forensischen Untersuchung festgestellten und in Richtung der Verkehrsbelastung auftretenden Längsrisse verlaufen allerdings nur bis zur Mitte der Tragschicht und stehen nicht mit den an der Belagsoberfläche auftretenden Rissen in Verbindung.

9.3.7 Finite Elemente Simulation

Es wurden zwei FEM Modelle zur Simulation des Belagsverhaltens mit und ohne Bewehrungseinlage erstellt. Die FEM Modelle wurden anhand der in situ Messungen validiert und zeigten eine gute Übereinstimmung mit denselben. Weiterhin wurde eine Parameterstudie durchgeführt, die ergab, dass FEM Modellierung Hinweise zur optimale Lage der Bewehrung liefern kann und als Dimensionierungsgrundlage genutzt werden kann.

10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ziel der Forschungsarbeit war, Erkenntnisse über die Wirksamkeit und Lebensdauer von Asphalteinlagen im Schichtensystem des Strassenoberbaus zu erhalten und Kriterien für eine Anwendungsüberprüfung neuer Produkte zu definieren, wobei die Themenbereiche Schub/Haftung, Rissüberbrückung, Steifigkeit/Verformung/Tragfähigkeit und Dimensionierungsgrundlagen besonders berücksichtigt werden sollten:

- Schub/Haftung (Verbundkraft und -wirkung, zeitliche Entwicklung)

Der an Laborprüfkörpern im Rahmen der Vorauswahl von Asphaltbewehrungen ermittelte Schichtenverbund erwies sich bei allen getesteten Systemen sowohl in den Scherebenen zwischen Deck- und Binderschicht als auch zwischen Binder- und Tragschicht als normkonform (>15kN bzw. 12kN) und somit als Vorauswahlkriterium nur wenig geeignet, da die Laborbedingungen zu ideal und den Bedingungen in situ nicht vergleichbar sind. Allerdings konnten auch im Labor schon systembedingte Unterschiede zwischen den einzelnen Produkten bzw. Systemen ausgemacht werden. So führte das Vorhandensein einer weichen SAMI Schicht zu im Vergleich mit allen anderen Systemen zu deutlich niedrigeren Verbundwerten.

Die Analyse des Schichtenverbunds an aus den in situ Testfeldern entnommenen Bohrkernen ließ dagegen deutlichere Unterschiede zwischen den einzelnen Asphaltbewehrungssystem einerseits und dem System ohne Asphalteinlage andererseits zu Tage treten. Auch hier zeigte das System mit einer SAMI die mit Abstand niedrigsten Scherkraftwerte, während die Werte der beiden anderen Systeme sich ebenfalls klar unterschieden, woraus geschlossen werden kann, dass die Art und Weise der Applikation des Gitters auf die Asphaltschicht (Haftkleber, Aufflammen) und/oder eventuell zusätzlich vorhandene Gewebeschichten wesentlichen Einfluss auf die Größe der Scherkraft haben: So zeigt das Systeme mit aufgeflammtem Gitter besonders hohe Schichthaftungswerte.

Weiterhin ergeben sich klare Unterschiede zwischen den Bohrkernen aus Laborprüfkörpern und Bohrkernen aus in situ Testfeldern: Bei allen Systemen mit Asphaltbewehrung zeigte sich in situ, im Gegensatz zu den Laborresultaten, eindeutig ein niedrigerer Schichtenverbund gegenüber der Referenz ohne Asphaltbewehrung.

Die zeitliche Entwicklung des Schichtenverbunds konnte in situ ebenfalls gut durch den Einfluss der Belastung ermittelt werden. Die Werte des Schichtenverbundes nehmen für alle Systeme durch die Belastung mit stark ab, was in dieser Deutlichkeit auf die extrem kanalisierte Belastung durch den Verkehrslastsimulator MLS10 zurückzuführen ist.

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Ermittlung des Schichtenverbundes im Labor gibt Hinweise auf das in situ Verhalten, so zeigt sich etwa der negative Einfluss einer SAMI. Er ist aber als alleiniges Auswahlkriterium für zu verwendende Asphaltbewehrungsprodukte und –systeme nicht ausreichend, da die Laborbedingung im Vergleich mit den in situ zu sehr idealisieren. Die im Labor an den Systemen im Asphaltbewehrungseinlagen bestimmten Schichtenverbundwerte sind bis zu 40% höher als die in situ ermittelten, während diejenigen des ohne Asphaltbewehrung etwa gleich war.

- Der Schichtenverbund muss an in situ Prüfkörpern bestimmt werden, da die Laborbedingungen zu einer Überschätzung der Scherkraftwerte um bis zu 40% führen.

- Die Art und Weise des Aufbringens hat großen Einfluss auf den Schichtenverbund. Im Rahmen der Forschungsarbeit erwies sich das Aufflammen der Asphaltbewehrungseinlage als besonders wirksam, um einen guten und dauerhaften Schichtenverbund zu erzielen.

- Das Aufbringen einer SAMI hat dagegen eindeutig negative Einwirkungen auf den Schichtenverbund und sollte möglichst vermieden werden.

- Extreme und kanalisierte Verkehrsbelastung führt zu einer beschleunigten Schwächung des Schichtenverbunds; dies gilt besonders im Fall von Asphaltbewehrungseinlagen, die grundsätzlich eine Trennschicht darstellen.

- Rissüberbrückung (Durchschlagen von Rissen, zeitliche Entwicklung)

Die rissüberbrückende Wirkung und ihre zeitliche Entwicklung bzw. die Verhinderung des Durchschlagens von Rissen von Asphaltbewehrungen konnten im Labor mit Hilfe des skalierten Verkehrslastsimulators MMLS3 sehr gut bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Prüfung konnte nicht nur eine Verlängerung der Lebensdauer von Systemen mit Asphaltbewehrung gegenüber unbewehrten Systemen bestimmt, sondern auch die Wirkungsweise verschiedene Systeme untereinander verglichen und bewertet werden. So führte auch bei dieser Prüfung das Vorhandensein einer weichen SAMI Schicht zu einer im Vergleich mit allen anderen Systemen deutlich niedrigeren Lebensdauer und zur Bestätigung der Erkenntnisse aus der Untersuchung des Schichtenverbunds.

In situ konnte für alle Asphaltbewehrungssysteme eine gegenüber dem System ohne Asphaltbewehrung eine verzögerte Schadenbildung festgestellt werden, wobei aber das System mit weicher SAMI Schicht zu vermehrter Spurrinnenbildung neigte. Allerdings konnte aufgrund der zu starken Dimensionierung der ungebundenen Fundationsschicht der Teststrecke kein Versagen der Struktur herbeigeführt werden. Die Rissbildung verlief in situ deshalb auch nicht reflektierend, d.h. aufwärts ausgehend von den durch Schneiden erzeugten Rissen, sondern von der Oberfläche her abwärts und steht damit wiederum mit der extrem kanalisierte Belastung des MLS10 in Zusammenhang.

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Belastungsversuche mit dem skalierten Verkehrslastsimulator MMLS3 erwiesen sich als sehr flexibel und gut anwendbar. Sie sind damit geeignet als Grundlage für eine Prüfung zur Auswahl und Anwendungsüberprüfung neuer Asphaltbewehrungen bzw. Bewehrungssystemen in eine Norm (Richtlinie) einbezogen zu werden. Allerdings muss die Prüfkörperanzahl erhöht werden, um die Aussage der Prüfung statistisch besser abzusichern.

- Teststrecken stellen immer eine gute Möglichkeit zur Bestimmung des Verhaltens von Asphaltbewehrungen dar. Allerdings ist bei in situ Versuchen zur Erzeugung von Reflektionsrissen und zur Herbeiführung eines strukturellen Versagens darauf zu achten, Teststrecken nicht zu stark zu dimensionieren.

- Steifigkeit/Verformung/Tragfähigkeit

Die in den Testfeldern eingebauten Sensoren, wie auch die Benkelmann Messungen weisen für alle Systeme mit Asphaltbewehrungseinlagen in der Regel geringere Verformungsamplituden auf und geben damit Hinweise auf eine höhere Systemsteifigkeit der Aufbauten mit Asphaltbewehrungen. Für alle Systeme ergibt sich zusätzlich eine Abnahme der Steifigkeit infolge Belastung durch den Verkehrslastsimulator MLS10.

Auch die in Laborversuchen an aus der Teststrecke entnommenen Bohrkernen zeigen, dass Asphaltschichten mit Bewehrungseinlage steifer sind als diejenige ohne Bewehrungseinlage.

Zusammenfassend lässt daraus folgern:

- Wenn der Verbund gewährleistet ist, verringern Bewehrungseinlagen die Vertikal-Verformung der Asphaltkonstruktion und führen somit zu einer Erhöhung der Steifigkeit derselben. Aufgrund dieser Tatsache kann gefolgert werden, dass Asphaltbewehrungseinlagen die Ermüdungsbeständigkeit einer Konstruktion erhöhen, indem sie einer durch Belastung erzeugten Schädigung durch Mikrorissbildung entgegen wirken und somit zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit führen. Durch die grundlegende Begrenzung der Forschungsarbeit auf die Lage der Asphaltbewehrung zwischen Deck- und Binderschicht bleibt aber eine quantitative Aussage zur Tragfähigkeitserhöhung des Oberbaus weiterhin offen.

  - Dimensionierungsgrundlagen

  In der Forschungsarbeit konnte anhand einer Parameterstudie gezeigt werden, dass FEM Modellierung Hinweise zur optimale Lage der Bewehrung liefern und als Dimensionierungsgrundlage genutzt werden kann.

11 Forschungsbedarf

Auch wenn das Ziel der Erarbeitung eines Systemprüfverfahrens zur Untersuchung neuer Produkte von Asphalteinlagen und -systemen im Modellmaßstab (Labor) durch die Entwicklung einer Systemprüfung mit dem skalierten Verkehrslastsimulators erreicht wurde, gilt es vor der Implementierung einer definitiven Prüfvorschrift, diese statistisch an einer größeren Anzahl an Systemen und Prüfkörpern pro System abzusichern.

In der Schweiz werden bisher Asphaltbewehrungen im Bereich der Erhaltung eingesetzt ohne einen Dimensionierungshintergrund dafür zu haben. Der Einsatz von Asphaltbewehrungen sollte jedoch in Zukunft auf der Grundlage von Dimensionierungsansätzen für den Strassenoberbau erfolgen. Bisher fehlen Dimensionierungsgrössen für den Einsatz im Bereich der Verstärkung und Erneuerung von Oberbaukonstruktionen in Asphaltbauweise. Dies setzt statistisch abgestützte Grundlagen voraus, welche im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht erbracht werden konnten und Inhalt weiterer Forschung darstellen sollten.

Weiter zeigte sich ein ausreichender Schichtenverbund beim Einsatz von Asphaltbewehrungen als notwendige Grundlage für deren Wirkung in der Strassenoberkonstruktion. Damit kommt der Ausführungsqualität beim Einbau besondere Bedeutung zu. Je nach System existieren unterschiedliche Konstruktionsmerkmale z.B. in Bezug auf die Applizierung oder die Menge des Haftvermittlers. Erkenntnisse über die Auswirkung von Abweichungen der definierten Randbedingungen auf den Schichtenverbund fehlen bisher und konnten auch im Rahmen der Forschungsarbeit nicht erbracht werden. Die Sensitivität von unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen sollte gerade mit Blick auf die Qualität des Schichtenverbunds unter Einbaubedingungen untersucht werden.

Anhänge

I Spurrinnenmessungen ... 101
I.1 Spurrinnenbildung in Referenzfeld ... 101
I.2 Spurrinnenbildung System A ... 101
I.3 Spurrinnenbildung System B ... 102
I.4 Spurrinnenbildung System C ... 102

II Temperaturverlauf ... 103

III Schichtenverbund ... 105
III.1 Schichtenverbund aus In-situ Bohrkernen ... 105

IV Bestimmung der Steifigkeitsmodul ... 107
IV.1 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Referenzfelds im belasteten und unbelasteten Bereich ... 107
IV.1 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems A im belasteten und unbelasteten Bereich ... 113
IV.2 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des System B im belasteten und unbelasteten Bereich ... 114
IV.3 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems C im belasteten und unbelasteten Bereich ... 115
IV.4 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S, des Referenzfelds ... 116
IV.5 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems A ... 117
IV.6 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems B ... 118
IV.7 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems C ... 119

V Falling Weight Deflectometer ... 121
V.1 Temperatur ... 121
V.2 Maximale Deflektion ... 121
V.3 Rückgerechnete elastische Module ... 122

VI Bilder der visuellen Beurteilung ... 123
VI.1 Testfeld 1 ... 123
VI.2 Testfeld 2 ... 125

VII Material für in-situ Testfelder ... 127
VII.1 Mischgutuntersuchung AC T 22S ... 127
VII.2 Mischgutuntersuchung AC 11 S ... 128

