



Einfluss kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung mit der Grossversuchsanlage MLS10 auf die Widerstandsfähigkeit eines T2 Norm-Belages

**Influence of channelized and non-channelized loading
with the full-scale load simulator MLS10 on the durability
of a T2 standard pavement**

**Influence d'un trafic canalisé et non canalisé avec le
simulateur de charge MLS10 sur la résistance d'un
revêtement de type T2**

**Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Martin Arraigada, Dr., Dipl. Ing.
Fabio Piemontese, M.Sc.
Andreas Treuholz, M.Sc.
Manfred N. Partl, Prof. Dr., Dipl. Ing. ETH**

**Forschungsprojekt ASTRA 2013/006 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

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)



Einfluss kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung mit der Grossversuchsanlage MLS10 auf die Widerstandsfähigkeit eines T2 Norm-Belages

**Influence of channelized and non-channelized loading
with the full-scale load simulator MLS10 on the durability
of a T2 standard pavement**

**Influence d'un trafic canalisé et non canalisé avec le
simulateur de charge MLS10 sur la résistance d'un
revêtement de type T2**

**Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Martin Arrigada, Dr., Dipl. Ing.
Fabio Piemontese, M.Sc.
Andreas Treuholz, M.Sc.
Manfred N. Partl, Prof. Dr., Dipl. Ing. ETH**

**Forschungsprojekt ASTRA 2013/006 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Manfred N. Partl, Prof. Dr., Dipl. Ing. ETH

Mitglieder

Martin Arraigada, Dr., Dipl. Ing.

Fabio Piemontese, M.Sc.

Andreas Treuholz, M.Sc.

Begleitkommission

Präsident

Dominik Studer

(Kanton AG, Abteilung Tiefbau)

Mitglieder

Hans-Peter Beyeler

(ASTRA)

Jürg Siegenthaler

(Infra)

Hans Peter Bucheli

(Infra)

Martin Horat

(VSS)

Urs Schellenberg

(Tiefbauamt Zürich)

Nicolas Bueche

(Nibuxs)

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 Ausgangslage und Forschungsbedarf	13
2 Der mobile Verkehrslastsimulator MLS10	15
2.1 Zusatzsystem Lateral Wandering.....	16
3 Methodik und Ziele.....	19
4 Teststrecke und Messkonzept.....	23
4.1 Lage	23
4.2 Belagsaufbau	23
4.3 Messungen und Sensorik: Methodik und Auswertung.....	26
4.3.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen.....	26
4.3.2 Dynamische Dehnungsmessung mit Dehnmessstreifen (DMS).....	27
4.3.3 Dynamische Verformungsmessung mit Beschleunigungssensoren.....	30
4.3.4 Spurrinnenbildung durch Querprofilmessung	30
4.3.5 Verformungsmessung mit FWD (Falling Weight Deflectometer)	32
4.3.6 Rissermittlung durch visuelle Inspektionen.....	32
4.3.7 Materialuntersuchungen im Labor	33
4.4 Messlayout und Datenerfassung	33
5 Betrieb des MLS10	39
5.1 Last und Bereifung	39
5.2 Nicht kanalisierte Belastung (Lateral Wandering).....	39
5.2.1 Anzahl Überrollungen.....	39
6 Ergebnisse	41
6.1 Temperaturverlauf.....	41
6.2 Spurrinnenbildung	44
6.3 Risse an der Oberfläche	48
6.4 Dynamische Dehnungen im Belag.....	49
6.5 Dynamische Beschleunigungsmessungen	55
6.6 Falling Weight Deflectometer (FWD)	58
7 Untersuchungen an Bohrkernen	61
7.1 Materialuntersuchung an Bohrkernen.....	62
7.2 Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner	64
8 Schlussfolgerungen.....	67
Anhänge	69
Glossar	79
Literaturverzeichnis	81
Projektabschluss	83
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	87

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Reaktionen eines Asphaltbelages auf kanalisierte und nicht kanalisierte Belastungen durch den Mobile Load Simulator MLS10 untersucht. Der MLS10 ist ein sog. APT-Simulator (APT: Accelerated Pavement Testing) der als Prototyp in der südafrikanische Universität Stellenbosch entwickelt wurde. Zweck dieser Anlage ist es durch beschleunigte Verkehrssimulation das Versagen eines Belages in einer verkürzten Zeitspanne herbeizuführen. Diese zeitraffende Beanspruchung ermöglicht es die Versagensmechanismen sowie der Einfluss verschiedener Belastungs- und Umwelteinflüsse in einem wirtschaftlich sinnvollen Zeitrahmen systematisch zu untersuchen. Bisher wurde diese Maschine in der Schweiz nur im kanalisierten Belastungsmodus betrieben. Bei dieser Art von Beanspruchung fährt das Lastrad der Maschine wiederholt die gleiche Spur ab. Da aber im Strassenverkehr aufeinanderfolgende Fahrzeuge seitlich abweichen, sind kanalisierte Verkehrssimulationen nur als Annäherungen der realen Vorkommnisse zu verstehen. Trotzdem wird diese Belastungsart aufgrund der hohen lokalisierten Belastungseinwirkung, welche zu schnellen Versagenserscheinungen führt, bevorzugt angewendet. Eine realitätsgetreuere Verkehrssimulation sieht ein seitliches Driften der aufeinanderfolgenden Belastungsräder vor. Ob mit dieser Anordnung bessere Resultate erzielt werden können, ist aus der vorhandenen Literatur nicht eindeutig ersichtlich.

Um diese Wissenslücke zu schliessen wurde eine für geringes Verkehrsaufkommen entwickelte T2-S2 Fahrbahn aufgebaut und an zwei Positionen kanalisiert und nicht kanalisiert belastet. Die Letzt genannte Belastungsanordnung verlangte den erstmaligen Einsatz der seitlichen Wandervorrichtung des MLS10. An jeder dieser Position wurden 250'000 Zyklen mit Super Single Reifen und 65kN Druckkraft appliziert. Die in beiden Positionen entstandenen Fahrbahnrisse wurden visuell und die Spurrinnentiefen mit einem Profilometer untersucht. Um die Fahrbahnreaktion auf die MLS10 Lasten zu überwachen, wurden Dehnmessstreifen und Beschleunigungssensoren verwendet. Während der gesamten Messkampagne wurde mit Thermoelementen die Temperatur im und auf dem Belag kontinuierlich erfasst. Um die Tragfähigkeit des Belages bewerten zu können, wurden vor und nach der Messkampagne zwei Deflektionsmessungen mit einem Falling Weight Deflectometer (FWD) durchgeführt. Schliesslich wurden die Struktureigenschaften der Teststrecken anhand von Belagsproben im Labor untersucht. Um die Resultate der kanalisierte – und nicht kanalisierte Belastung vergleichen zu können, sollten während den entsprechenden Prüfungen ähnliche klimatische Bedingungen herrschen. Um dieser Anforderung zu genügen wurden die Testläufe im Herbst zwei aufeinanderfolgenden Jahren durchgeführt. Dadurch konnte eine Abweichung der durchschnittlichen Temperaturen während beider Belastungsperioden um weniger als 1°C erzielt werden.

Abgesehen von einigen oberflächlichen Randrissen in der kanalisierten Fahrspur ergaben Rissuntersuchungen an beiden Belastungsstrecken bis zum Ende der Prüfungen keine weiteren Befunde. Diese Ergebnisse weisen in beiden Fällen auf eine noch nicht erreichte Strukturermüdung auf. Aus den erhobenen Daten aus Dehn- und Beschleunigungsmessungen konnte keine eindeutig Tendenz für ein Strukturwandel festgestellt werden. Im Gegensatz dazu zeigen die Resultate der FWD-Messungen, dass in der kanalisierten Fahrspur eine stärkere Schädigung als in der nicht kanalisierten stattgefunden hat. Die Spurrinnen beider Belastungsanordnungen zeigen Trotz der breiteren Form der nicht kanalisierten Fahrbahn ähnliche Tiefen. Volumetrische Labormessungen an den entnommenen Bohrkernen veranschaulichen, dass in der kanalisierten Belastungsanordnung eine höhere Nachverdichtung stattgefunden hat. Vergleicht man die Schichthaftung beider Betriebsarten ergaben Laboruntersuchungen eine niedrigere Schichthaftung in der kanalisierten Fahrspur, welche auf eine stärker lokalisierte Verformung hinweist. Anhand der Resultate beider Belastungsanordnungen kann zusammenfassend behauptet werden, dass hinsichtlich der Strukturermüdung die kanalisierte Belastung gute Resultate erzielt. Um aber oberflächliche Verschleisserscheinungen (Rissbildung, Kornausbrüche, Spurrinnengestaltung etc.) richtig simulieren zu können, ist eine nicht kanalisierte Anordnung unerlässlich.

Résumé

Dans ce travail, l'effet du chargement canalisé et non canalisé sur la performance de la chaussée est étudiée en utilisant le simulateur de trafic MLS10. Le MLS10 est un équipement prototype d'essai accéléré de revêtement de chaussées (Accelerated Pavement Testing APT) développé par l'Université Stellenbosch en Afrique du Sud. Le but de cet appareil est de simuler une charge de trafic et d'induire la rupture d'une chaussée sur une période réduite de temps. Cela permet l'étude systématique de la performance de la chaussée et ses mécanismes de rupture. De plus, il est possible d'examiner l'influence des divers facteurs de chargements etb environnementaux. Jusqu'à présent, tous les essais de MLS10 en Suisse ont été menés en suivant un chargement canalisé, i.e avec les chargements de pneu toujours dans la même trajectoire. C'est un type de chargement irréaliste puisque dans le trafic réel, les conducteurs ne conduisent pas toujours dans la même position. Ainsi, les véhicules dévient habituellement sur les voies des routes. Bien qu'étant irréaliste, ce genre de charge est considérée comme causant de plus rapides détériorations de la structure de la chaussée à cause du chargement intensif et localisé. Cependant, la recherche bibliographique sur ce sujet n'est pas concluante et ce n'est toujours pas clair si un chargement non-canalé conduit à d'autres types de dommages.