I Spurrinnenmessungen

I.1 Spurrinnenbildung in Referenzfeld

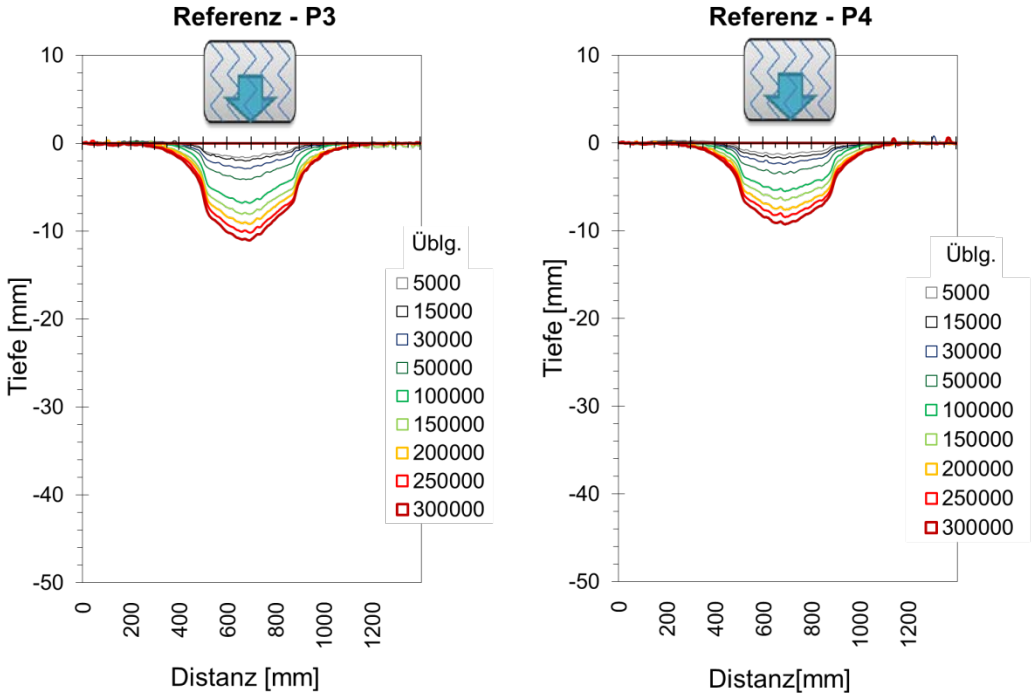


Abb. 1 Spurrinnenprofile P3 und P4 in Referenz

I.2 Spurrinnenbildung System A

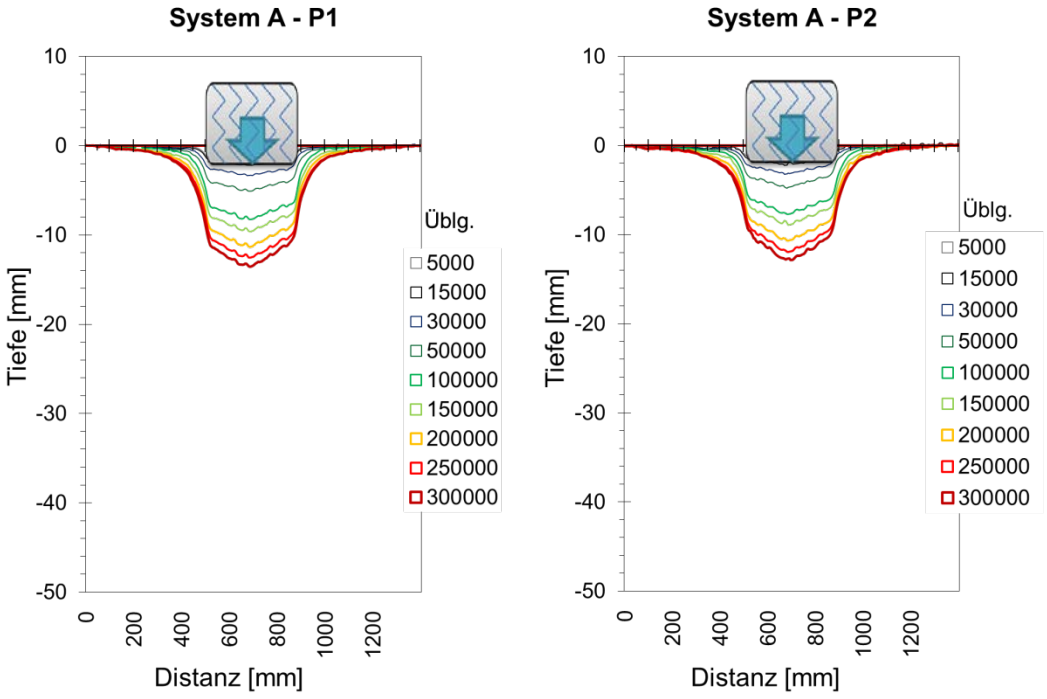


Abb. 2 Spurrinnenprofile P1 und P2 in System A

I.3 Spurrinnenbildung System B

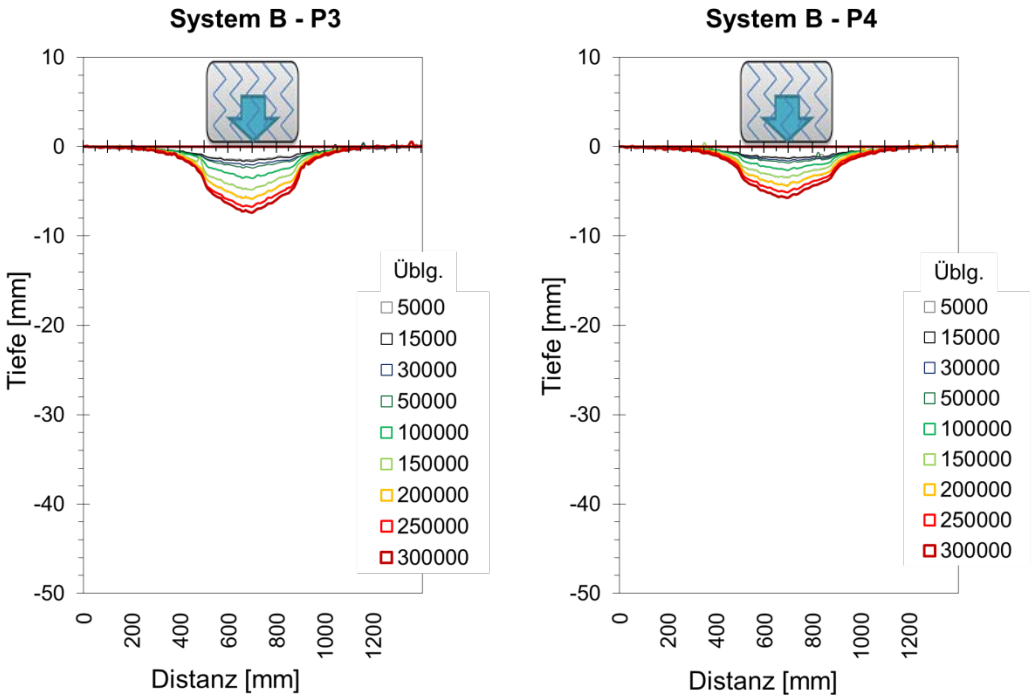


Abb. 3 Spurrinnenprofile P3 und P4 in System B

I.4 Spurrinnenbildung System C

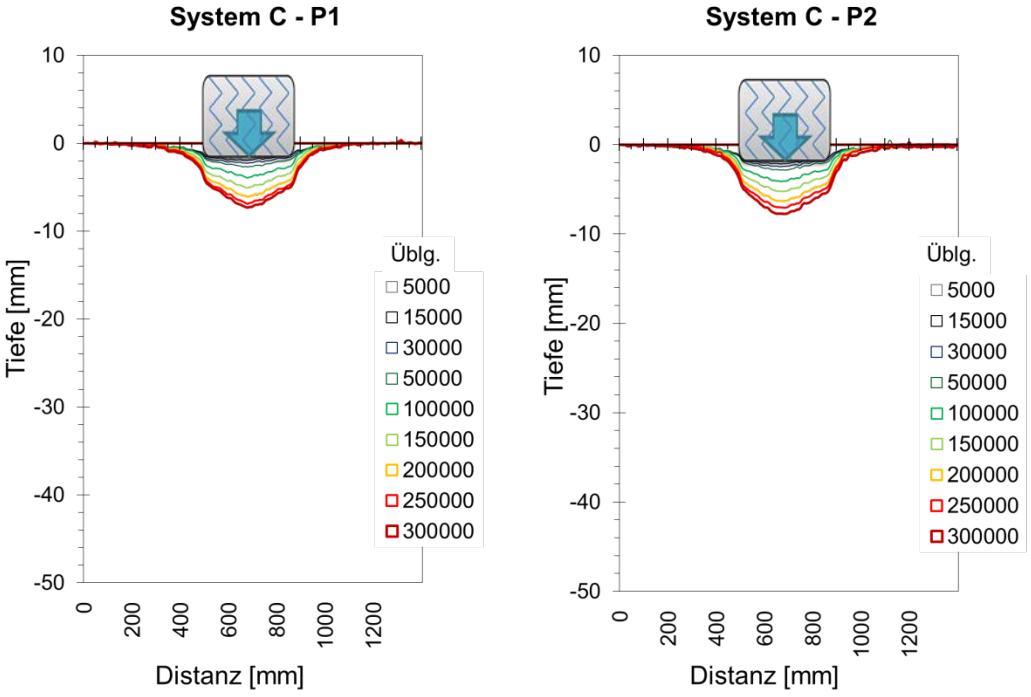


Abb. 4 Spurrinnenprofile P1 und P2 in System C

II Temperaturverlauf

Tab. 1 *Verlauf der Temperatur während der MLS10 Testphase*

Testfeld 1 (Referenz + System A)

Start Datum	Ende Datum	Kumulierte Überrollung	DMS1 -3.5cm	DMS2 -3.5cm	DMS3 -0cm	DMS4 -0cm	Mittelwert.	Max Temp.	Min Temp.
09.10.14	09.01.14	5'000	22.6	22.0	24.0	23.8	23.1	25.1	21.5
13.10.14	13.10.14	15'000	9.5	9.7	10.1	10.0	9.8	12.1	8.7
14.10.14	14.10.14	30'000	14.0	14.1	14.9	14.3	14.3	20.7	9.7
15.10.14	15.10.14	50'000	17.5	17.6	18.3	17.6	17.7	23.8	13.0
16.10.14	17.10.14	100'000	18.7	18.8	18.8	18.4	18.7	24.4	13.5
12.11.14	17.11.14	150'000	10.8	10.8	10.5	10.7	10.7	14.1	7.6
17.11.14	19.11.14	200'000	12.2	12.2	12.5	13.0	12.5	17.1	6.9
20.11.14	24.11.14	250'000	12.0	12.1	12.4	12.9	12.4	17.7	7.7
24.11.14	25.11.14	300'000	13.0	13.2	12.3	12.7	12.8	14.8	9.8

Testfeld 2 (System B + System C)

Start Datum	Ende Datum	Kumulierte Überrollung	DMS1 -3.5cm	DMS2 -3.5cm	DMS3 -0cm	DMS4 -0cm	Mittelwert	Max Temp.	Min Temp.
20.10.14	21.10.14	5'000	16.6	16.8	17.1	17.3	17.0	18.2	16.2
22.10.14	23.10.14	15'000	12.4	12.7	11.0	11.1	11.8	14.0	9.1
24.10.14	24.10.14	30'000	12.7	13.0	12.6	12.6	12.7	16.0	9.6
24.10.14	24.10.14	50'000	14.0	14.2	13.2	13.1	13.6	17.0	9.8
27.10.14	29.10.14	100'000	15.4	15.6	15.2	15.2	15.4	20.8	10.7
04.11.14	07.11.14	150'000	12.8	12.7	12.7	12.5	12.7	17.2	7.5
10.11.14	11.11.14	200'000	12.8	12.8	12.2	12.1	12.5	17.7	7.5
27.11.14	28.11.14	250'000	12.8	13.1	12.6	12.5	12.7	16.8	8.3
01.12.14	04.12.14	300'000	9.5	9.9	9.2	9.2	9.4	14.5	4.8

III Schichtenverbund

III.1 Schichtenverbund aus In-situ Bohrkernen

Tab. 2 *Resultate der Schichthaftung nach Leutner*

		Prüfkörper	Weg [mm]	Max-Kraft [kN]
Referenz	Unbefahren	REU01	3.96	42.47
		REU02	3.12	38.02
		REU03	4.06	41.48
		REU04	4.34	41.15
	Befahren	REL03	8.86	40.46
		REL04	8.31	41.48
		REL08	8.31	32.17
		REL09	8.51	39.60
System A	Unbefahren	SAU01	3.86	16.90
		SAU02	3.09	13.94
		SAU03	3.23	15.40
		SAU04	2.72	15.10
	Befahren	SAU03	3.49	15.97
		SAU04	5.33	15.42
		SAU08	3.79	16.43
		SAU04	3.09	17.01
System B	Unbefahren	SBU01	5.32	30.84
		SBU02	4.34	30.44
		SBU03	3.94	28.27
		SBU04	4.28	25.85
	Befahren	SBL03	3.61	24.94
		SBL04	3.63	29.08
		SBL08	3.82	18.43
		SBL09	4.07	17.70
System C	Unbefahren	SCU01	4.29	18.48
		SCU02	5.72	20.61
		SCU03	3.04	21.94
		SCU04	4.66	25.36
	Befahren	SCL03	4.29	14.67
		SCL04	5.72	17.09
		SCL08	3.04	17.41
		SCL09	4.66	17.79

IV Bestimmung der Steifigkeitsmodul

IV.1 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Referenzfelds im belasteten und unbelasteten Bereich

***Tab. 3** Steifigkeitsmodul der getestete Prüfkörper nach Spaltzugtests/Referenz Bohrkerne*

		Specimen							
	Freq.	**REU 05-1**	**REU 06-1**	**REU 07-1**	**REU 09-1**	**REL 10-1**	**REL 11-1**	**REL 12-1**	**REL 16-1**
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	15398	15143	14899	14630	14637	15096	14093	
	1.0 Hz	10586	10620	10329	10306	10103	10381	9817	
	0.1 Hz	6840	6604	6764	6727	6680	7074	6075	
	10.0 Hz	14492	14455	14283	14255	13803	14933	13581	
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	9441	9711	9098	10238	9274	9513		
	1.0 Hz	5424	5776	4867	6005	5510	5425		
	0.1 Hz	3013	3196	2852	3445	3078	3137		
	10.0 Hz	9944	10109	9238	9875	9430	9331		
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	5734	5793	5712	5835	5753	5605		
	1.0 Hz	2866	2851	2794	2929	2879	2766		
	0.1 Hz	1498	1546	1458	1609	1594	1439		
	10.0 Hz	5916	5873	5827	5975	6008	5763		
		REU 05-2	**REU 06-2**	**REU 07-2**	**REU 09-2**	**REL 10-2**	**REL 11-2**	**REL 12-2**	**REL 16-2**
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	16123	14144	15214	14156	10570	12506	9819	11434
	1.0 Hz	10895	9466	10034	9858	6902	8490	6312	7947
	0.1 Hz	7182	5892	6589	5913	4316	5571	3763	4913
	10.0 Hz	15666	14208	14619	13340	10261	12248	9241	11791
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	10802	9706	10468	10759	6944	8960	6917	
	1.0 Hz	6101	5415	6113	6219	3788	5218	3755	
	0.1 Hz	3457	2779	3568	3725	2117	2991	2137	
	10.0 Hz	10965	9430	10558	10453	7038	8975	7040	
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	6533	6268	6840	6814	5395	5891	4382	
	1.0 Hz	3159	3117	3409	3449	2755	2959	2163	
	0.1 Hz	1533	1740	1919	1677	1374	1359	1227	
	10.0 Hz	6622	6481	6968	7075	5299	5944	4484	

Tab. 4 *Steifigkeitsmodul der getestete Prüfkörper nach Spaltzugtests, System A Bohrkerne*

		Specimen					
	Freq.	**SAU 05-1**	**SAU 08-1**	**SAU 09-1**	**SAL 10-1**	**SAL11-1**	**SAL 12-1**
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	8846	14633	15423	14946	14171	14797
	1.0 Hz	6372	9629	10478	9752	9942	9756
	0.1 Hz	4604	5996	6818	6334	6341	6127
	10.0 Hz	8990	14653	15234	14977	14279	13867
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	9250	9003	10310	9684	8812	8830
	1.0 Hz	5081	4985	5598	5180	4726	4741
	0.1 Hz	2712	2559	2771	2594	2262	2232
	10.0 Hz	8938	9003	9765	9283	8453	8977
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	5157	5075	5791	4784	4873	-
	1.0 Hz	2405	2564	2816	2123	2259	-
	0.1 Hz	1391	1045	1456	1163	1142	-
	10.0 Hz	5242	5232	5631	4941	4986	-
		SAU 05-2	**SAU 08-2**	**SAU 09-2**	**SAL 10-2**	**SAL 11-2**	**SAL 12-2**
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	9760	15420	15885	12595	12957	12289
	1.0 Hz	6508	10588	10692	8225	8311	8082
	0.1 Hz	4136	6823	6644	4819	4976	4502
	10.0 Hz	9195	15640	15524	12368	12553	12106
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	10630	9990	10198	9223	8408	8410
	1.0 Hz	6053	5154	5775	5189	4629	4607
	0.1 Hz	3304	2715	3184	2654	2501	2589
	10.0 Hz	10578	9316	10146	8846	8247	8441
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	6212	5738	7127	5324	5362	5059
	1.0 Hz	2920	2603	3576	2425	2518	2388
	0.1 Hz	1289	1395	2010	1270	1340	1325
	10.0 Hz	6395	6062	7208	5384	5282	5066