Par conséquent, un bas volume quantité de chaussée T2-S2 a été construit en suivant les normes Suisses et a été sollicité selon deux positions avec un type de chargement canalisé et non-canalé. Un total de 500'000 charges, 250'000 dans chaque position, a été appliqué avec des super pneus simples et un chargement de 65kN. Pour le type non-canalé, l'appareil latéral déviant du MLS10 a été utilisé pour la première fois. L'évaluation de la performance de la chaussée a été effectuée avec différentes techniques. Des inspections visuelles ont été effectuées pour chercher les fissures de surface. Des mesures de profil ont été accomplies pour obtenir la performance à l'orniérage. Par ailleurs, des jauges de pression et des accéléromètres ont été utilisés pour surveiller la réponse de la chaussée sous le chargement du MLS10 et des thermocouples acquéraient la température durant les essais. Deux mesures de deflectomètre à masse tombante (Falling Weight Deflectometer FWD) ont été réalisées au début et à la fin des essais pour évaluer la capacité structurelle de la chaussée. Finalement, les échantillons ont été carottés pour une évaluation en laboratoire. Les campagnes de chargement canalisé et non-canalé ont été menées sur deux années consécutives, dans le but d'avoir les mêmes conditions de température durant les expériences.

L'analyse combinée des résultats montra que la portion de chaussée chargée avec des pneus canalisés présenta les premières fissures de surface le long de la trajectoire de la roue après 150'00 applications de charge. Aucun autre signe de fissures de fatigue n'a été trouvé même après la fin des essais. En comparaison, la chaussée avec des chargements non-canalisés ne montrait aucun signe de fissures ou dommages. Les résultats des accéléromètres et les mesures des jauges de pression montrèrent aucun clair signe de dommage. De plus, l'orniérage dans les deux localisations de chargement montra des profondeurs similaires, bien que la forme de l'orniérage non-canalé était plus large que dans l'orniérage canalisé. La différence entre les températures moyennes durant les deux phases de chargement était de moins d'1°C, i.e l'effet de la température en comparaison était insignifiant. Les mesures FWD montrèrent que la chaussée dans la trajectoire de roue canalisée devint plus faible en raison de la répétition intensive du chargement. Cet effet n'était pas visible dans le chargement localisé. Par ailleurs, la densité des échantillons carottés confirma le fait que le béton bitumineux a subi un léger compactage sous le chargement extrême canalisé. Un effet négatif de ce type de chargement a aussi été observé dans les résultats de laboratoire de la résistance au cisaillement de l'interface, probablement causée par les plus importantes déformations locales. Bien que les procédés de détresse entre les deux types de chargement sont légèrement différents, ces expériences montrent que la plus irréaliste application de charge canalisé peut être utilisé avec une suffisante approximation pour le chargement non-canalé.

Summary

In this work, the effect of channelized and non-channelized loading on a pavement's performance is studied using the Mobile Load Simulator MLS10. The MLS10 is a prototype Accelerated Pavement Testing (APT) equipment developed by University Stellenbosch in South Africa. The purpose of this device is to simulate traffic loading and induce the failure of a pavement in a compressed period of time. This allows the systematic study of a pavement's performance and its failure mechanisms. Further, it is possible to investigate the influence of various loading and environmental factors. So far, all MLS10 tests in Switzerland were carried out following channelized loading, i.e. with the tires loading always the same path. This is an unrealistic type of loading as in real traffic, drivers don't guide always in the same position. Thus, vehicles usually wander in the road's lane. Although being unrealistic, this kind of load is believed to cause a faster deterioration of the pavement structure due to the intensive and localized loading. However, literature research on this topic is not conclusive and still is not clear if a non-channelized loading would lead to other types of distresses.

Consequently, a low volume pavement T2-S2 was constructed following the Swiss Standards and was loaded in two positions with channelized and non-channelized type of loading. A total of 500'000 loads, 250'000 in each position, were applied with super single tires and 65kN loading. For the non-channelized type, the lateral wandering apparatus of the MLS10 was used for the first time. The evaluation of the pavement performance was carried out with different techniques. Visual inspections were carried out to search for surface cracking. Profile measurements were performed to obtain the rutting performance. Further, strain gauges and accelerometers were used to monitor the pavement response under MLS10's loading and thermocouples obtained the temperature during the tests. Two Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements were carried out at the beginning and at the end of the tests to evaluate the pavement's structural capacity. Finally, specimens were cored for laboratory evaluation. The channelized and non-channelized loading campaigns were carried out in two consecutive years, in order to have the same temperature conditions during the experiments.

The combined analysis of the results showed that the portion of the pavement loaded with channelized tires presented the first surface cracks along the wheel path after 150'000 load applications. No other sign of fatigue cracks were found even after the end of the tests. In comparison, the pavement with non-channelized loading didn't show any sign of crack or other damage. Correspondingly, results from accelerometers and strain gauges measurements showed no clear pattern or sign of distress. Besides, the rutting in both loading locations showed similar depths, although the form of the non-channelized rutting was much wider than in the channelized rutting. The difference between the average temperatures during both loading phases was less than 1°C, i.e. the temperature effect in comparison was insignificant. FWD measurements showed that the pavement in the channelized wheel path became weaker though the intensive repetition of the loading in the same location. This effect was not so visible in the non-channelized loading. Further, the density of the cored specimens confirmed the fact that the asphalt concrete suffered a slight compaction under the extreme channelized loading. A negative effect of this loading type was also observed in the laboratory results of interlayer shear resistance, probably due to the higher local deformations. Although the distress process between both types of loading are slightly different, these experiments showed that the more unrealistic channelized load application can be used with sufficient approximation to non-channelized loading.

1 Ausgangslage und Forschungsbedarf

Die bereits durchgeführten Projekte ASTRA 2011/004, ASTRA 2011/013 und ASTRA 2011/014 [1] [2] [3] mit dem Verkehrslastsimulator MLS10 hinsichtlich des Vergleichs verschieden starker Strassenaufbauten beinhalten das Aufbringen, kanalisierter Verkehrslasten und das Ermitteln der Schädigungsmechanismen sowie der Versagensgrenzen der einzelnen Beläge. In diesen Projekten wurde jedoch die realitätsgetreuere nicht kanalisierte Betriebsart gewählt um die Schädigungswirkungen auf die Beläge zu intensivieren.

Die kanalisierte Verkehrslastsimulation, wie sie in den eingangs erwähnten ASTRA Projekten durchgeführt wurde resultiert in einer höheren lokalen Belastung des Belages und somit in einem schnelleren Auftreten eines Versagens aber auch in einer anderen möglichen Schädigungswirkung der Last. Es ist daher wichtig bei einer Beurteilung eines geprüften Belages durch beschleunigte Verkehrslastsimulation auch die in der Realität vorkommende Verkehrslastverteilung, das sogenannte „Lateral Wandering“ zu berücksichtigen (siehe Abb. 1). Im realen Verkehrsaufkommen bilden die einander folgenden Fahrzeuge keine deckungsgleiche sondern vielmehr eine seitlich abweichende Spur. Somit werden die Radlasten auf eine insgesamt grössere Fläche verteilt, was theoretisch zu einer Reduktion der lokalen Belastung des Belags führt und zudem seitliches Walken der Radspuren und seitlichen Schub verursacht. Im Vergleich zu einer kanalisierten Spurenbelastung entsteht gemäss Hugo et al. [4] dadurch ein geringerer Widerstand des Asphalts gegen Wassereinwirkung.

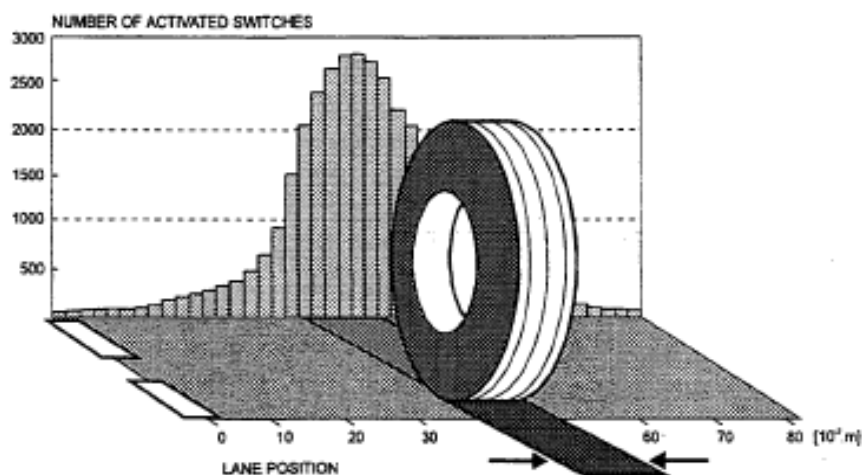


Abb. 1 Typisches, normalverteiltes Spurdriften eines Rades [5]

Weltweit wird der Unterschied zwischen kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung untersucht [6] [7] [8] [9] [10]. Dabei besteht noch kein Konsens welche Betriebsart die aussagekräftigeren Resultate liefert. Theoretisch führt eine nicht kanalisierte Belastung zu einer lokalen Reduktion der Belastung und verursacht seitlichen Schub und seitliches Wandern der Radspuren. In den meisten Fällen wird jedoch aus zeitlichen Gründen die kanalisierte Belastung bevorzugt, da diese schneller zu den gewünschten Resultaten führt. In der Tat sind aber die Beanspruchungen nicht vergleichbar. Bei der kanalisierten Beanspruchung schneidet sich das Rad praktisch in den Belag hinein. Dadurch werden am Rande der Spur starke Schubeinwirkungen erzeugt, die sich auch in Oberflächenlängsrissen und in einer Tendenz zum Durchstanzen äussert. Kanalisierung herrscht vornehmlich bei engen Fahrspuren vor (z.B. Brücken, Tunnels etc.). Beim Spurdriften wird zusätzlich die Spurrinne durch das seitliche Einwalken des Rades erzeugt (ähnlich Auswalken eines Teiges), wobei zusätzlich durch das Rad an den Flanken der Spurrinne Schub entsteht, der an der Oberfläche zu Kornverlusten

(insbesondere in Zusammenhang mit Wasser) führen kann und ausgeprägteren Aufwölbungen. (siehe Abb. 2)

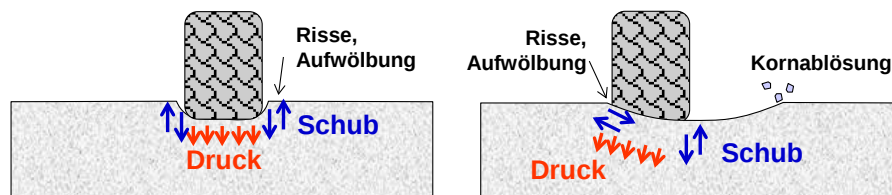


Abb. 2 Unterschied zwischen kanalisiertem Befahren (links) und mit Spurdriften (rechts)

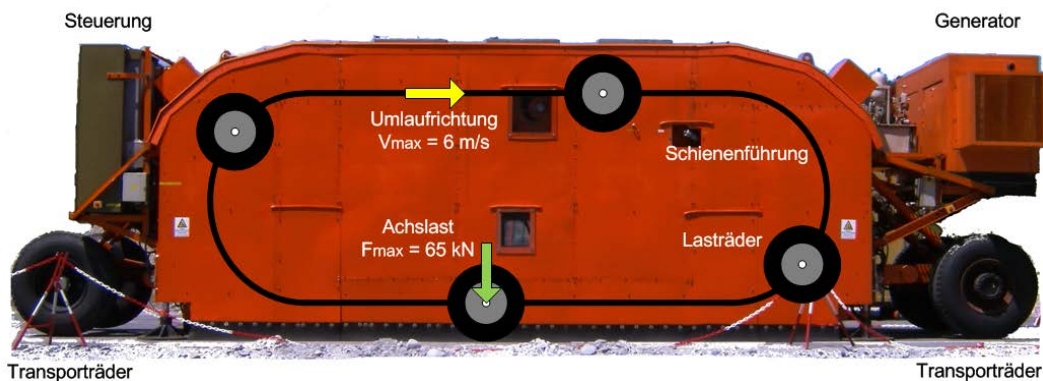
Nachdem zuerst eine vergleichende Ausgangslage für drei Norm Beläge der Verkehrslastklassen T2 [1], T3 [2] und T4 [3] bei kanalisierter Belastung geschaffen werden musste ist somit in einem weiteren folgerichtigen Schritt das Verhalten und die Auswirkungen des beschriebenen Spurdriftens zu untersuchen und somit die Verkehrslastsimulation noch realistischer zu gestalten. Die bisher gewonnenen Resultate der durchgeführten Projekte geben wichtige Anhaltspunkte bezüglich Dauerhaftigkeit, Versagensgrenzen und Schädigungsmechanismen der getesteten Beläge. Ergänzend dazu lieferte eine Vergleichsuntersuchung zwischen kanalisiertem und nicht kanalisiertem Betrieb wie im vorliegenden Projekt weiterführende Erkenntnisse zu den Schädigungsmechanismen und deren Auswirkungen, welche auch zu einem Vergleich mit den in der Realität vorkommenden Schadensbildern der Verkehrsbelastung herangezogen werden können.

Mit dem vorliegenden Projekt soll abgeklärt werden, ob sich durch die zusätzliche seitliche Radbewegung beim Spurdriften tatsächlich kritische Lastfälle ergeben können, die bei rascher konzentrierter kanalisierter Beanspruchung allenfalls vernachlässigt werden. Mit solchen Einflüssen wird speziell bei Belägen mit höherer vertikaler Verformbarkeit, also beispielsweise bei schwächeren Belägen der Verkehrslastklasse T2, gerechnet. Dies rechtfertigt sich auch mit Blick auf den Untersuchungsaufwand sowie hinsichtlich der Infrastruktur in Städten und Agglomerationen, wo netzbedingt ein stärkeres Spurdriften an eher schwächeren Belägen erfolgt.

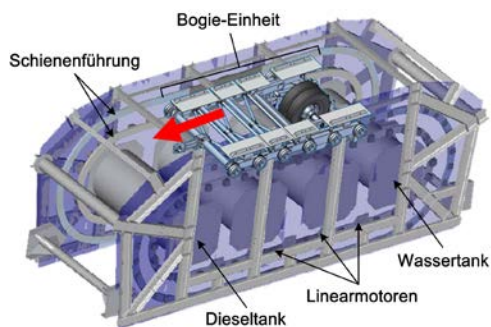
2 Der mobile Verkehrslastsimulator MLS10

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. 3). Jeder dieser Bogies ist jeweils mit einer hydraulisch gelagerten, doppel- oder einzelbereiften Halb-achse 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 Laufschiene im Umlenkbereich ist derart optimiert, dass die Lasträder möglichst stossfrei auf den Belag aufsetzen.

a)



b)



c)

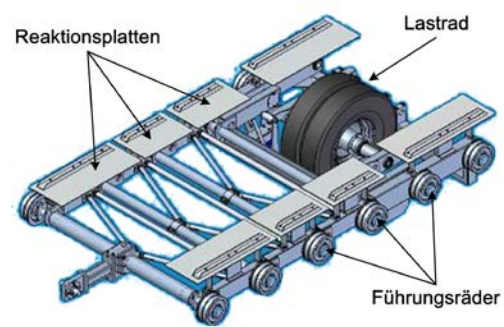


Abb. 3 Mobile Load Simulator MLS10: Reale Ansicht inklusive Funktionsschema (a); Schnittzeichnung Rahmen mit Bogie-Einheit (b); Bogie-Einheit mit Lastrad (c)

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 18km/h überrollt. Damit zeichnet sich der Verkehrslastsimulator durch eine hohe Leistungsfähigkeit von 5'000 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 andererseits 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 Lauf-schienen zu vermeiden ist die maximal zulässige Strassenneigung im Betriebszustand auf 3% zu beschränken. 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 MLS10 ist nicht in der Lage die Temperatur des Belages kontrolliert zu beeinflussen. Weil bituminöse Materialien jedoch stark davon abhängig sind, muss die Jahreszeit der jeweiligen Messkampagne mit Bedacht gewählt werden. Untersuchungen auf Risswiderstände werden beispielsweise im Winter durchgeführt, wenn der Belag kalt und relativ spröde ist. Der Spurrinnenwiderstand hingegen wird im Sommer bei möglichst warmen und folglich weichen Asphaltsschichten getestet. Da Wasser ebenfalls ein grosser Einfluss auf die Ergebnisse mechanische Belastungsprüfungen hat, muss neben der Saison auch die Niederschlagstendenz berücksichtigt werden.

2.1 Zusatzsystem Lateral Wandering

Der MLS10 kann mit einem Zusatzsystem ausgerüstet werden, welches auch die Simulation des in der Praxis vorkommenden seitlichen Spurdriftens durch Quer-Pendelung der gesamten Maschine um $\pm 300\text{mm}$ erlaubt (siehe Abb. 4).



Abb. 4 Lateral Wandering Zusatzsystem und Bezeichnungen

Dieses Zusatzsystem besteht aus zwei sogenannten „Lateral Slide Units“, in welchen der MLS10 platziert wird. Hierfür werden die normalerweise montierten Stützfüsse abmontiert und die Eckstützen je-weils in der vorderen und hinteren „Slide Unit“ positioniert (grüner Pfeil). Die Seitwärtsbewegung (blauer Doppelpfeil) der gesamten Maschine wird über hydraulisch gesteuerte Schlitten in den „Slide Units“ realisiert (siehe Abb. 4).

Wichtig ist, dass diese Seitwärtsverschiebung des MLS10 simultan mit der Vorwärtsbewegung erfolgt und somit das Lateral Wandering direkt während des Überrollvorgangs stattfindet und das Lastrad seitwärts über den Belag geschoben wird.

Für die Programmierung der seitlichen Verteilung des Lateral Wanderings kann zwischen einer Normalverteilung und einer Dreieckverteilung gewählt werden (siehe Kapitel 3 Methodik und Ziele). In beiden Fällen verbringt das Lastrad mehr Zeit in der Mitte der Fahrspur als an deren Rändern.

3 Methodik und Ziele

Ziel des Projektes ist es, mithilfe der Grossversuchsanlage MLS10 den Unterschied zwischen kanalisierter und nicht kanalisierter beschleunigter Verkehrslastsimulation zu ermitteln. Das Projekt liefert Grundlagen für die quantitative und qualitative Beurteilung des Einflusses kanalisierter und nicht kanalisierter Überrollungen mit dem MLS10 unter klar definierten Lastbedingungen. Es gibt Aufschluss über allfällige Unterschiede im Belagsversagen und deren zugrunde liegenden Schädigungsmechanismen. Des Weiteren kann nach Abschluss die Angemessenheit des Einsatzes des Lateral Wandering System für weitere MLS10 Tests und Projekte schlüssig beurteilt werden.

Vom Projekt werden Resultate über den Unterschied und das Verhalten eines für die Verkehrslastklasse T2 neu eingebauten Belags des Oberbautyps 1 zwischen kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung durch den Verkehrslastsimulator MLS10 erwartet. Konkret geht es darum die Schädigungsmechanismen in den beiden Betriebsarten zu vergleichen, die Art der Spurrinnenbildung und die Auswirkungen auf den Untergrund zu untersuchen. Es kann erwartet werden, dass die Spurrinnenbildung im nicht kanalisierten Betrieb glatter ausfällt und somit ähnlicher dem realen Verkehr entspricht als im kanalisierten Betrieb. Die durchgeführten Dehnungsmessungen liefern Resultate zur Beziehung zwischen der Antwort des Belags und der Lastapplikation an verschiedenen Stellen seitlich zu Überrollrichtung. Hiermit kann die Lastverteilung in den Asphaltschichten besser beurteilt werden.

Die vorliegende Untersuchung ist von Nutzen für die Beurteilung der kanalisierten Belastung in Bezug auf die realitätsnähere nicht kanalisierte Belastung. Es werden Schlussfolgerungen erwartet, welche in spätere Projekte einfließen werden und es wird eine Basis geschaffen um bei weiteren Projekten die Entscheidungsgrundlage für die eine oder andere Betriebsart des MLS10 zu liefern. Die Notwendigkeit des vorliegenden Projektes besteht darin, dass nicht abschliessend beurteilt werden kann, welche Schädigungsmechanismen und Auswirkungen im nicht kanalisierten Betrieb vorherrschend sind und daher ein Vergleich mit dem normalerweise angewendeten kanalisierten Betrieb ermöglicht wird. Des Weiteren kann nach Abschluss die Angemessenheit des Einsatzes der Lateral Wandering Systems beurteilt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Vergleichsuntersuchung dienen als Ausgangsbasis und vergleichende Grundlage für entsprechende ähnliche oder verwandte Untersuchungen von innovativen neuen oder optimierten Belägen.

Vom Nutzerbeirat des MLS10 unterstützt und gefördert wird die Prüfung einer Teststrecke der Grösse 20m x 5m im Strasseninnovationspark in Lenzburg. Eingebaut wurde ein T2 Norm Belag des Oberbautyps 1 (siehe Kapitel 4). Die Wahl eines T2 Belags stützt sich auf die Tatsache, dass aufgrund der geringen Belagsdicken in relativ kurzer Zeit verlässliche Aussagen über das Verhalten im Betrieb mit dem MLS10 gemacht werden können.