Tab. 5 *Steifigkeitsmodul der getestete Prüfkörper nach Spaltzugtests, System B Bohrkerne*

		Specimen					
	Freq.	**SBU 05-1**	**SBU 06-1**	**SBU 07-1**	**SBL 10-1**	**SBL11-1**	**SBL 12-1**
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	15'833	14'738	13'751	11'955	13'421	12'982
	1.0 Hz	10'937	10'279	9'150	7'697	9'081	8'980
	0.1 Hz	7'435	6'513	5'904	4'395	5'941	5'264
	10.0 Hz	15'840	14'077	12'387	11'567	13'335	13'034
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	10'292	10'242	9'209	8'382	9'304	8'988
	1.0 Hz	5'998	6'084	5'548	4'661	5'509	5'084
	0.1 Hz	3'154	3'550	2'989	2'325	2'878	2'741
	10.0 Hz	10'375	9'959	9'288	8'388	9'362	9'003
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	6'321	6'043	5'550	4'687	5'721	4'965
	1.0 Hz	3'151	3'048	2'809	2'251	2'873	2'448
	0.1 Hz	1'444	1'496	1'379	909	1'787	1'112
	10.0 Hz	6'353	6'052	5'841	4'732	5'769	4'978
		SBU 05-2	**SBU 06-2**	**SBU 07-2**	**SBL 10-2**	**SBL 11-2**	**SBL 12-2**
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	16'715	17'476	17'053	11'272	13'673	12'829
	1.0 Hz	11'104	11'462	10'960	7'822	9'377	8'666
	0.1 Hz	6'968	6'657	6'296	5'013	5'825	5'657
	10.0 Hz	16'720	17'287	16'345	11'361	13'390	12'229
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	11'358	11'439	11'696	8'664	9'386	9'648
	1.0 Hz	6'403	6'273	6'413	5'129	5'408	5'685
	0.1 Hz	3'116	3'444	3'342	2'911	2'804	3'079
	10.0 Hz	11'330	11'463	11'125	8'542	9'174	9'478
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	6'443	6'386	6'562	6'155	5'718	5'771
	1.0 Hz	2'923	2'961	3'105	3'151	2'732	2'868
	0.1 Hz	1'308	1'541	1'452	1'570	1'386	1'454
	10.0 Hz	6'531	6'530	6'574	6'040	5'922	5'768

***Tab. 6** Steifigkeitsmodul der getestete Prüfkörper nach Spaltzugtests, System C Bohrkerne*

		Specimen					
	Freq.	**SCU 05-1**	**SCU 06-1**	**SCU 07-1**	**SCL 10-1**	**SCL11-1**	**SCL 12-1**
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	14'608	14'504	13'821	12'832	14'700	13'000
	1.0 Hz	9'676	9'861	10'099	10'583	10'335	9'678
	0.1 Hz	6'112	6'339	6'339	6'804	6'771	6'682
	10.0 Hz	13'846	13'693	13'130	13'019	13'917	12'898
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	8'903	9'917	10'014	10'169	9'512	8'830
	1.0 Hz	4'689	5'672	5'724	6'029	5'563	5'444
	0.1 Hz	2'326	2'943	3'055	3'438	2'842	3'316
	10.0 Hz	9'048	9'826	9'992	9'873	9'243	8'871
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	5'312	5'549	5'787	5'817	5'797	5'423
	1.0 Hz	2'536	2'729	2'809	2'808	2'893	2'839
	0.1 Hz	1'284	1'295	1'412	1'540	1'558	1'458
	10.0 Hz	5'381	5'654	5'991	5'968	6'067	5'534
		SCU05-2	SCU06-2	SCU07-2	SCL10-2	SCL11-2	SCL12-2
Temp: 5 °C	**10.0 Hz**	17'309	17'727	17'451	15'266	14'596	12'024
	1.0 Hz	11'059	11'695	11'494	10'383	9'502	7'790
	0.1 Hz	6'843	7'476	7'261	6'869	6'100	5'101
	10.0 Hz	16'502	16'845	16'508	15'095	14'420	11'473
Temp: 15 °C	**10.0 Hz**	11'339	11'351	10'855	9'764	9'814	8'841
	1.0 Hz	6'113	6'129	5'710	5'458	5'370	4'976
	0.1 Hz	2'884	2'850	2'821	2'832	2'637	2'543
	10.0 Hz	10'936	10'756	10'773	9'730	9'468	8'561
Temp: 25 °C	**10.0 Hz**	6'350	6'556	6'168	6'185	5'871	5'052
	1.0 Hz	2'916	3'007	2'821	2'952	2'853	2'449
	0.1 Hz	1'420	1'541	1'355	1'380	1'296	1'322
	10.0 Hz	6'585	6'597	6'269	6'304	5'984	5'230

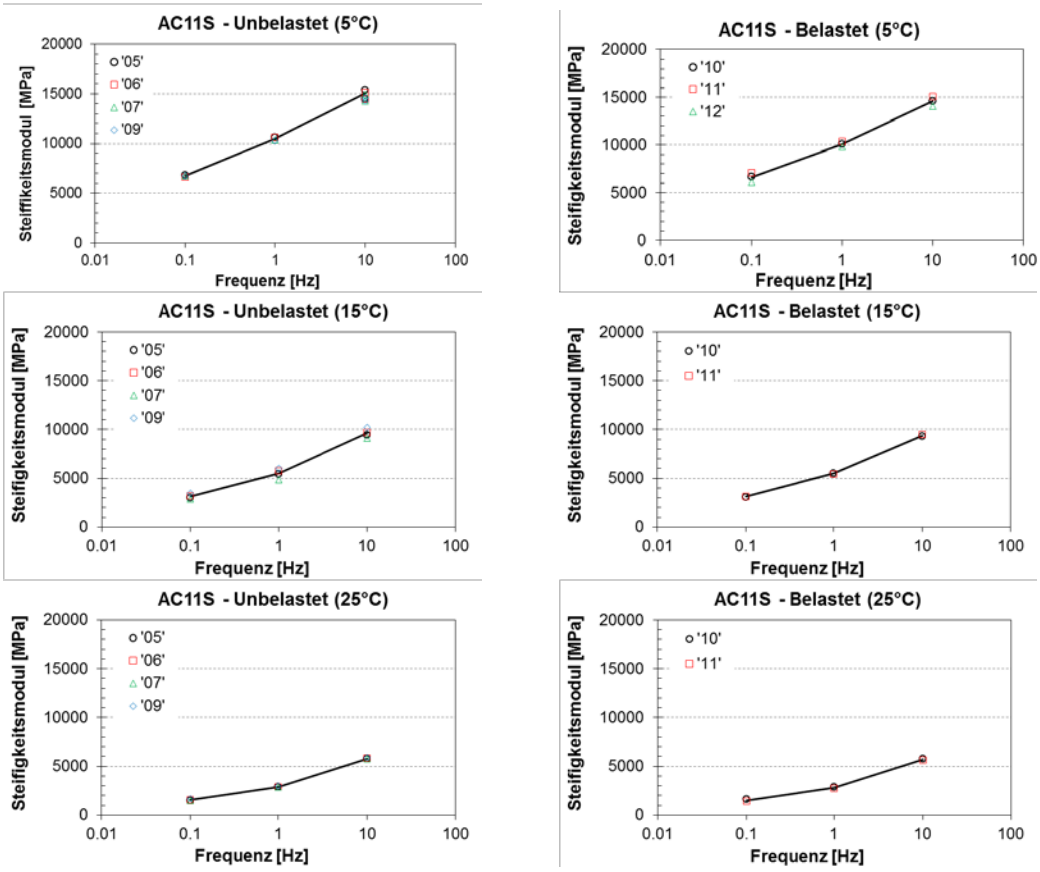


Abb. 5 *Steifigkeitsmodul des Referenzfelds gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S*

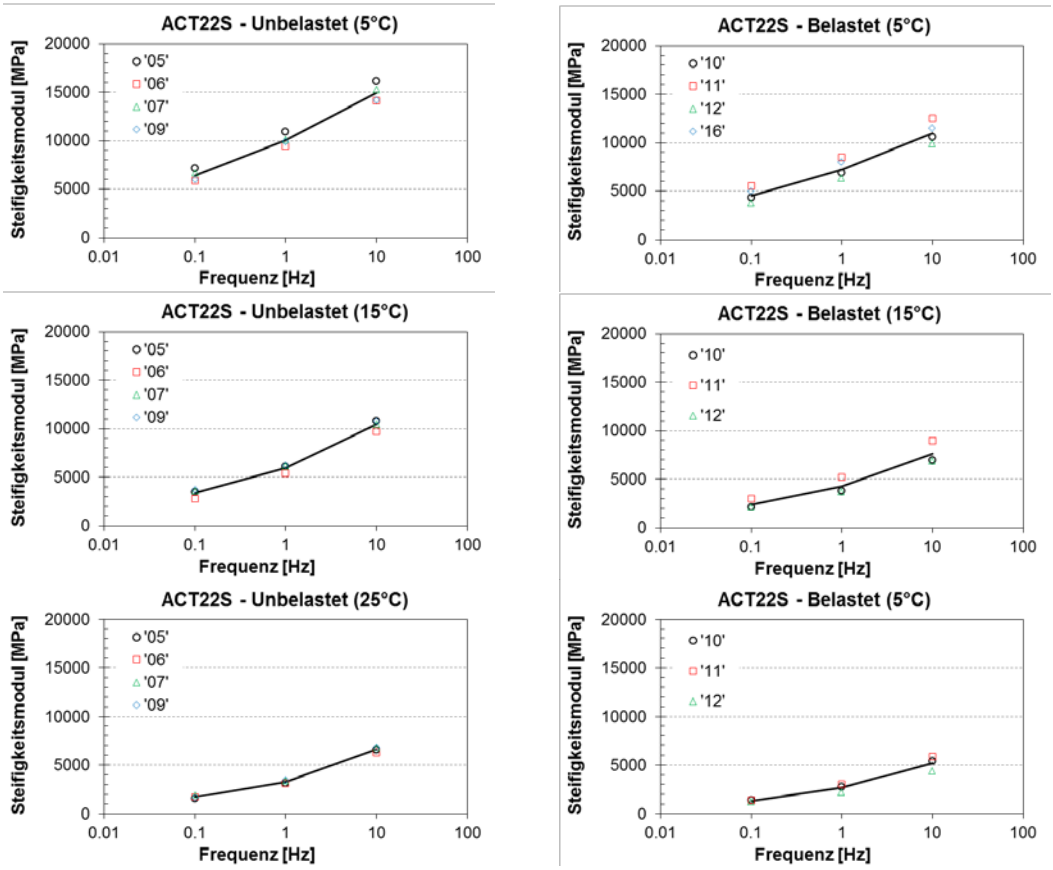


Abb. 6 *Steifigkeitsmodul des Referenzfelds gemessen an Bohrkernen aus der Tragschicht AC 22 S*

IV.1 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems A im belasteten und unbelasteten Bereich

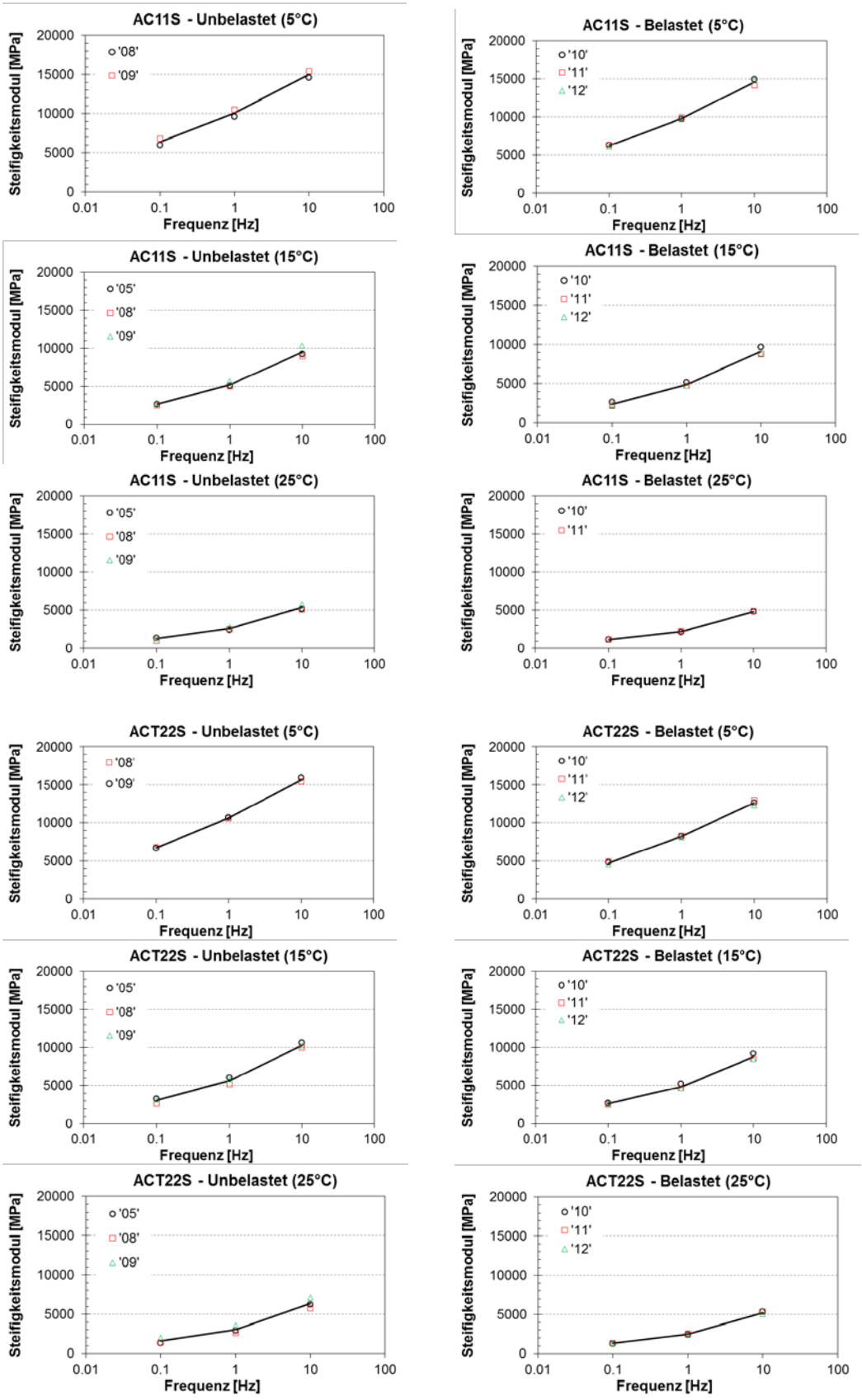


Abb. 7 *Steifigkeitsmodul des Systems A gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S und der Tragschicht AC 22 S*