Gemäss der Norm SN 640 324 [11] soll ein T2-Belag so strukturiert werden, dass bei einer maximalen täglichen Belastung mit 100 Einheitsachslasten a 8.6t, eine Lebensdauer von 20 Jahren erzielt werden kann. Kumuliert über diese Servicezeit ergibt das 730'000 Achslasten welchen der T2-Belag standhalten soll. Die MLS10 ist aber so ausgelegt, dass jeder Achsendurchgang der Belag mit eine Last von 13,6t (130kN) beansprucht. Dies ergibt ein Achsäquivalenzfaktor welcher die erwähnte Normlast von 8.6t (vgl. SN 640 320 [24]) um den Faktor 7.1 übersteigt. Zum besseren Verständnis wird folgend die Berechnung dieses Faktors näher beschrieben.

$$F_i = \left[\frac{L_x + A}{19} \right]^{4.79} A^{-4.33} 10^{\left(\frac{0.2}{\beta_x} - \frac{0.2}{\beta_{18}} \right)} \quad (1)$$

Hierbei steht F_i für den Achsäquivalenzfaktor, L_x ist die einwirkende Achslast in [kips], A die Achsenanzahl, β_x und β_{18} Funktionen die von der Struktur und Last abhängig sind.

Verglichen mit den Normbedingungen ergibt der erhöhte Achsäquivalenzfaktor der MLS10 im kanalisierten Betriebsfall eine Reduktion der Belagslebensdauer welche durch eine maximale Zyklenzahl von ca. 102' 817 charakterisiert werden kann.

Zudem kann auch ein Bezug mit dem im Rahmen des Projektes ASTRA 2011/004 [1] bereits im kanalisierten Betrieb bis zur Versagensgrenze getesteten T2 Belages in Wimmis hergestellt werden. In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass 250'000, MLS10 kanalisierte Lastzyklen mit 65kN (130kN Achslast), deutliche strukturelle Schäden in eine T2 Belag erzeugen. 250'000 Überrollungen welche an ca. 1'773'774 äquivalente Verkehrslasten entsprechen, können in ca. 50Std kontinuierlichen Maschinenbetrieb erreicht werden.

Des Weiteren ermöglicht dieses Projekt einen direkten Vergleich zweier nach Norm dimensionierten Belagsaufbauten, die sich aber in punkto Schichtdicken erheblich unterscheiden.

Um einen Vergleich der beiden Betriebsarten zu ermöglichen, wird der eingebaute T2 Belag zuerst an einer ersten Stelle mit 250'000 Überrollungen kanalisiert belastet und danach an eine zweite Stelle verschoben, an welcher wiederum 250'000 Überrollungen im nicht kanalisierten Betrieb appliziert werden. Die Belastung mit dem MLS10 erfolgt mit 5'000 unidirektionalen Überrollungen pro Stunde und einer Radlast von 65kN bei einem Reifendruck von 10bar mit Super Single Reifen der Dimension 455/50 R22.5. Über Nacht und an den Wochenenden wird dem Belag eine Erholungsphase zugestanden.

Das Arbeitsprogramm besteht im Wesentlichen aus den folgenden Hauptelementen:

- Vorbereitung und Planung des Versuchsfeldes, Bau und Installation der Messeinrichtungen
- Transport der MLS10 und Einrichtung sowie Installationen am Messplatz
- Durchführen der Testreihen inklusive periodischen Messungen im kanalisiert (erstes Jahr) und nicht kanalisiert Feld (zweites Jahr).
- Probenentnahme und Durchführung der Labortests
- Abbau des Messplatzes, Rücktransport der MLS10, Aufräumarbeiten
- Auswertung der Laborarbeiten sowie Datenanalyse der Testreihen
- Berichterstellung

Folgende Messungen werden während des gesamten Testbetriebes durchgeführt:

Nicht kanalisierter Betrieb:

- Dehnungsmessungen längs und quer auf dem Planum und zwischen Trag- und Deckschicht mit Dehnungsmessstreifen sowie an der Oberfläche direkt neben der äussersten Fahrspur (kontinuierlich)
- Temperaturmessung in verschiedenen Tiefen (entsprechen Einbaupositionen der Dehnungsmessstreifen) und an der Belagsoberfläche (kontinuierlich)
- Messen der Beschleunigungen der Belagsoberfläche (kontinuierlich)
- Periodische Messungen (Nullmessungen unbelastet und während diskreten Zeitpunkten im Versuchs-fortschritt):
 - Messung des Querprofils an drei Stellen (täglich)

- Visuelle Inspektion der Risse und Oberflächenschäden (täglich)
- Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) (am Anfang und am Ende der Testreihe)

Kanalisierte Betrieb:

- Dehnungsmessungen längs und quer auf der Belagsoberfläche direkt neben der Fahrspur (kontinuierlich)
- Temperaturmessung an der Belagsoberfläche (kontinuierlich)
- Messen der Beschleunigungen der Belagsoberfläche (kontinuierlich)
- Periodische Messungen (Nullmessungen unbelastet und während diskreten Zeitpunkten im Versuchs-fortschritt):
- Messung des Querprofils an drei Stellen (täglich)
- Visuelle Inspektion der Risse und Oberflächenschäden (täglich)
- Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) (am Anfang und am Ende der Testreihe)

Laboruntersuchungen von Belagsproben

Neben den obigen Feldmessungen wurden an zylindrische Belagsproben folgende Laboruntersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der volumetrischen Belageigenschaften
- Bestimmung des Schichtenverbundes

Im kanalisierten Betrieb wurde auf eine kontinuierliche Dehnungsmessung im Belag verzichtet, da vergleichbare Daten bereits in den Projekten ASTRA 2011/004 (T2 Wimmis), ASTRA 2011/13 (T3 Lenzburg) sowie ASTRA 2011/14 (T4 Lenzburg) gesammelt worden sind und zum Vergleich herangezogen werden können. [1] [2] [3]. Der messtechnische Fokus in diesem Projekt lag auf den Einflüssen der nicht kanalisierten Belastung.

4 Teststrecke und Messkonzept

4.1 Lage

Die Testfelder werden auf dem ASTRA-Strasseninnovationspark aufgebaut. Dieser befindet sich neben dem A1-Rastplatz Lenzburg im Kanton Aargau und ist 47km von der Empa Dübendorf entfernt (Abb. 5).



Abb. 5 Standort des Strasseninnovationsparks in Lenzburg.

Der ASTRA Strasseninnovationspark wurde im Jahr 2012 gebaut. Das Ziel dieses fixen Testgeländes ist es unter möglichst realen Bedingungen Laborwerte zu verifizieren und Beläge mit dem MLS10 zu testen. Das Testgelände hat eine Grösse von ca. 28m x 36m und besteht aus ungebundenem Gemisch definierter Qualität und Geometrie, worauf die temporären Beläge für verschiedene Projekte eingebaut werden. Das Bodengefüge des Testgeländes besteht aus einem verdichteten Planum worauf ein Kieskoffer aus ca. 50cm frostsicherem, ungebundenen Gemisch 0/45 und einer 5-10cm dicken Planieschicht erstellt wurde. Diese Struktur entspricht dem regionalen Standard was ein üblicher Aufbauaufwand erfordert. Da der Kieskoffer als Grundlage für alle einzubauenden Beläge dient, musste ein Kompromiss zwischen Frost- und Tragfähigkeitsdimensionierung gefunden werden. Die Entwässerung erfolgt über einen Sickerleitungsgraben. Die Infrastruktur umfasst alle nötigen Einrichtungen und Materialien wie Mess- und Supportcontainer, Strom, Wasseranschluss, mobiler Lärmschutz, usw.

4.2 Belagsaufbau

Nach dem Aushub von 96 m³ Mergel und vor dem Einbau des ungebundenen Gemischs wurden Messungen zur Überprüfung der Tragfähigkeit des Planums durchgeführt. Verwendet wurde das Leichte Fallgewichtsgerät (LFG). Im Gegensatz zu einem Plattendruckversuch ist dieses Verfahren einfacher, da es kein Fahrzeug als Gegengewicht benötigt. Mit diesem Verfahren werden Messstöße auf das Planum aufgebracht und nach jedem Stoß die Setzung in Millimetern aufgezeichnet. Nach dem dritten Stoss werden automatisch der Mittelwert der Setzung und der Wert des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} in MN/m² angegeben. Mit dem E_{v1} -Wert, der beim statischen Plattendruckversuch ermittelt wird, kann der Wert des dynamischen Plattendruckversuchs mit einem Faktor zwischen 1 bis 2 verglichen werden.

Im Anhang I.1 sind die Ergebnisse und Positionen der LFG-Messungen dargestellt. Insgesamt wurden neun Messungen durchgeführt, sechs davon in dem Bereich wo

später die Beläge eingebaut wurden. Die dabei gemittelte dynamische Verformungsmodul E_{vd} für diese sechs Messpunkte sind in Tab. 1 festgehalten.

Tab. 1 LFG Messungen

Position	E_{vd} [MN/m ²]
ZU3	13.0
ZU4	15.5
ZU5	29.2
ZU6	36.0
ZUA	27.2
ZUB	22.9
Mittelwert	23.9

Für die Dimensionierung wurde die Norm SN 640 324 [11] herangezogen. Im Unterschied zum getätigten dynamischen fordert diese Norm aber einen statischen Plattendruckversuch. Dabei sollte der damit einhergehende statische Verformungsmodul E_{v1} für ein Planum welche eine mittlerer Tragfähigkeit (Klasse S2) aufbringe soll, einen Minimalwert von $> 11.25 \dots 22.5 \text{ MN/m}^2$ aufweisen. Um Aussagen machen zu können ob die durchgeführten Messungen (vgl. Tabelle1) diesem Referenzwert genügen, müssen diese zuerst auf einem statischen Wert umgerechnet werden. Folgend wird eine Lösung gemäss P. Bodmer et al. [12] aufgezeigt.

Der statische Verformungsmodul des Planums bei der Erstbelastung M_{E1} wird wie folgt berechnet.

$$M_{E1} = 1.75 * E_{vD} - 20 \text{ MN/m}^2 \quad (2)$$

Mit dem errechneten Mittelwert aus Tabelle1 ergibt das:

$$M_{E1} = 21.9 \text{ MN/m}^2$$

Daraus folgt

$$E_{v1} = M_{E1} * 0.75 \quad (3)$$

$$E_{v1} = 21.9 \text{ MN/m}^2 * 0.75 = 16.42 \text{ MN/m}^2$$

Das erhaltene Resultate liegt innerhalb des in der Norm SN 640 324 [11] geforderten Toleranzbereich für die Tragfähigkeitsklasse S2. Die Formel 1 beruht auf Messungen an Foundationsschichten mit ungebundenem Gemisch und Kiesgemisch. Es ist somit offen ob diese Formel auch für andere Bodenarten anwendbar ist.

Nach dem Auffüllen des Aushubs mit 50cm frostsicherem ungebundenem Gemisch 0/45 wurden Plattendruckversuche gemäss Schweizer Norm SN 670 317b [13] durchgeführt. Der Wert für die Anforderung an die Verdichtung und Tragfähigkeit im Strassenbau gemäss Schweizer Norm SN 640 585b [14], Tabelle 1, beträgt $> 100 \text{ MN/m}^2$. Die Ergebnisse für den Kieskoffer des Testgeländes, welche im Anhang I.2 dargestellt sind, weisen einen Durchschnitt von 144 MN/m^2 über 4 Messungen auf. Auf dem Areal wurde für dieses Projekt ein Testfeld (20m x 5m) erstellt (Abb. 6). Es war das Ziel einen Belag der Verkehrslastklasse T2, Oberbautyp 1, S2 mit Aufbau gemäss Abb. 7 einzubauen.

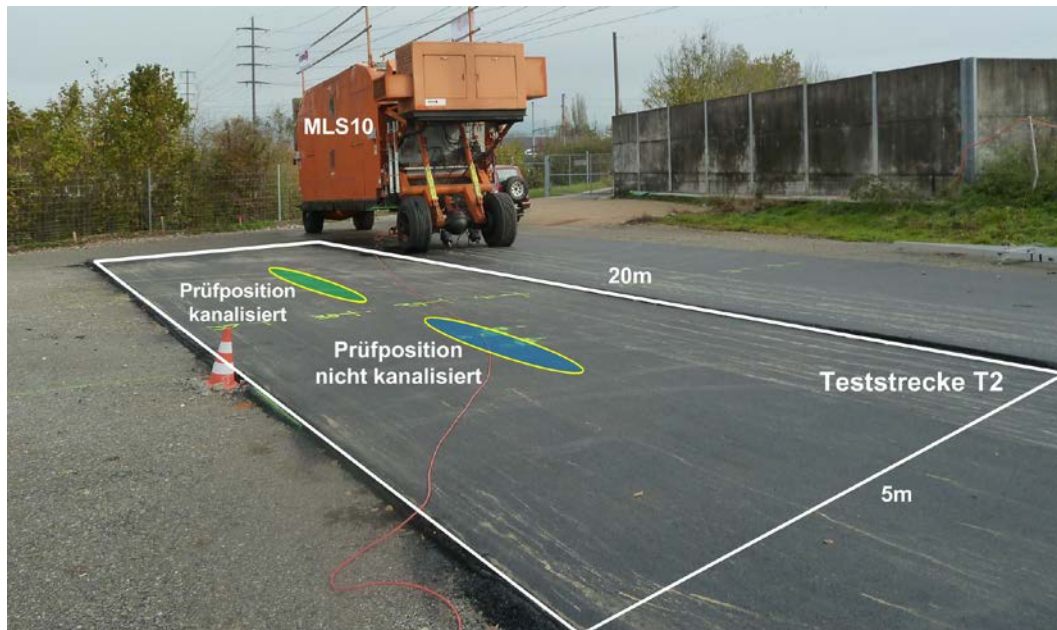


Abb. 6 Fertig eingebaute Teststrecke mit markierten Prüfpositionen

Die Schweizer Norm SN 640 324 [11], verwendet den Strukturwert SN als Kennziffer für die Tragfähigkeit eines Belags. Dieser Wert ist definiert als Summe der Dicken D [cm] multipliziert mit den entsprechenden Tragfähigkeitswerten a der einzelnen Oberbauschichten (siehe Formel 3).

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot D_3 + \dots + a_n \cdot D_n \quad (4)$$

SN Strukturwert

a_i Wert für die relative Tragfähigkeit einer Oberbauschicht i bezogen auf den Basiswert für ungebundenes Gemisch

$a_i \cdot D_i$ Tragfähigkeitswert einer Oberbauschicht i der Dicke D [cm]

Bei einer Tragfähigkeitsdimensionierung wird auf Grund der erwarteten Verkehrslastklasse T_{i20} und der anhand von Sondierungen ermittelten Tragfähigkeitsklasse S_i des Untergrundes der erforderliche Strukturwert SN_{erf} aus Tabelle 5 der SN 640 324 bestimmt. Gemäss dieser Tabelle, benötigt ein T2-S2 Belag mindestens ein SN_{erf} von 73. Mit Hilfe der Formel (3) und den a -Werten aus Tabelle 7 der SN 640 324 sind die Schichtdicken so zu berechnen, dass der resultierende Strukturwert SN_{dim} mindestens den Strukturwert SN_{erf} erreicht ($SN_{\text{dim}} \geq SN_{\text{erf}}$). Abb. 7 zeigt die anhand dieser Berechnung vorgeschlagene Oberbaustruktur.

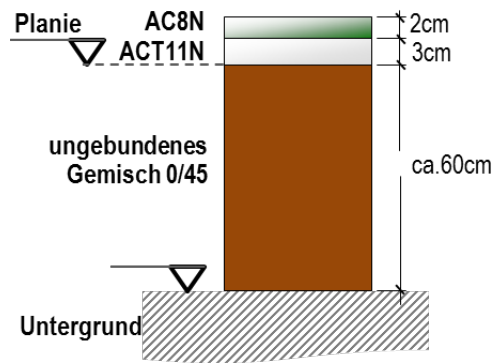


Abb. 7 Gewählter Belagsaufbau Oberbautyp 1, T2-S2.

Der Strukturwert für diesen Belagsaufbau gemäss Abb. 7 ist $SN_{dim}=80$, also grösser als der SN_{erf} für einen T2-S2 Belag.

Der vorhandene Strukturwert für den Belagsaufbau gemäss Abb. 7 beträgt 80 und ist somit grösser als der erforderliche Mindestwert von $SN_{erf} = 73$ für einen T2-S2 Belag. Trotzdem muss erwähnt werden, dass dieser Aufbau aufgrund zu niedriger dicken der einzelnen Asphaltschichten nicht normgerecht ist. Dies stellt somit einen kritischeren Aufbau dar, welcher aufgrund grösserer Biegezugspannungen an der Belagsunterseite früher ein Versagen zeigen sollte als die nach Norm aufgebauten Beläge. Betrachtet man jedoch die Schichtdicken ausserhalb des Verbundes also mit materialtechnischem Fokus entsprechen diese der geforderten Mindestwerte der Norm SN 640 430c [15]. Nach dieser Norm sollte die Deckschicht aus dem Material AC 8 N eine Stärke zwischen 20mm und 35mm aufweisen, die Tragschicht aus AC T 11 N sollte hingegen im Bereich 30mm - 50mm liegen.

4.3 Messungen und Sensorik: Methodik und Auswertung

Um den Zustand des Belags in diesem Forschungsprojekt zu erfassen, wurden einerseits verschiedene Sensoren direkt in den Belag eingebaut und weiter periodische Messkampagnen mit spezialisierten Messsystemen durchgeführt. Die nachfolgenden Kapitel geben einen Überblick der eingesetzten Sensoren und Messsysteme.

4.3.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen

Für die Temperaturmessung wurden aus Nickel-Chrom gefertigte Thermoelemente des Typs K (Abb. 8) wie sie in Asphalt, Beton oder Luft verwendet werden können, benutzt. Diese wurden während des Belagseinbaus in verschiedenen Tiefen oder an der Oberfläche platziert. Sie besitzen eine Teflon Isolation und können so den hohen Temperaturen beim Belagseinbau standhalten. Die Kabel wurden durch den Belag nach aussen und geschützt von Kunststoffkanälen bis zu den erforderlichen Messdatenerfassungssysteme geführt.

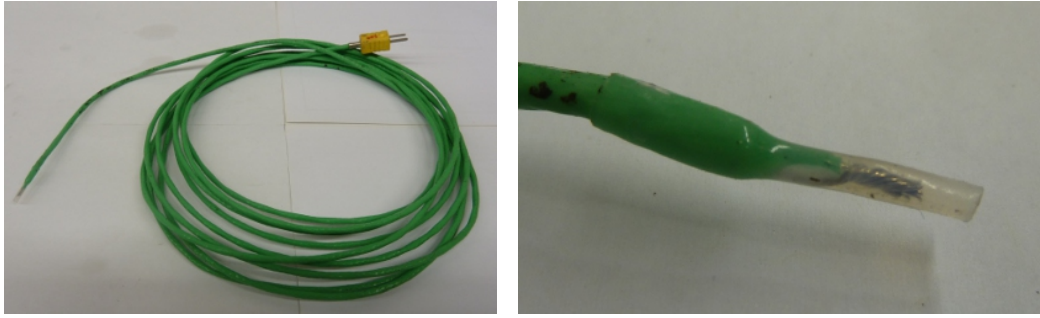


Abb. 8 Thermoelemente mit Teflon Isolation und temperaturempfindlicher Messspitze

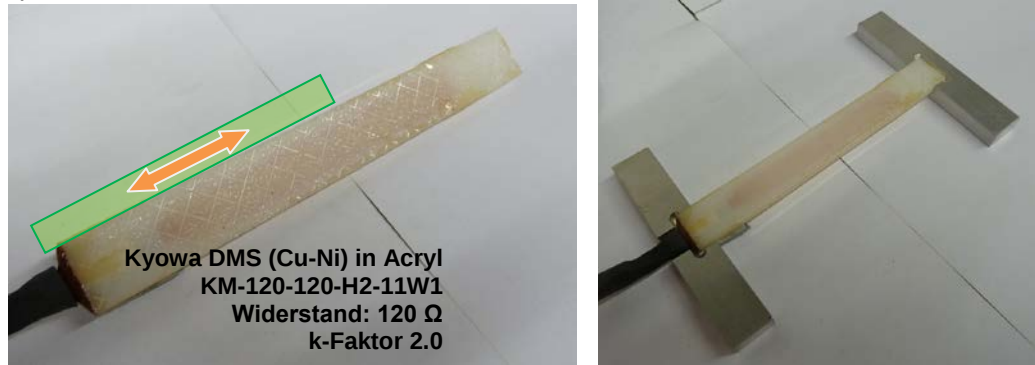
Alle 5 Minuten wurde die Temperatur erfasst und mit der zugehörigen Zeitreferenz tabellarischer im internen Speicher des Datenerfassungsgeräts gespeichert. In regelmässigen Abständen wurden mittels einer speziellen Software ASCII-Sicherungskopien auf einem externen Rechner erstellt. Aus den ermittelten Daten kann das zeitliche Temperaturprofil der Fahrbahn festgehalten werden.