IV.2 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des System B im belasteten und unbelasteten Bereich

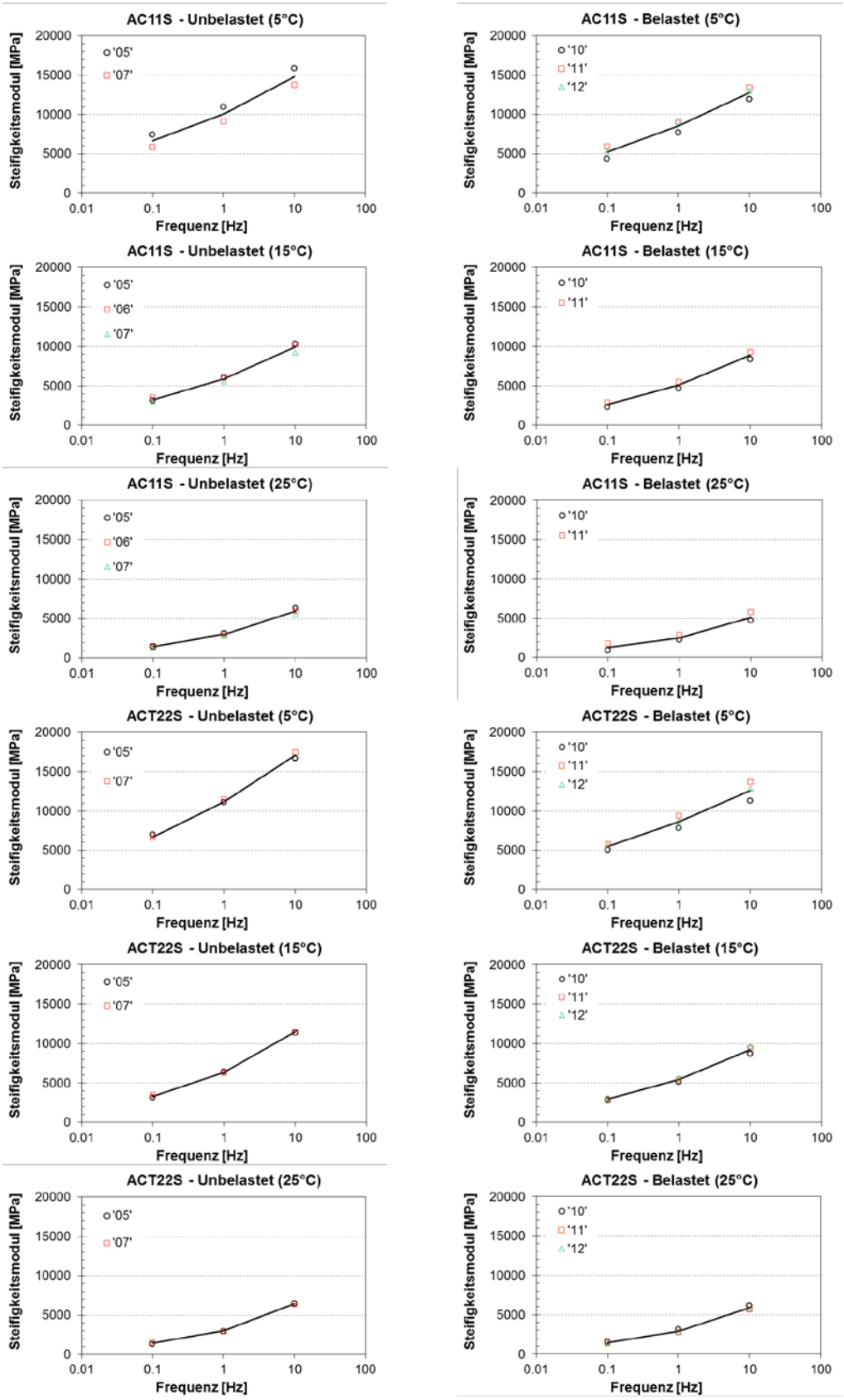


Abb. 8 *Steifigkeitsmodul des Systems B gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S und der Tragschicht AC 22 S*

IV.3 Steifigkeitsmodul der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems C im belasteten und unbelasteten Bereich

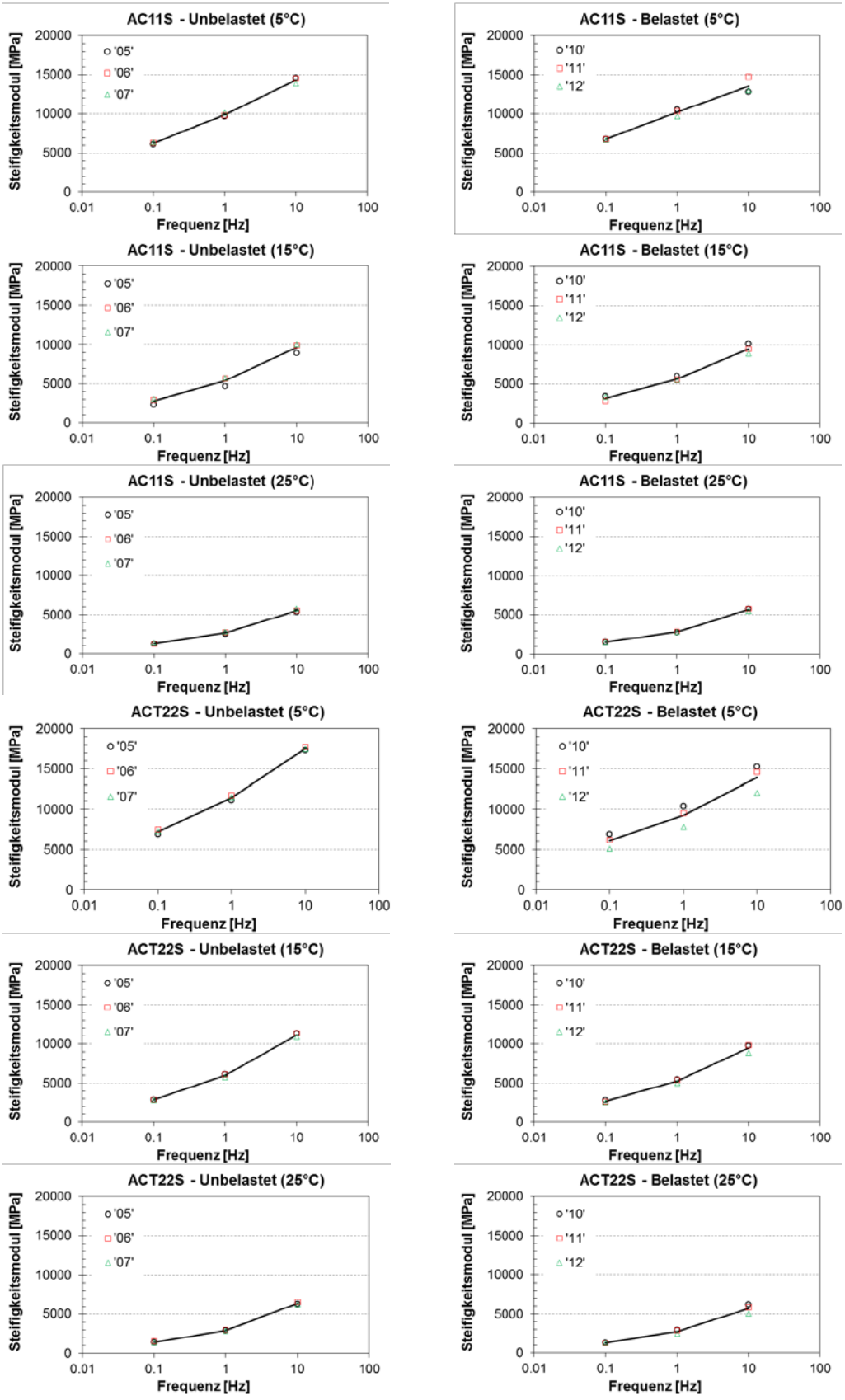


Abb. 9 *Steifigkeitsmodul des Systems B gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S und der Tragschicht AC 22 S*

IV.4 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S, des Referenzfelds

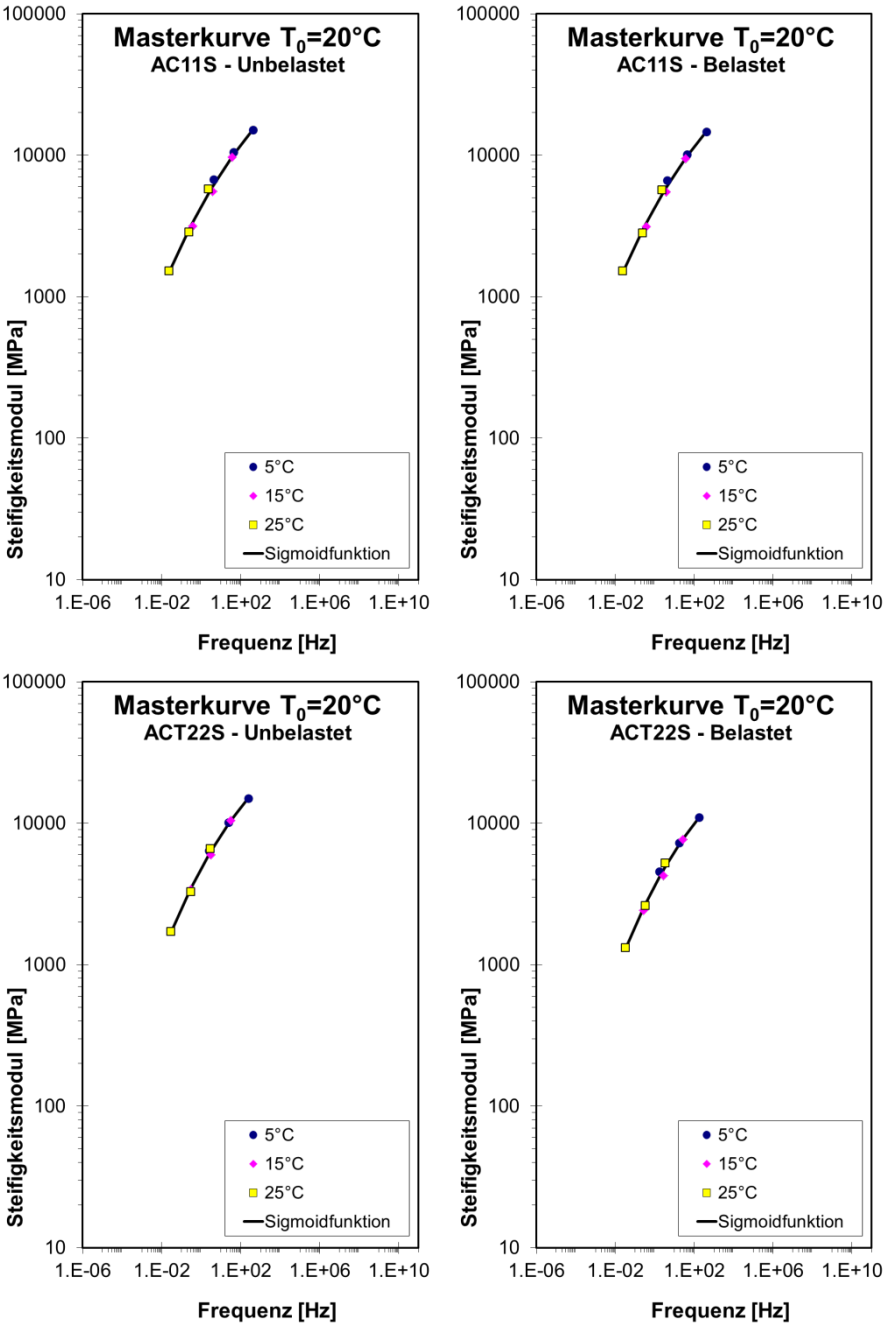


Abb. 10 *Masterkurven des Referenzfelds gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S und der Tragschicht AC 22 S*

IV.5 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems A

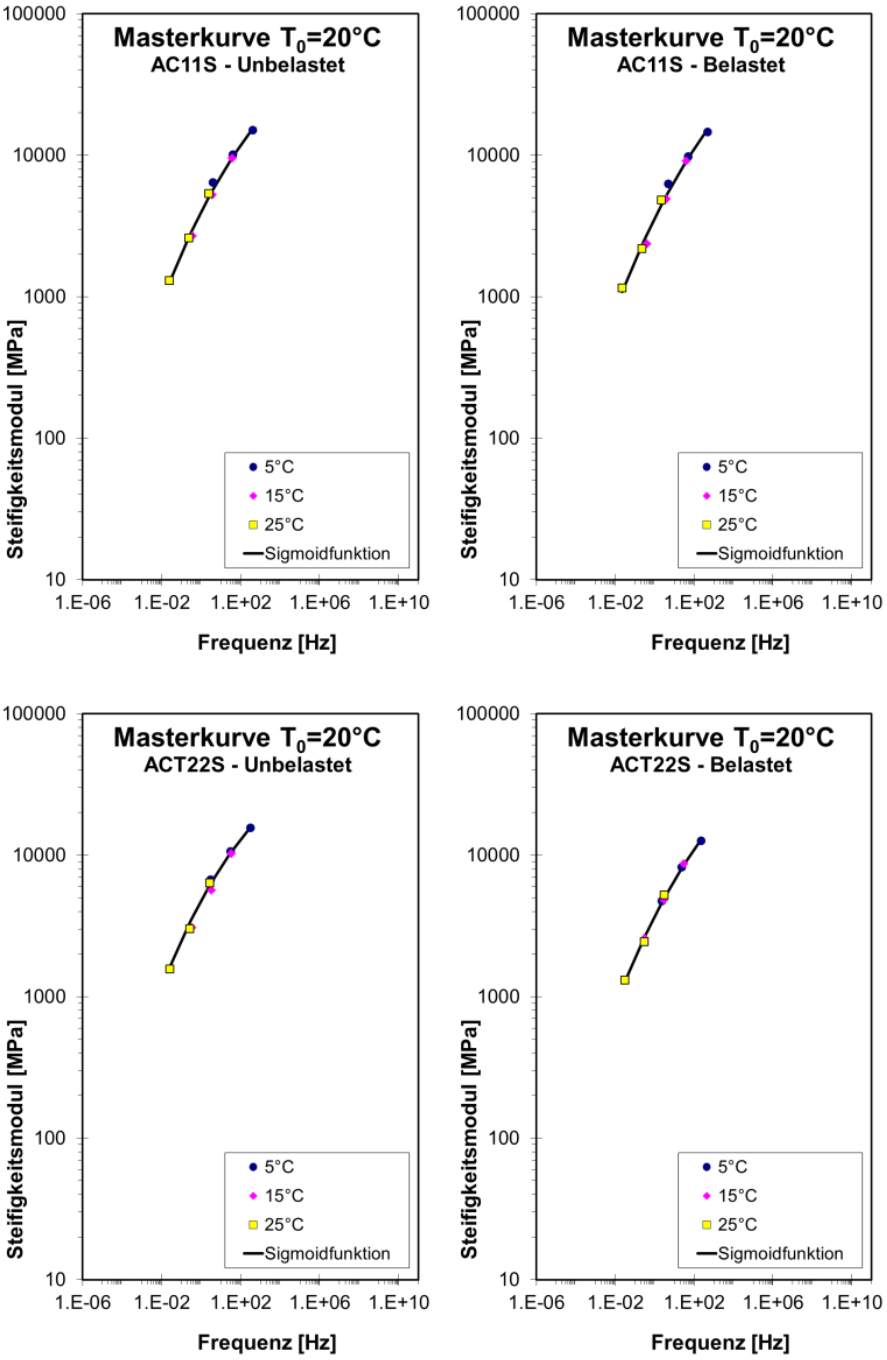


Abb. 11 *Masterkurven des Systems A gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S und der Tragschicht AC 22 S*