4.3.2 Dynamische Dehnungsmessung mit Dehnmessstreifen (DMS)

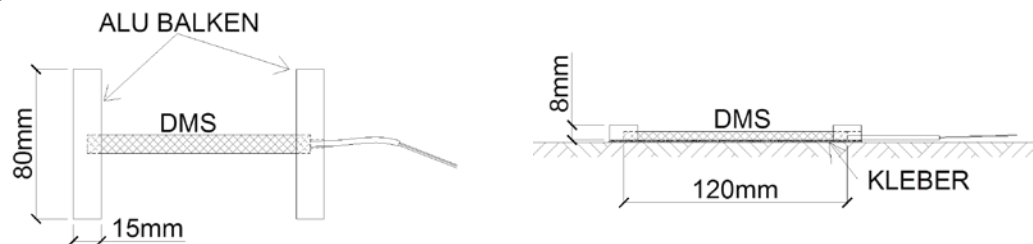
Geeignete Dehnmessstreifen ermöglichen die Erfassung der Belagsdehnungen welche durch die Belastung durch den MLS10 in Längs- und Querrichtung erzeugt werden. Die Sensoren wurden während des Belageinbaus zwischen den einzelnen Schichten und an der Oberfläche platziert. Ein Dehnmessstreifen stellt prinzipiell 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 (Abb. 9). Die technischen Spezifikationen finden sich in [1]. 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 gefertigt und angeklebt. Die Originalkabel wurden durch verseilte, silberbeschichtete Kupferkabel mit Teflonisolation ersetzt um den hohen Belagstemperaturen beim Einbau Stand zu halten. 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. 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 Belageinbau.

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 ist dabei mit dem Zeitstempel der Messung benannt.

a)



b)



c)



Abb. 9 Dehnungsmessstreifen (DMS) im Anlieferungszustand mit angedeuteter Belastungsrichtung (orange) und nach Ankleben der Alubalken (a), schematische Skizze (b) und Einbau in den Belag oder in ungebundenes Gemisch (c)

Abb. 10 zeigt einen typischen Dehnungsverlauf unter MLS10 Belastung. In diesem Beispiel sind nur 2 Sekunden des Signals abgebildet, welches in dieser Zeitspanne 3 Spitzenwerte bzw. drei MLS10 Überrollungen entspricht. In derselben Abbildung sind auch der Zeitstempel der Datei sowie die gemessenen Temperaturen festgehalten. Zug- und Druckdehnungen sind mit positiven bzw. negativen Werten dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen permanenten (statischen) Dehnungen im Belag ist es schwierig eine gemeinsame Null-Linie aller Sensoren zu definieren. Um dem entgegenzuwirken und nur die durch die Belastung des MLS10 erzeugten, dynamischen Dehnungen zu messen wurden alle Sensorsignale vor Beginn der Aufzeichnung tariert, d.h. softwaretechnisch 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, welche 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 vermitteln. Im Folgenden wurde eine Methode entwickelt um den Zustand des Belags für bestimmte Überrollungszeitpunkte zu beurteilen.

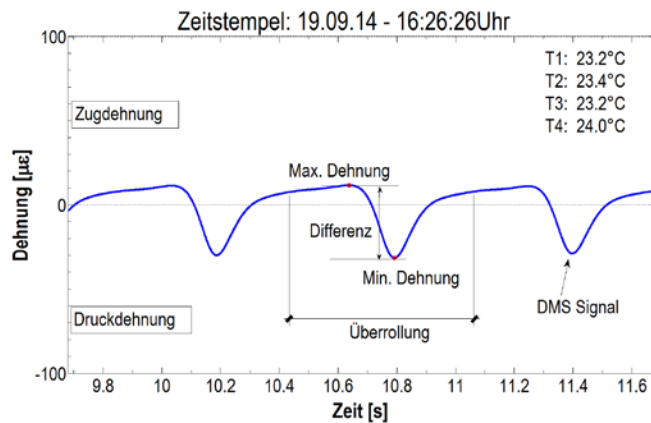


Abb. 10 Beispiel für gemessene Dehnungen im Belag

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 Integrität bedeuten kann. 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 hat.

Die gemessene Dehnung ist neben den genannten Einfluss auch von weiteren Randbedingungen abhängig. Temperaturschwankungen während des Tages ändern die Steifigkeit des Asphaltbetons. Erwärmt sich der Belag im Laufe des Tages, so nehmen gleichzeitig der Modul der Asphaltsschichten ab und die Dehnungen zu. Erwähnenswert ist auch der Einfluss der Überrollgeschwindigkeit der Radbelastungen auf die Dehnungen. Aufgrund der viskoelastischen Natur des Asphalts steigt diese mit abnehmender Belastungsfrequenz. Um den Faktor der Überrollgeschwindigkeit bei den gemessenen Dehnungen zu eliminieren wurden mit der MLS10 nur Messungen mit einer Geschwindigkeit von 18km/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 Kompensationsmethodik angewendet.

Die gespeicherten Daten wurden automatisch mit einem Matlab – Skript nachbearbeitet und analysiert. Das Skript arbeitet mit den Dehnungen, den gemessenen Temperaturen und der Anzahl MLS10 Überrollungen. Als Ergebnis liefert es eine Tabelle, welche die Dehnungen in Abhängigkeit von der Überrollungsanzahl zeigt. Zuerst wurden die Daten überprüft und bereinigt. Beschädigte Dateien und / oder Dateien mit zu hohem Rauschen, Ausreißern, usw. wurden nicht berücksichtigt. Die gültigen 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:

- Durchführen einer Tiefpassfilterung der Datensätze mit 20Hz Grenzfrequenz um Hochfrequenzrauschen zu beseitigen.
- Berechnen der absoluten Differenz zwischen der maximalen und minimalen Dehnung jeder Überrollung, unabhängig davon, wo sich die Null-Linie befindet.
- 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.
- 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 oben genannte Skript erzeugt aus den täglich erfassten Datensätzen eine Tabelle mit vier Spalten. 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 jener der gültigen Messungen. Anhand der erfassten Daten während des MLS10 Betriebes errechnet das Skript die durchschnittliche Temperatur. Es werden nur die Dehnungen berücksichtigt welche im Bereich $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dieser Durchschnittstemperatur erhoben wurden benutzt.

4.3.3 Dynamische Verformungsmessung mit Beschleunigungssensoren

Zur Erfassung der dynamischen Durchbiegung des Belags unter der Last des MLS10 wurden fünf Sensoren der Firma Kistler Instrumente AG im Belag eingebaut. Für die Installation wurden Löcher von 5cm Durchmesser und ca. 4cm Tiefe in den Belag gebohrt. Spezielle Aluminiumhalterungen wurden gefertigt um den Sensor einzufassen und ihn auf dem Boden des gebohrten Loches mittels eines Klebstoffes befestigen zu können. Dieser wurde longitudinal (z-Achse senkrecht) zu der Fahrbahnoberfläche angeordnet. Ausserdem wurde der Sensor ca. 10mm unter die Fahrbahnoberfläche gesetzt um ihn nicht allzu stark der MLS10 Radlast auszusetzen. Um die Kabel der Sensoren aus den Einbaupositionen wegzuführen, wurde ein Durchgang von etwa 2mm Breite und 3mm Tiefe herausgeschnitten. Um schädliche Wassereinflüsse zu reduzieren, wurden die eingebauten Sensoren mit Wachs vergossen (vgl. Abb. 11).



Abb. 11 Beschleunigungssensoren mit vorgegebenen Koordinatenrichtungen (links) und im Belag eingebauter und vergossener Sensor (rechts)

Für die Auswertung der Beschleunigungen wurde die gleiche Methode wie bei der Auswertung der Dehnungen benutzt (siehe Kapitel 5.3.2). An Stelle der Dehnungsamplituden und deren äquivalenten Werte wurden hier die Beschleunigungsamplituden und deren äquivalenten Werte berechnet.

4.3.4 Spurrinnenbildung durch Querprofilmessung

Es wurden Querprofilmessungen mit einem Profilometer vorgenommen um die Spurrinnenbildung und die permanente Deformation des Belags zu erfassen. Der eingesetzte Profilometer besteht aus einem Alubalken mit einem sich darin bewegenden Messrad (Abb. 12), welches sich in ständigem Kontakt mit dem Belag entlang des Trägers bewegt. Der Balken liegt an seinen Enden auf höhenverstellbaren Füßen, welche vor Beginn eines Tests fixiert werden um die Referenzhöhe der Messung konstant zu halten. 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.

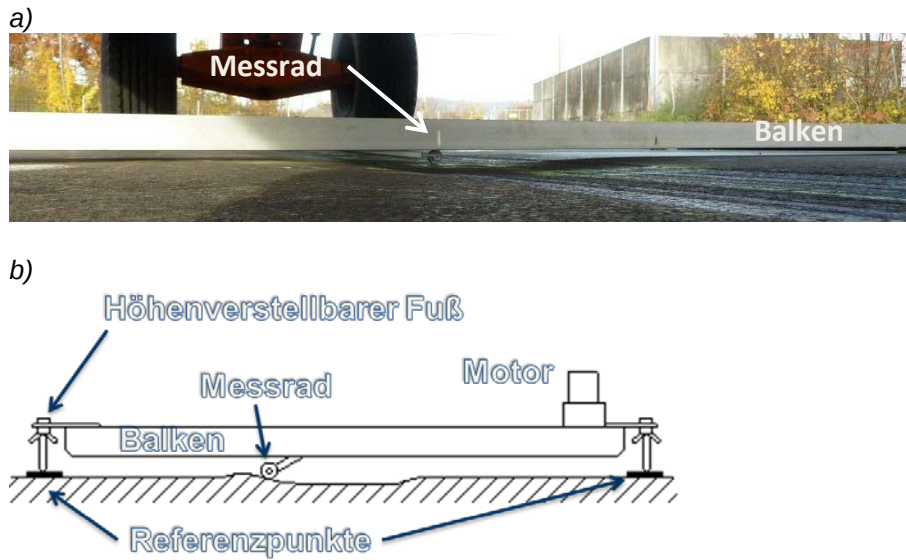


Abb. 12 Foto des Profilometers zur periodischen Querprofilmessung (a) und schematische Skizze der Messanordnung (b)

Die Messdaten des Profilometers wurden im ASCII-Format auf einem lokalen Rechner gespeichert. Die Datei enthält eine Tabelle mit der Position des Messrades entlang des Balkens und dessen Ab-standes zur Belagsoberfläche. Die Gesamtmesslänge wurde auf 1400mm begrenzt mit einem Messintervall von 5mm. Die Rohdaten wurden zunächst bereinigt, d.h. es wurden Ausreisser entfernt, welche durch eventuelle kleine Steine im Weg des Messrades entstanden sind. Danach wurden die bereinigten Daten unter Berücksichtigung des 5mm Intervalls gemittelt. Die erste Messung (Nullmessung) wurde als Referenz gesetzt. Die gemessene Spurrinnentiefe widerspiegelt demzufolge die Relation zu dieser Referenz. Um die maximale Spurrinnentiefe zu berechnen, wurde zuerst die mittlere Verformung der Fahrspur unter dem Reifen berechnet. Es muss berücksichtigt werden, dass aufgrund des Materialtransportes zu den Rändern der Spurrinne diese Bereiche sich über der ursprünglichen Referenzhöhe befinden können. Bei der Berechnung der maximalen Spurrinnentiefe wurde diese Anhebung als obere und die gemittelte Eindringtiefe des Belastungsrades als untere Extremität gewählt. (siehe Abb. 13). Dieses Resultat wurde zum Schluss der Anzahl Lastanwendungen der MLS10 gegenüber gestellt.