IV.6 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems B

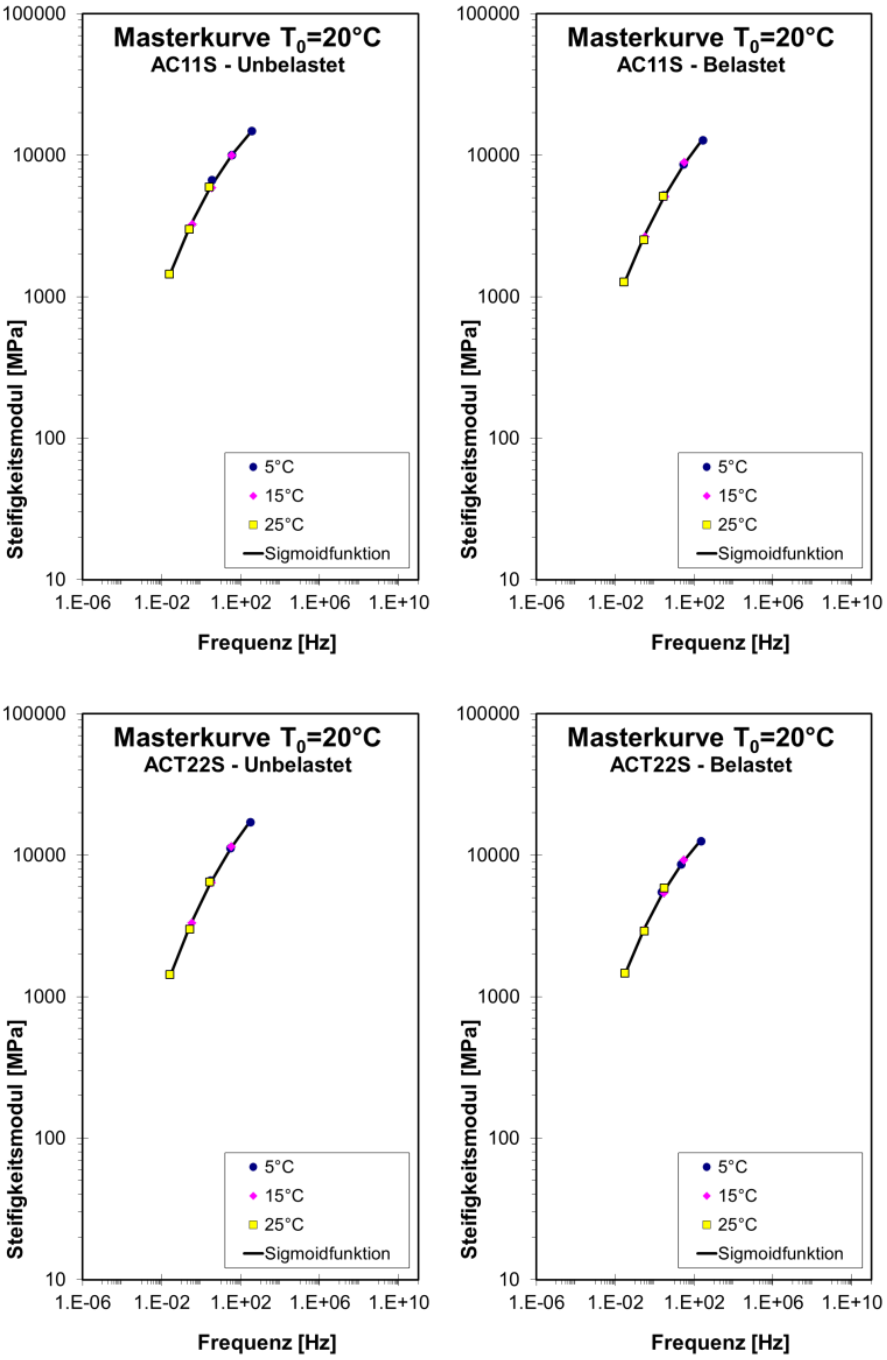


Abb. 12 *Masterkurven des Systems B gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S und der Tragschicht AC 22 S*

IV.7 Masterkurven der Bohrkerne aus AC 11S und AC T 22S des Systems C

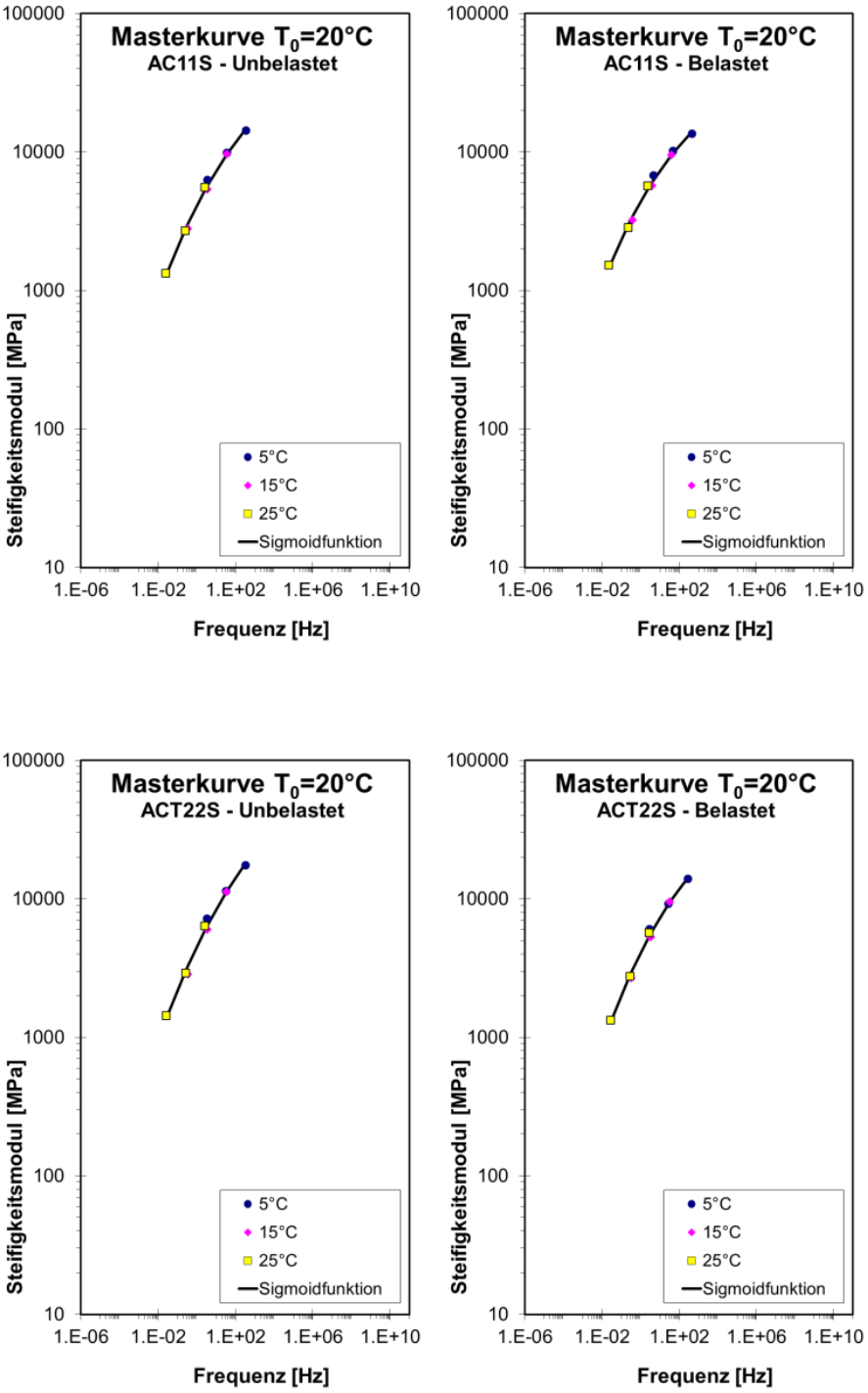


Abb. 13 *Masterkurven des Systems C gemessen an Bohrkernen aus der Deckschicht AC 11 S und der Tragschicht AC 22 S*

V Falling Weight Deflectometer

V.1 Temperatur

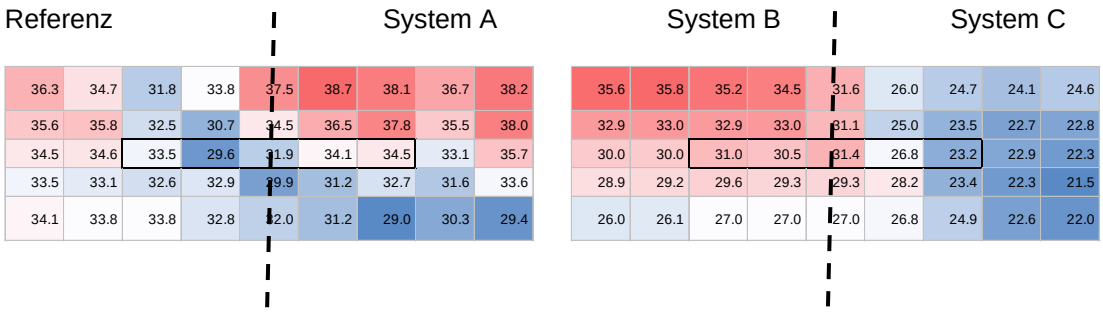


***Abb. 14** Temperaturmessung während FWD Tests*

V.2 Maximale Deflektion

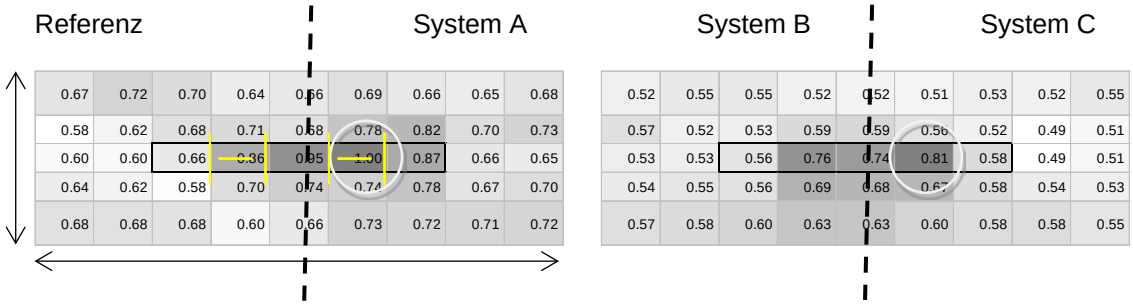


***Abb. 15** Maximale Deflektionen während FWD Tests*

V.3 Rückgerechnete elastische Module

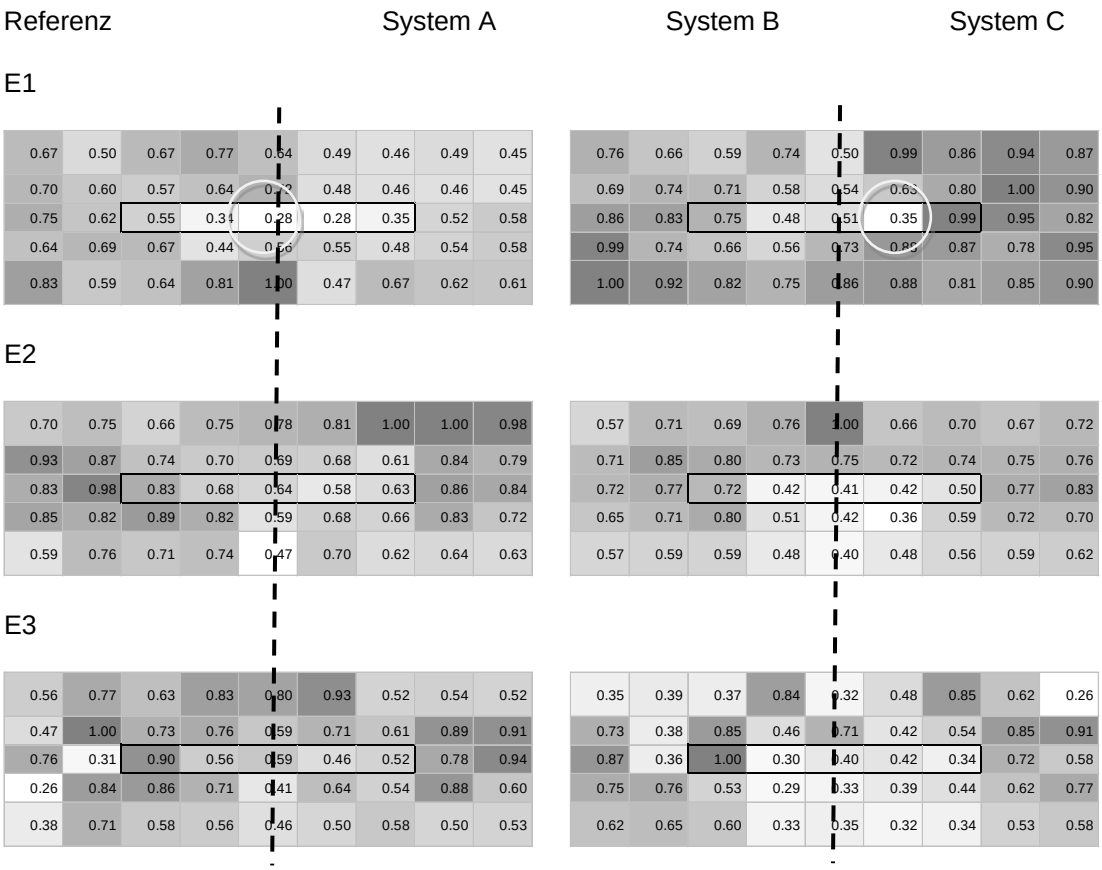


Abb. 16 *Rückgerechnete elastische Module*

VI Bilder der visuellen Beurteilung

VI.1 Testfeld 1

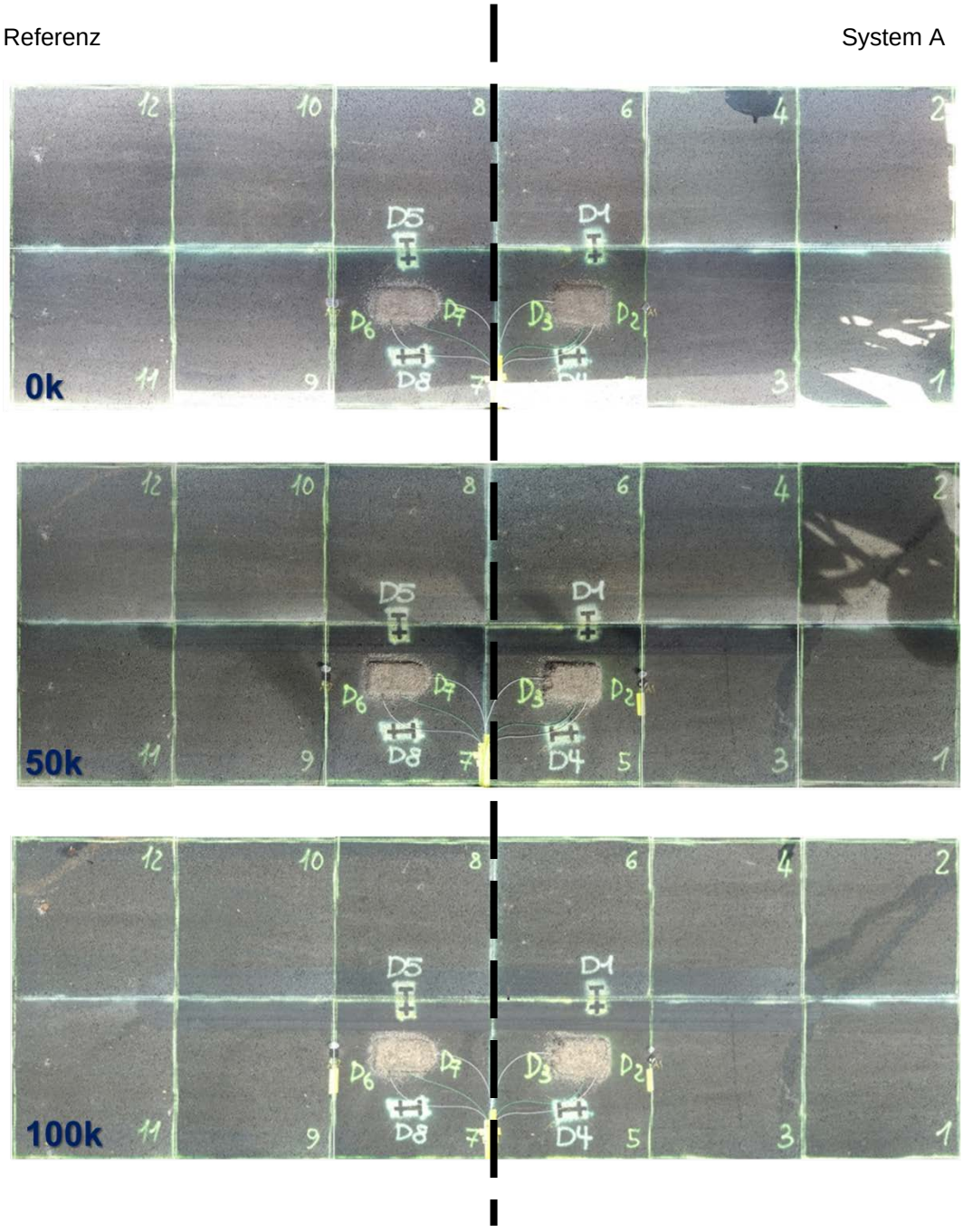


Abb. 17 *Belagsoberfläche in Testfeld 1 vor Belastung und nach 50000 und 100000 Überrollungen*

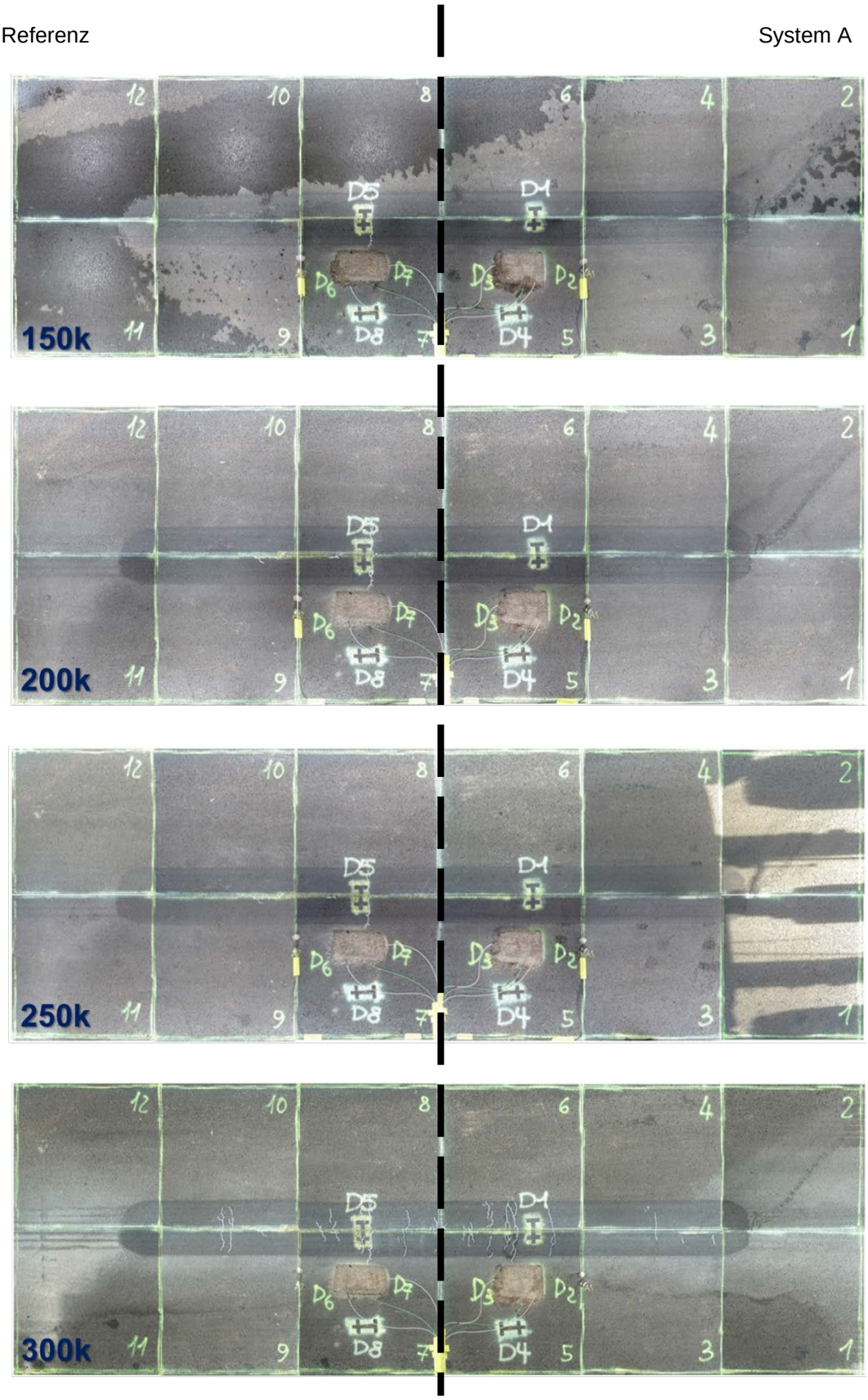


***Abb. 18** Belagsoberfläche in Testfeld 1 nach 150000, 200000, 250000 und 300000 Überrollungen*

VI.2 Testfeld 2

System B System C

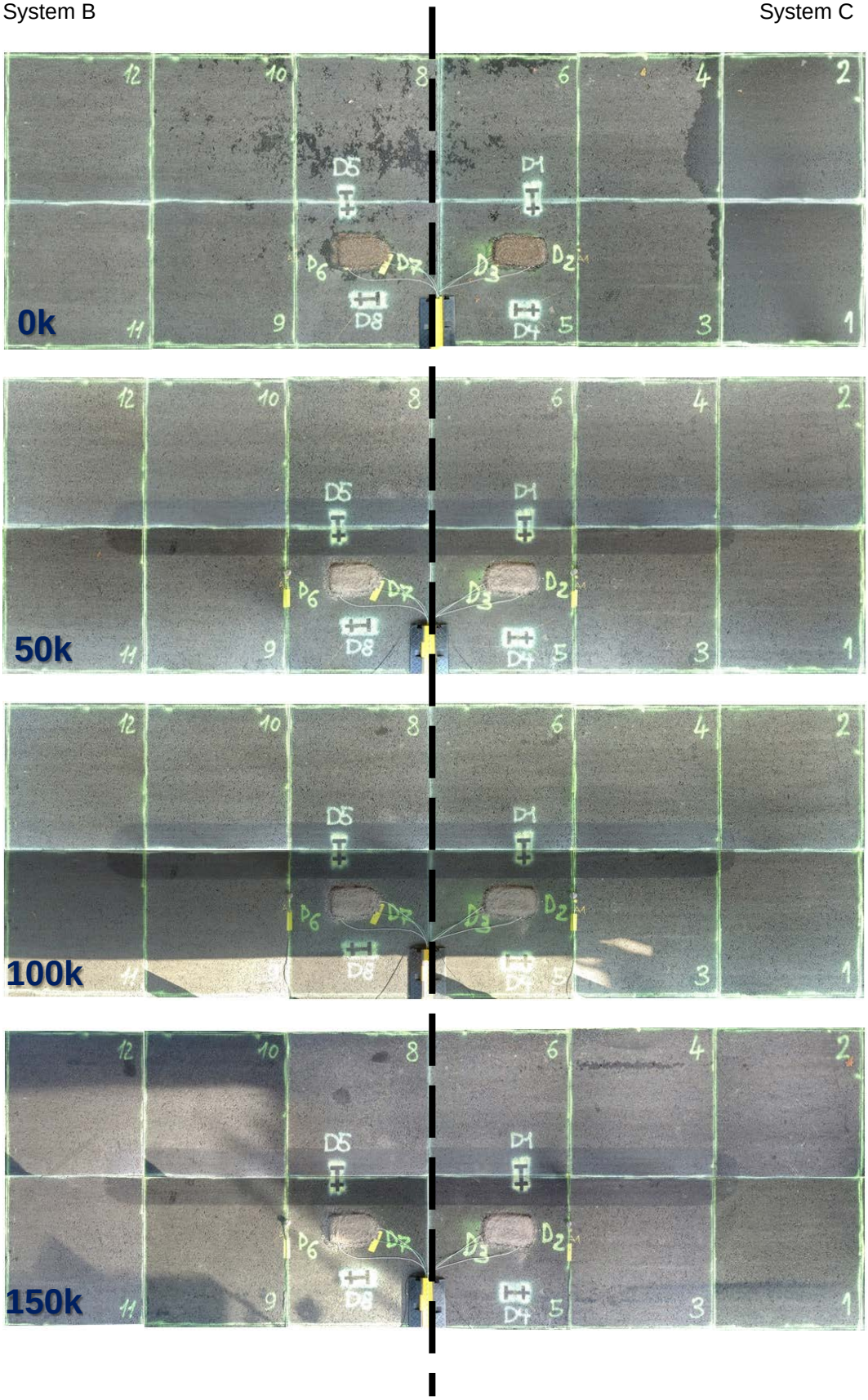


Abb. 19 *Belagsoberfläche in Testfeld 2 vor Belastung und nach 50000 und 100000 Überrollungen*