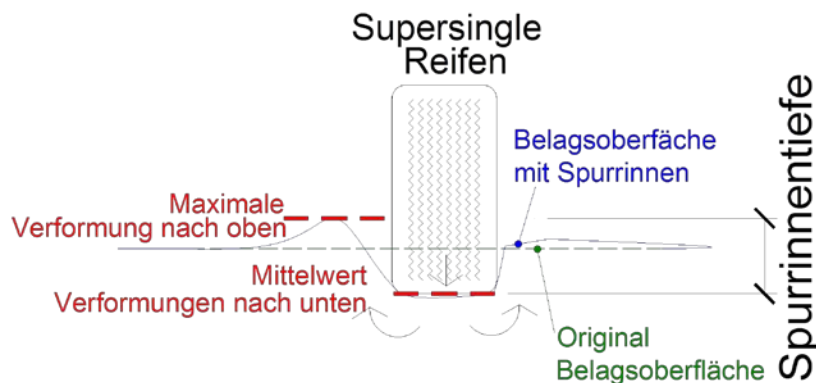


Abb. 13 Auswertung der Spurrinnentiefe

4.3.5 Verformungsmessung mit FWD (Falling Weight Deflectometer)

Die international am meisten eingesetzte Methode zur strukturellen Evaluation des Belags erfolgt mittels eines "Falling Weight Deflectometer" (FWD). Dieses Gerät simuliert die dynamische Belastung eines vorbeifahrenden Lastwagens indem es ein schweres Gewicht auf den Belag fallen lässt. Die dynamischen Eigenschaften der Last werden mittels einer daran angebrachte Feder kontrolliert. Der kurzzeitige Impuls verursacht eine Durchbiegungsmulde auf der Belagsoberfläche, welche mit einer Reihe oberflächlich aufgesetzter Geophone registriert wird (Abb. 14). Die Geschwindigkeiten der Belagsverformungen werden an mehreren Stellen aufgezeichnet und in Durchbiegungen umgerechnet. Die Amplituden und Durchbiegungen, welche mit diesem Gerät gemessen werden, können als Indikatoren für den Zustand des Belags herangezogen werden. Im vorliegenden Fall wurden die Messungen von der Firma Infralab SA aus Lausanne und von der Universität Parma durchgeführt. Beide Messungen wurden mit einem Gewicht durchgeführt welcher den Belag mit einer Kraft von 40kN beanspruchte. Details über das FWD und die Messmethode finden sich in der Literatur [16] [17].



Abb. 14 FWD Nullmessung auf dem Prüffeld durch die Firma Infralab SA aus Lausanne (Links) und Endmessung mit der FWD des Universität Parma (Rechts)

4.3.6 Rissermittlung durch visuelle Inspektionen

Zwecks einer subjektiven Identifikation allfälliger Risse und anderer strukturelle Schädigungen wurden zusätzlich visuelle Inspektionen der Belagsoberfläche und Fotodokumentationen durchgeführt. Hierzu wurden die Belastungsstrecken in 12 Felder zu je 1m² Grösse eingeteilt (Abb. 15) was ebenfalls das Positionieren der Sensoren vereinfachte (siehe Kapitel 334.4).

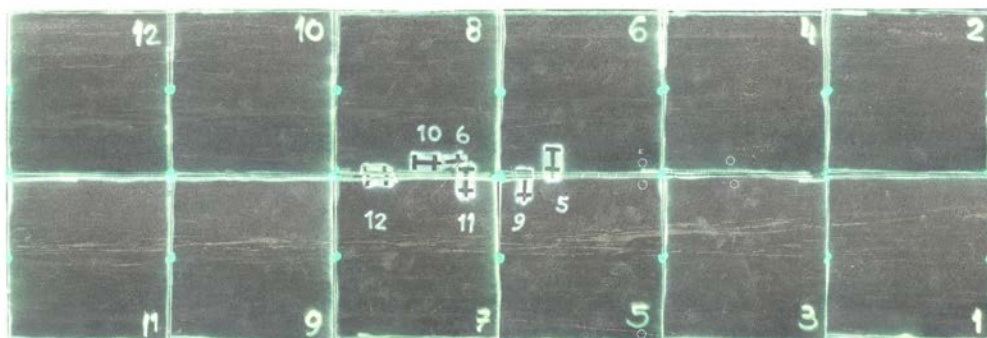


Abb. 15 Einteilung eines Prüffeldes

4.3.7 Materialuntersuchungen im Labor

Am Ende des Tests wurden Bohrkerne des Belags zwecks Laboruntersuchungen entnommen. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt: Bestimmung der Raumdichte der Bohrkerne. Rohdichte, Bindemittelgehalt und Korngrossverteilung der verschiedenen Schichten gemäss SN 670 406 [23], SN 670 401 [20], SN, SN 670 405 [22] bzw. SN 670 402. Bestimmung des Schichtenverbundes zwischen Asphaltsschichten nach Leutner gemäss Schweizer Norm SN 670 641 [18]

4.4 Messlayout und Datenerfassung

Um die Sensoren und Messpositionen aufeinander abzustimmen und eine effiziente Datenerfassung zu gewährleisten wurde ein Messkonzept erarbeitet, welches die Anzahl und Position der Sensoren sowie die Zeitpunkte für die einzelnen Messungen festlegt. Abb. 16 bis Abb. 23 zeigen die Positionen der Messstellen und Sensoren auf den Prüffeldern.

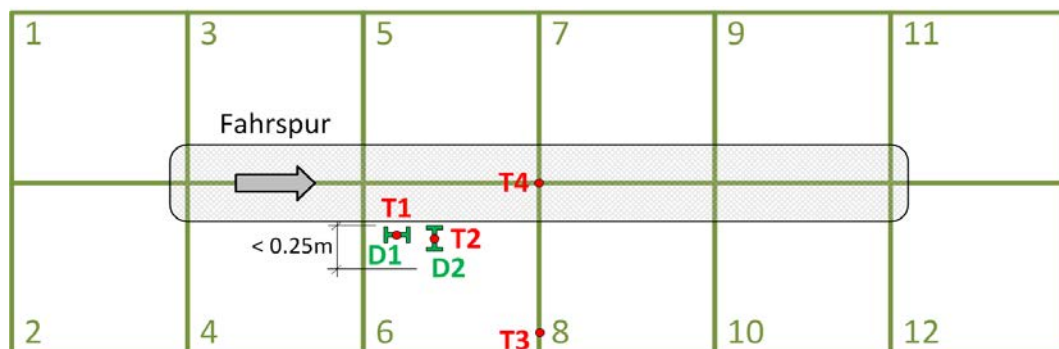


Abb. 16 Positionen der Dehnungsmessstreifen und Thermoelemente (kanalisiert)

In den vorhergegangenen Projekten bezüglich der Ermittlung, Versagensgrenzen von unterschiedlichen Norm Belägen [1] [2] [3] wurden bereits umfangreiche Dehnungsmessungen im kanalisierten Betrieb durchgeführt, wobei vor allem die Dehnungen im Projekt ASTRA 2011/004 von Bedeutung sind. Es wurde deshalb auf den Einbau von Sensoren zwischen den Asphaltsschichten verzichtet und lediglich an der Belagsoberfläche zwei Sensoren eingebaut welche die transversalen und longitudinalen Dehnungen direkt neben der Fahrspur messen. Um die erhaltenen Resultate besser interpretieren zu können wurden ebenfalls Thermoelement direkt bei den DMS platziert. Des Weiteren wurde ein Thermoelement direkt in der Fahrspur beim Beschleunigungssensor B3 und zum direkten Vergleich ein Thermoelement ausserhalb der Fahrspur beim Beschleunigungssensor B5 eingebaut (vgl. Abb. 17). Die Anordnung der Beschleunigungssensoren ist so gewählt, dass einerseits in Querrichtung die Deflektionsmulde berechnet werden kann und weiter die erhaltenen Resultate mit den Werten anderer Messsystem (bspw. FWD) verglichen werden können. Es wurde darauf geachtet in der Fahrspur selbst und direkt daneben in Überrollrichtung eine Redundanz aufzubauen, falls durch die Belastung des MLS10 Sensoren zerstört werden.