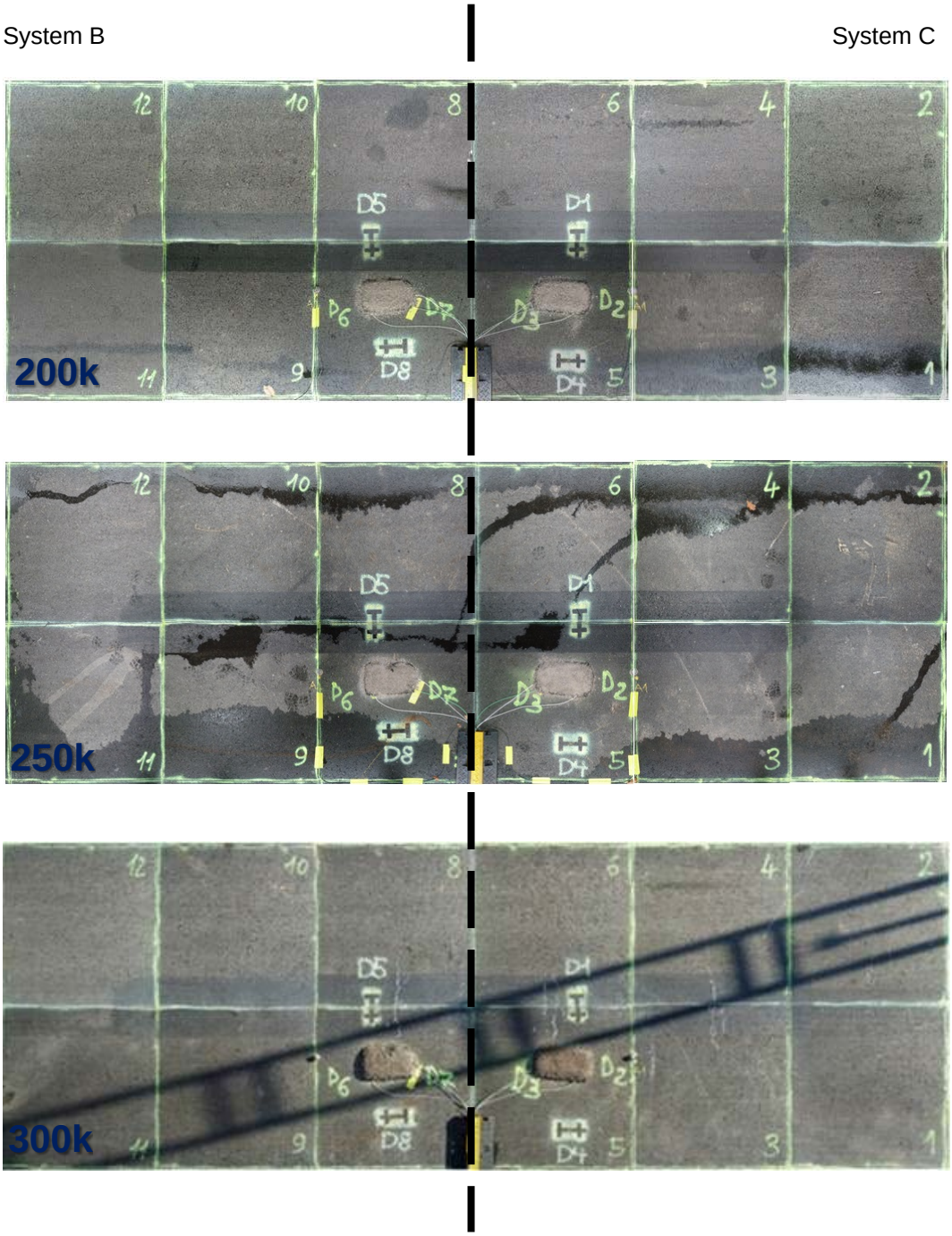
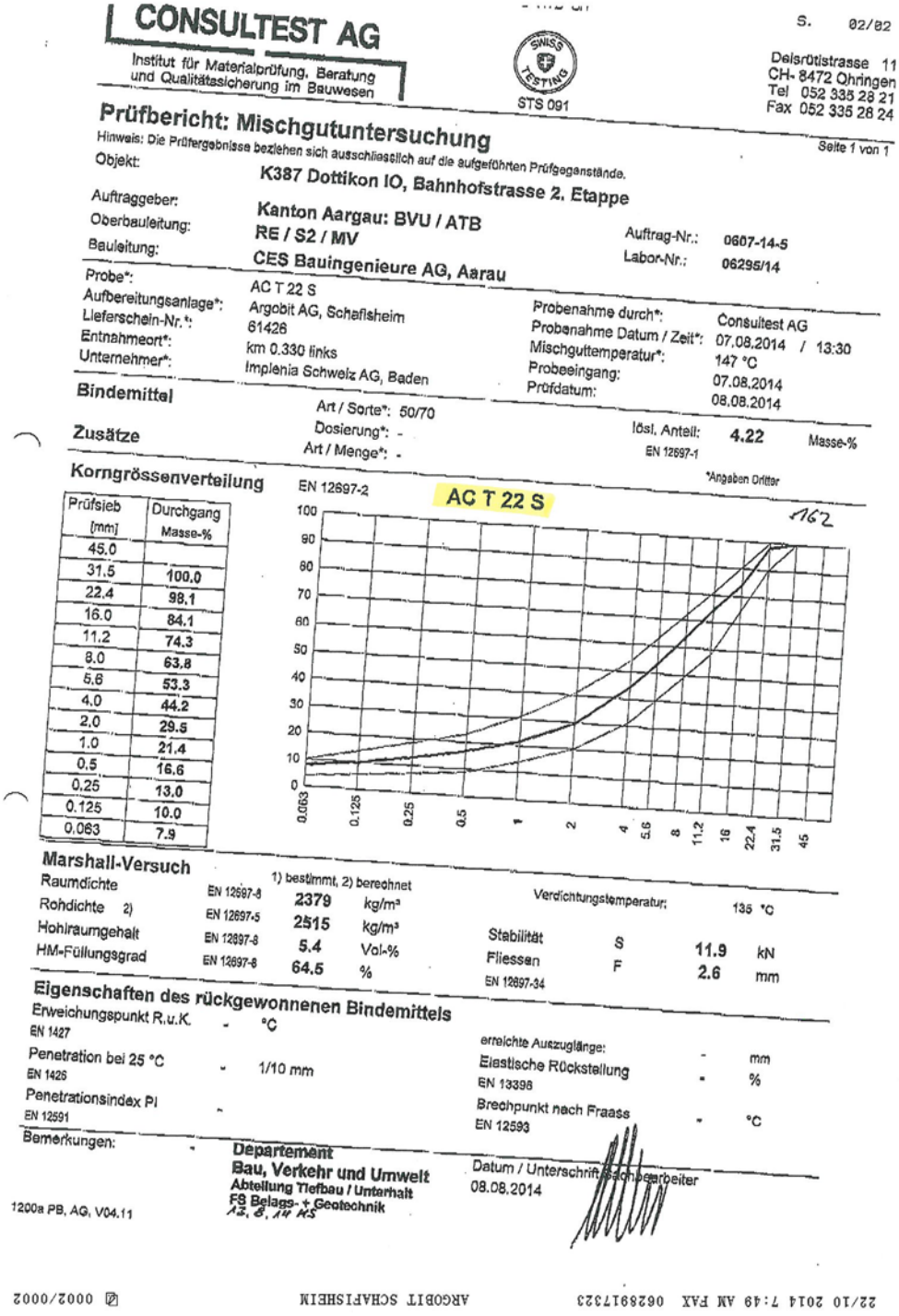


Abb. 20 *Belagsoberfläche in Testfeld 1 nach 150000, 200000, 250000 und 300000 Überrollungen*

VII Material für in-situ Testfelder

VII.1 Mischgutuntersuchung AC T 22S



CONSULTEST AG
Institut für Materialprüfung, Beratung und Qualitätssicherung im Bauwesen
STS 091
S. 02/02
Deisrütistrasse 11
CH- 8472 Ohringen
Tel 052 335 28 21
Fax 052 335 28 24

Prüfbericht: Mischgutuntersuchung
Seite 1 von 1

Hinweis: Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die aufgeführten Prüfgegenstände.

Objekt: K387 Dottikon IO, Bahnhofstrasse 2, Etappe
Auftraggeber: Kanton Aargau: BVU / ATB
Oberbauleitung: RE / S2 / MV
Bauleitung: CES Bauingenieure AG, Aarau
Auftrag-Nr.: 0607-14-5
Labor-Nr.: 06295/14

Probe*:	AC T 22 S		
Aufbereitungsanlage*:	Argobit AG, Schafisheim	Probenahme durch*:	Consultest AG
Lieferschein-Nr.*:	61426	Probenahme Datum / Zeit*:	07.08.2014 / 13:30
Entnahmeort*:	km 0.330 links	Mischguttemperatur*:	147 °C
Unternehmer*:	Implenia Schweiz AG, Baden	Probeeingang:	07.08.2014
		Prüfdatum:	08.08.2014

Bindemittel Art / Sorte*: 50/70
Zusätze Dosierung*: - Art / Menge*: -
lösl. Anteil: 4.22 Masse-% EN 12697-1
*Angaben Dritter

Korngrössenverteilung EN 12697-2 AC T 22 S

Prüfsieb [mm]	Durchgang Masse-%
45.0	
31.5	100.0
22.4	98.1
16.0	84.1
11.2	74.3
8.0	63.8
5.6	53.3
4.0	44.2
2.0	29.5
1.0	21.4
0.5	16.6
0.25	13.0
0.125	10.0
0.063	7.9

Marshall-Versuch 1) bestimmt, 2) berechnet

Raumdichte	EN 12697-6	2379	kg/m³	Verdichtungstemperatur:		135 °C
Rohdichte 2)	EN 12697-5	2515	kg/m³			
Hohlraumgehalt	EN 12697-8	5.4	Vol-%	Stabilität	S	11.9 kN
HM-Füllungsgrad	EN 12697-8	64.5	%	Fliessen EN 12697-34	F	2.6 mm

Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels

Erweichungspunkt R.u.K. EN 1427	-	°C	erreichte Auszuglänge: - mm
Penetration bei 25 °C EN 1426	-	1/10 mm	Elastische Rückstellung EN 13398 - %
Penetrationsindex PI EN 12591	-		Brechpunkt nach Fraass EN 12593 - °C

Bemerkungen: -

Département Bau, Verkehr und Umwelt
Abteilung Tiefbau / Unterhalt
FB Belags- + Geotechnik

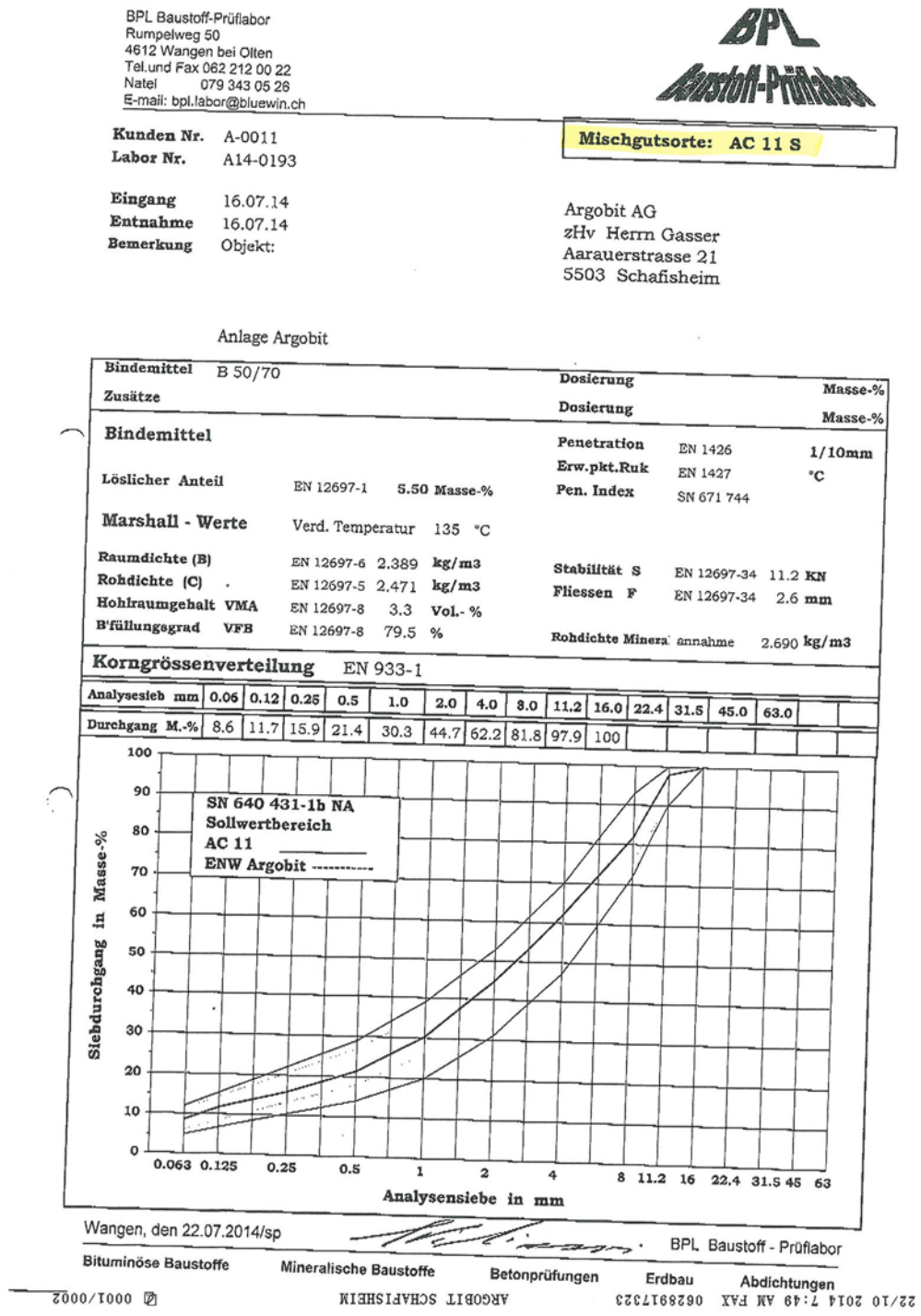
Datum / Unterschrift Sachbearbeiter
08.08.2014

1200a PB, AG, V04.11

22/10 2014 7:49 AM FAX 062891723 ARGOBIT SCHAFISHEIM 0002/0002

Abb. 21 *Materialuntersuchung ACT22S*

VII.2 Mischguntersuchung AC 11 S



BPL Baustoff-Prüflabor
Rumpelweg 50
4612 Wangen bei Olten
Tel.und Fax 062 212 00 22
Natel 079 343 05 26
E-mail: bpl.labor@bluewin.ch

Kunden Nr. A-0011
Labor Nr. A14-0193

Mischgutsorte: AC 11 S

Eingang 16.07.14
Entnahme 16.07.14
Bemerkung Objekt:

Argobit AG
zHv Herrn Gasser
Aarauerstrasse 21
5503 Schafisheim

Anlage Argobit

Bindemittel	B 50/70		**Dosierung**		Masse-%
Zusätze			**Dosierung**		Masse-%
Bindemittel			**Penetration**	EN 1426	1/10mm
			Erw.pkt.Ruk	EN 1427	°C
Löslicher Anteil	EN 12697-1	5.50 Masse-%	**Pen. Index**	SN 671 744	
Marshall - Werte	Verd. Temperatur	135 °C			
Raumdichte (B)	EN 12697-6	2.389 kg/m3	**Stabilität S**	EN 12697-34	11.2 KN
Rohdichte (C)	EN 12697-5	2.471 kg/m3	**Fliessen F**	EN 12697-34	2.6 mm
Hohlraumgehalt VMA	EN 12697-8	3.3 Vol.-%			
B'füllungsgrad VFB	EN 12697-8	79.5 %	**Rohdichte Minera**	annahme	2.690 kg/m3

Korngrössenverteilung EN 933-1

Analysesieb mm	0.06	0.12	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	11.2	16.0	22.4	31.5	45.0	63.0
Durchgang M.-%	8.6	11.7	15.9	21.4	30.3	44.7	62.2	81.8	97.9	100				

Wangen, den 22.07.2014/sp BPL Baustoff - Prüflabor

Bituminöse Baustoffe · Mineralische Baustoffe · Betonprüfungen · Erdbau · Abdichtungen

22/10 2014 7:49 AM FAX 062891732 ARGOBIT SCHAFISHEIM 0001/0002

***Abb. 22** Materialuntersuchung AC11S*

Glossar

Begriff	Bedeutung
AASHTO	American Association of State and Highway Transportation Officials, US.
AC	Asphaltbeton (Asphalt concrete)
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
DSR	Dynamisches Scherrheometer
DSV	Druckschwellversuch
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
ERK	Erweichungspunkt Ring und Kugel
ITSR	Indirect tensile strength ratio, Kennwert für die Wasserempfindlichkeit
ITT	Indirekter Zugversuch
MMLS3	Modell Mobiler Verkehrslastsimulator
MLS10	Mobiler Verkehrslastsimulator
PK	Prüfkörper
PmB	Polymerhaltiges Bitumen
RAP	Ausbauasphalt oft auch Recyclingasphaltgranulat (Reclaimed Asphalt Pavement)
RILEM	International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures
SN	Schweizer Norm
Stabw.	Standardabweichung
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

[1] H.P. Lindenmann , D. Jacobs, F. Schiffmann, C. Raab und M.N. Partl (2009), „**Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement**“, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, VSS 2007/702, Bericht Nr 1297

[2] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2006), **„Bestimmung des Schichtenverbunds (nach Leutner)“**, SN 670 641

[3] Raab, C., & Partl, M. N. (1999). **Methoden zur Beurteilung des Schichtenverbunds von Asphaltbelägen** FA 12/94. Report No. 442. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Bern.

[4] Raab, C., Partl, M. N., & Abd El Halim, A. O. (2009). **Evaluation of interlayer shear bond devices for asphalt pavements**. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4*, 176–195.

[5] MLS Test Systems Pty Ltd. (2002) **“MMLS3 Traffic Simulator Operator’s Manual”**, Stellenbosch, South Africa

[6] C. Raab, M.N. Partl, K. Jenkins, und F. Hugo (2005), **“Determination of Rutting and Water Susceptibility of Selected Pavement Materials using MMLS3”**, Proceeding of the 7th Internat. Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRA’05, Trondheim

[7] M. Arraigada, A. Pugliessi , M.N. Partl und F. Martínez (2014), **“Effect of full-size and down scale accelerated traffic loading on pavement behavior”**, Materials and Structures, 47, pp. 1409-1424

[8] M.N. Partl, S. Hean und L. Poulikakos (2002), **“Asphalt Plug Joint Characterization and Performance Evaluation”**, Proceedings of 9th int. Conference on Asphalt Pavements, ISAP, 17..22. August, Copenhagen

[9] M.N. Partl, K. Sokolov & H. Kim (2008), **“Evaluating and Modelling the Effect of Carbon Fiber Grid Reinforcement in a Model Asphalt Pavement**”, Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), 22-24July 2008, Zurich, Switzerland

[10] C. Raab und M.N. Partl (2011), **“Stripping bei lärmmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormaßstab”**, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, VSS 2007/502, Bericht Nr. 1335

[11] K. Sokolov (2007), **“Laboruntersuchungen an unterschiedlich verstärkten Asphaltschichten”**, Tagung Asphaltverstärkungen mit Einlagen. Erfahrungen und Perspektiven, 15 Mai 2007, Dübendorf

[12] Arraigada, M., L.D., Partl, M.N., Kato, H., Pugliessi, A., Treuholz, A. (2014), **“Performance-Calibration of the Novel Full-Scale testing Machine MLS10 for Accelerated Traffic Simulation on Swiss Roads”**, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, ASTRA 2007/11 und ASTRA2010/005OBF, Bericht Nr. 1432

[13] M. Arraigada, A. Treuholz und M.N. Partl (2014), **“Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10“**, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, ASTRA 2011/004, Bericht Nr. 1462

[14] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **“ Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt“**, SN 670 401, EN 12697-1

[15] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), **“ Asphalt - Prüfverfahren - Teil 2: Korngrößenverteilung“** , SN 670 402, EN 12697-2

[16] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2012), **“Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt -Teil 5: Bestimmung der Rohdichte“**, SN 670 405, EN 12697-5

[17] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **“Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern“**, SN 670 406, EN 12697-6

[18] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e.V., Köln FGSV (2009), **“Arbeitsanleitung zur Bestimmung , .des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgrösse in die Dimensionierung - AL Sp-Asphalt 09“**, ISBN 978-3-941790-06-

[19] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **“Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 29: Bestimmung der Maße von Asphalt-Probekörpern“**, SN 670 406, EN 12697-29

[20] G. Montestruque, L. Bernucci, M. Fritzen und L. Goretti da Motta (2012), **“Stress Relief Asphalt Layer and Reinforcing Polyester Grid as Anti-reflective Cracking Composite Interlayer System in Pavement Rehabilitation“**, A. Scarpas et al. (Eds.), 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, 4, 1189–1197

[21] ABAQUS Inc. 2014 ABAQUS analysis user’s manual, version 6.14

Projektabschluss

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 09.06.2017

Grunddaten

Projekt-Nr.:	ASTRA 2011/011_OBF
Projekttitel:	Einsatz von Asphalteinlagen im Erhaltungsmanagement von Trag- und Deckschichten
Enddatum:	13.07.2017

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Der Schichtenverbund konnte unter Laborbedingungen von allen Systemen erreicht werden.
In den durchgeführten Laboruntersuchungen erweisen sich alle Systeme mit Asphalteinlage mit Ausnahme des Systems mit SAMI bezüglich der Rissüberbrückung im Gebrauchszustand als dem unbewehrten System deutlich überlegen. Im Tieftemperaturbereich scheint die Rissüberbrückung dagegen auch für das unbewehrte System unkritisch zu sein. Insgesamt muss die Anzahl der pro System untersuchten Prüfkörper im Sinne einer statistischen Auswertung als zu gering betrachtet werden. Gerade im Hinblick auf die teilweise großen Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Prüfkörper ist es daher notwendig, weitere Untersuchungen durchzuführen.
Rissentstehung und -entwicklung unterschied sich deutlich zwischen Referenzfeld im Vergleich mit den Versuchsfeldern mit Bewehrung. Bei den Systemen mit Asphaltbewehrung waren die Risse erst nach fast doppelt so vielen Belastungszyklen an der Belagsoberfläche sichtbar. Die Anzahl Risse nach Abschluss der Belastungszyklen war zumindest in Systemen B und C deutlich geringer als im Referenzfeld. Neben diesen von der Belagsoberfläche ausgehenden Risse konnten auch an der Unterseite des Asphaltbelags (Tragschicht) festgestellt werden. Grundsätzlich zeigten sich aber keine Refelektionsrisse. Die Ergebnisse der Aalyse in Bezug auf Spurrinnenbildung muss davon ausgegangen werden, dass System A sich hier kontraproduktiv auswirkt und zu einer größeren Spurrinnentiefe führt als bei der Referenz. Auch in situ zeigt sich, dass Bewehrungseinlagen eine Trennschicht darstellen, die zu einer Beeinträchtigung des Schichtenverbunds führt. Die Werte des Schichtenverbundes nehmen durch die Belastung mit ab, was wahrscheinlich auf die extrem kanalisierte Belastung durch den MLS10 zurückzuführen ist. Vergleicht man die Schichthaftungswerte der in-situ- mit den Laboruntersuchungen, so sieht man deutliche Unterschiede, allerdings bleibt das in den Laboruntersuchungen ermittelte Ranking (System B höchste/System A niedrigste Verbundwerte) bestehen. Die an unterschiedlichen Positionen im Belagsaufbau durchgeführten kontinuierlichen Dehnungsmessungen zeigen für Referenz und alle Systeme ein ähnliches Verformungsbild unter Last. Es konnte eine stetige Zunahme der Dehnungsamplitude und damit eine Abnahme der Steifigkeit des Belags unter zyklische Belastung verzeichnet werden. Größtenteils hat die Referenz die höchsten Dehnungsamplitu- den, was darauf hinweist, dass die Asphalteinlagen zur Steifigkeit des Belagsaufbaus beitragen. Ähnliche Aussagen lassen sich auch für die Beschleunigungsmessungen machen. Die Messung der Tragfähigkeit bestätigen dies ebenfalls. Die Laborprüfungen an Bohrkernen und die forensische Untersuchungen sowie die Bestimmung der Steifigkeitsmodule zeigen eine Abnahme der Werte des Schichtenverbundes durch die Belastung, was wahrscheinlich auf die extrem kanalisierte Belastung durch den MLS10 zurückzuführen ist. Die FEM-Modellierung zeigte sich geeignet für Hinweise zur optimale Lage der Bewehrung und zur Lieferung von Dimensionierungsgrundlagen.
Sowohl Labor- als auch Feldversuche zeigen, dass Asphaltbewehrungen das Auftreten von Rissen verzögern und dadurch die Lebensdauer von Asphaltbelägen verlängern können. Sowohl im Labor- als auch im Feldversuch erweisen sich Asphaltbewehrungen (Systeme B und C) ohne SAMI als effektiver als solche mit SAMI. Labor- und Feldversuche zeigen, dass Bewehrungseinlagen eine Trennschicht darstellen, die zu einer Beeinträchtigung des Schichtenverbunds führen kann. Aufgrund der Feldversuche lässt sich jedoch folgern, dass bei sorgfältiger Arbeitsweise Schichthaftungswerte erreicht werden können, die den Normanforderungen entsprechen. Die Belastung durch den Verkehrslastsimulator MLS10 führt selbst bei sehr steifem Untergrund in kanalisierter Fahrweise rasch zu einer Schwächung des Schichtenverbundes. Dies zeigt, dass dem Schichtenverbund gerade auch hohe Bedeutung beigemessen werden muss, insbesondere, wenn das Risiko von Trennflächen vorliegt. Die durchgeführten Finite Element Berechnungen FEM geben Hinweise auf die optimale Lage der Bewehrung und können als Dimensionierungsgrundlage verwendet werden.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Ziel der Forschungsarbeit war, Erkenntnisse über die Wirksamkeit und Lebensdauer von Asphalteinlagen im Schichtensystem des Strassenoberbaus zu erhalten und Kriterien für eine Anwendungsüberprüfung neuer Produkte zu definieren, wobei die Themenbereiche Schub/Haftung, Rissüberbrückung, Steifigkeit/Verformung/Tragfähigkeit und Dimensionierungsgrundlagen besonders berücksichtigt werden sollten:

- Aussagen zu Schub/Haftung (Verbundkraft und -wirkung, zeitliche Entwicklung) konnten in umfassendem Mass gegeben werden
- Die Rissüberbrückung (Durchschlagen von Rissen, zeitliche Entwicklung) konnte im Labormassstab aufgezeigt werden
- Aussagen über Steifigkeit/Verformung/Tragfähigkeit konnten durch die gewählte Sensorik und anschliessender Auswertung umfassend aufgezeigt werden
- In Bezug auf Dimensionierungsgrundlagen ist weitere Forschung notwendig, da eine statistisch ausreichende Abstützung der Ergebnisse im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht realisiert werden konnte, jedoch konnte anhand einer Parameterstudie gezeigt werden, dass FEM Modellierung Hinweise zur optimale Lage der Bewehrung liefern und als Dimensionierungsgrundlage genutzt werden kann.

Damit konnten weitgehend alle Ziele der Forschungsarbeit erreicht werden. Es muss allerdings angemerkt werden, dass der finanzielle Rahmen dieser Forschungsziele als nicht ausreichend erachtet werden muss.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Ermittlung des Schichtenverbundes im Labor gibt Hinweise auf das in situ Verhalten, so zeigt sich etwa der negative Einfluss einer SAMI. Er ist aber als alleiniges Kriterium zur Systemauswahl nicht ausreichend und sollte generell an in situ Prüfkörpern bestimmt werden. Die Art und Weise des Aufbringens hat großen Einfluss auf den Schichtenverbund. Das Aufbringen einer SAMI hat dagegen eindeutig negative Einwirkungen auf den Schichtenverbund und sollte möglichst vermieden werden. Extreme und kanalisierte Verkehrsbelastung führt zu einer beschleunigten Schwächung des Schichtenverbunds; dies gilt besonders im Fall von Asphaltbewehrungen. Die Belastungsversuche mit dem MML33 erwiesen sich als sehr flexibel und gut anwendbar. Sie sind damit geeignet als Grundlage für eine Eignungsprüfung zur Auswahl und Überprüfung neuer Asphaltbewehrungssysteme. Allerdings muss die Prüfkörperanzahl erhöht werden, um die Aussage der Prüfung statistisch besser abzusichern. Teststrecken stellen immer eine gute Möglichkeit zur Bestimmung des Verhaltens von Asphaltbewehrungen dar. Allerdings ist bei in situ Versuchen zur Erzeugung von Reflektionsrissen und zur Herbeiführung eines strukturellen Versagens darauf zu achten, Teststrecken nicht zu stark zu dimensionieren. Wenn der Verbund gewährleistet ist, verringern Bewehrungseinlagen die Vertikalverformung der Asphaltkonstruktion und führen somit zu einer Erhöhung der Steifigkeit derselben. Durch das Wirken entgegen einer belastungsbezogenen Mikrorissbildung wird die Ermüdungsbeständigkeit einer Konstruktion erhöht und damit auch deren Tragfähigkeit. Eine quantitative Aussage zur Tragfähigkeitserhöhung des Oberbaus bleibt weiterhin offen. In der Schweiz werden bisher Asphaltbewehrungen im Bereich der Erhaltung eingesetzt ohne einen Dimensionierungshintergrund. Dimensionierungsansätze für den Strassenoberbau setzen statistisch abgestützte Grundlagen voraus, welche Inhalt weiterer Forschung darstellen sollten.

Publikationen:

Raab, C., M. Arraigada, F. Schiffmann und M. Partl (2017) Einsatz von Asphalteinlagen im Erhaltungsmanagement von Trag- und Deckschichten, ASTRA 2011/011, Schriftenreihe UVEK, Bern

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Raab Vorname: Christiane

Amt, Firma, Institut: Empa, Dübendorf

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

C. Raab

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Forschungsziele wurden in den wesentlichen Punkten erreicht. Labormethoden zur Prüfung und zum Vergleich von Asphalteinlagen wurden aufgezeigt und in ihrer Wirksamkeit beurteilt. Klar differenziert wurde auch im Vergleich von Labor- und Felduntersuchungen. Insbesondere zeigte sich die Wichtigkeit einer fachgerechten Applikation von Asphalteinlagen, wenn die gewünschte Wirkung erzielt werden soll. Die gefundenen Streuungen bei den Resultaten unterstrichen diesen Aspekt.
Die Wichtigkeit eines genügenden Schichtverbundes wurde dabei klar dargestellt, wie auch das Potenzial von Asphalteinlagen, die Entstehung und Ausbreitung von Rissen zu vermindern.

Umsetzung:

Die Erkenntnisse, z.b. bezüglich Prüfverfahren, können zur Eignungsprüfung und zum Vergleich von Asphalteinlagen genutzt werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Vor der Implementierung einer Prüfvorschrift mit dem MMLS3 ist diese statistisch an einer größeren Anzahl an Systemen und Prüfkörpern abzusichern. Der Einsatz von Asphaltbewehrungen im Bereich der Erhaltung sollte auf der Grundlage von Dimensionierungsansätzen für den Strassenoberbau erfolgen, welche Inhalt weiterer Forschung darstellen sollte. Erkenntnisse über die Auswirkung von Abweichungen der definierten Systembedingungen auf den Schichtenverbund fehlen bisher. Die Sensitivität von Konstruktionsmerkmalen sollte mit Blick auf die Qualität des Schichtenverbunds unter Einbaubedingungen untersucht werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Forschung zeigt Wege auf, wie Asphalteinlagen zum Beispiel in die Dimensionierungsnormen einfliessen können. Dazu braucht es allerdings Resultate, die statistisch besser abgesichert sind . Der Prüfumfang im Rahmen der Forschung erwies dazu erwartungsgemäss als zu gering.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Horat Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Tiefbauamt, Stadt Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.