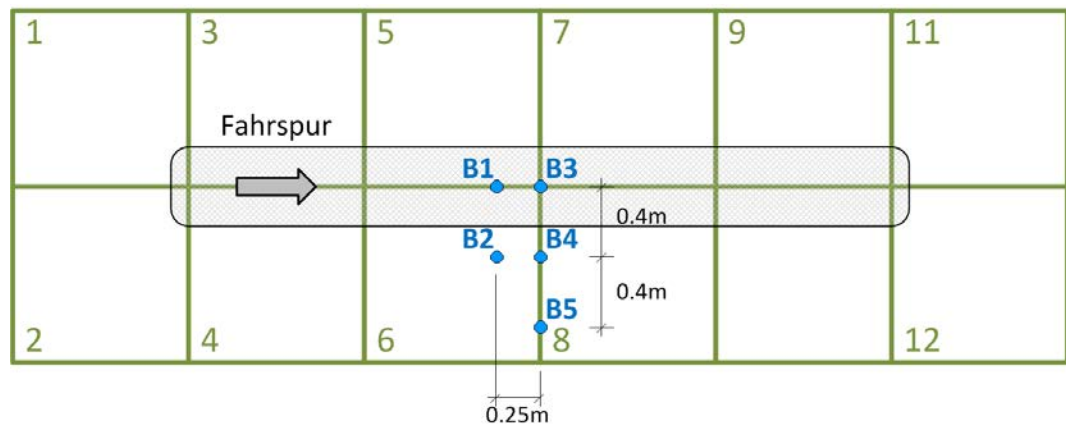


Abb. 17 Positionen der Beschleunigungssensoren (kanalisiert)

Es wurden drei Profilmessstellen mit einem Abstand von jeweils 0,5m voneinander definiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Messstellen in einem Bereich verlaufen, welcher nicht durch im Belag eingebauten Sensoren gestört ist. Das Profil wurde jeweils auf einer Länge von 1,4m um die Mittellinie der 455mm breiten Fahrspur gemessen.

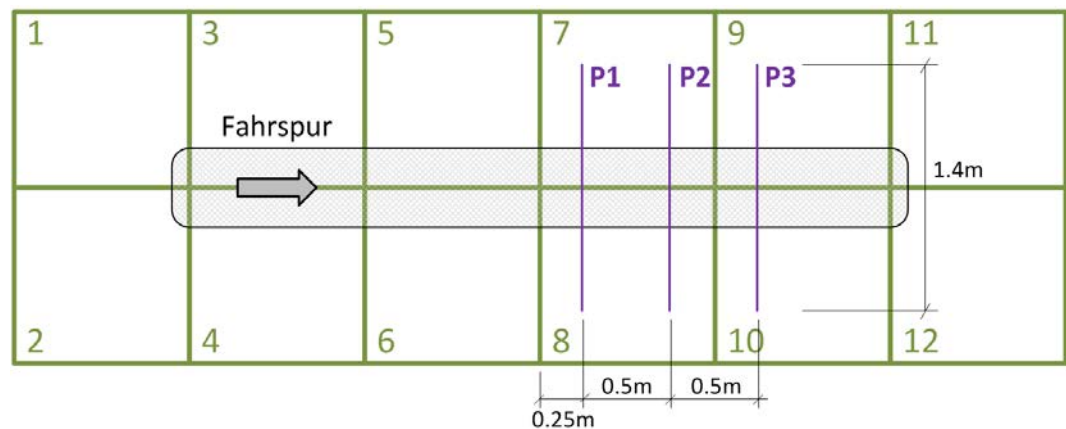


Abb. 18 Positionen der Profilmessungen (kanalisiert)

FWD (Falling Weight Deflectometer) Messungen wurden an 45 Punkten vorgenommen. Abb. 19 zeigt die Position der Messpunkte. Die Punkte 21 bis 25 befinden sich in der Mitte der Fahrspur. Generell wurde der Messpunktabstand auf 1m festgelegt, quer zur Fahrtrichtung im Bereich der Fahrspur wurde deren Dichte jedoch erhöht. Die Temperatur und der Schädigungsgrad des Belags haben einen Einfluss auf die Werte der Durchbiegung. Messungen ausserhalb der belasteten Fläche können für Vergleichszwecke und der Auswertung des Belastungseinflusses herangezogen werden.

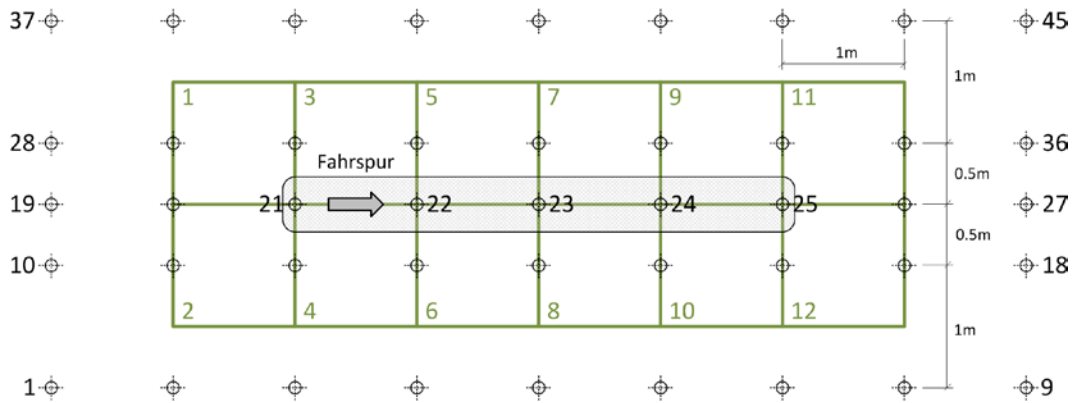


Abb. 19 Positionen der einzelnen FWD-Messungen (kanalisiert)

Für den nicht kanalisierten Betrieb wurden während des Belagseinbaus zusätzlich DMS und Thermoelemente auf der Fundation und zwischen den beiden Asphaltschichten platziert (D1-D4 und T1-T4). Die Positionen der Thermoelemente T1 bis T4 und der Dehnungsmessstreifen D1 bis D4 wurden aufeinander abgestimmt um einerseits die gemessenen Dehnungen in Relation zur lokalen Temperatur zu setzen und andererseits den Einbauprozess zu vereinfachen (vgl. Abb. 20). Pro DMS wurde jeweils ein Thermoelement verbaut. Die vertikale Position ergibt sich aus dem Schichtaufbau. D1 und D2 befinden sich auf dem ungebundenen Gemisch 0/45 am unteren Ende der Tragschicht. Sie wurden direkt auf die Fundationsschicht gelegt und durch den Einbau der Tragschicht überdeckt. D3 und D4 befinden sich am oberen Ende der Tragschicht, direkt unterhalb der Deckschicht. Die in den Schichten eingebauten Dehnungsmessstreifen wurden in der Fahrspur platziert, dort wo die grössten Dehnungen erwartet werden. Dabei misst jeweils ein DMS die transversalen Dehnungen währendem der zweite DMS die longitudinalen Dehnungen aufzeichnet. Da jeder in den Belag eingebrachte Sensor als Störung des Aufbaus angesehen werden muss, wurde der Abstand in Fahrtrichtung zwischen den Sensoren möglichst gross gewählt. Dies stellt sicher, dass lokal im Belag keine Häufung von Störungen des Aufbaus auftreten. Um die Dehnungen der Belagsoberfläche quer und längs zur Überrollung zu messen, wurden Zusätzlich zwei zusätzliche Dehnungsmessstreifen inklusive Thermoelemente auf der Oberfläche direkt neben der äussersten Fahrspur platziert.

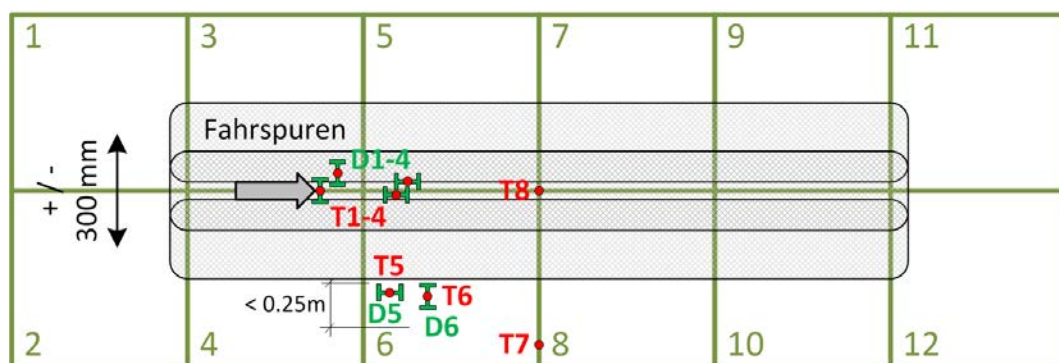


Abb. 20 Positionen der Dehnungsmessstreifen und Thermoelemente (nicht kanalisiert)

Zusätzlich wurden zwei Thermoelemente unterhalb der Fahrspur und ausserhalb bei den Beschleunigungssensoren B3 und B5 platziert (vgl. Abb. 21). Die Beschleunigungssensoren wurden exakt gleich wie im kanalisierten Prüffeld angeordnet. Die identische Anordnung der Sensoren zwischen der kanalisierten und nicht kanalisierten MLS10 Betriebsart ermöglicht einen direkten Vergleich der entsprechenden Resultate. Dies ist in den unternommenen Untersuchungen von zentraler Bedeutung.

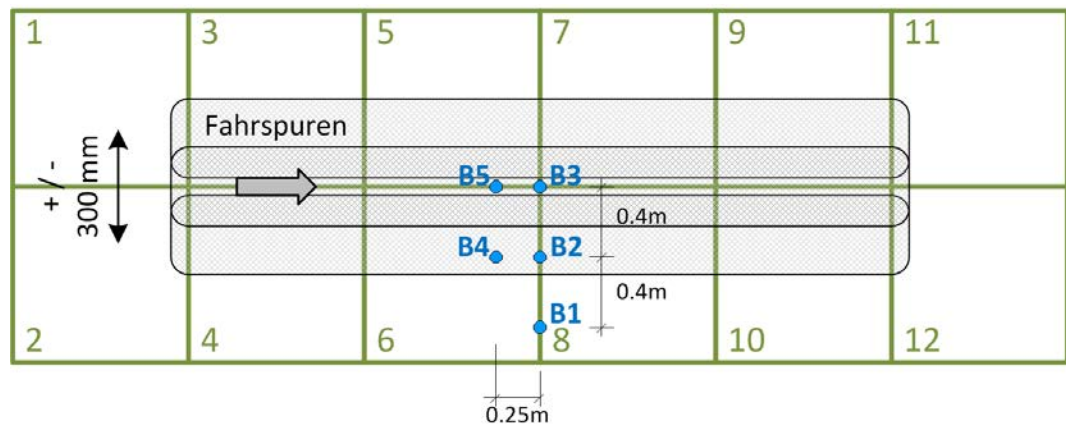


Abb. 21 Positionen der Beschleunigungssensoren (nicht kanalisiert)

Gestützt auf die genannten Überlegungen wurden die Profilmessstellen zwecks direkter Vergleichbarkeit beider Betriebsarten an exakt denselben Positionen definiert (vgl. Abb. 22).

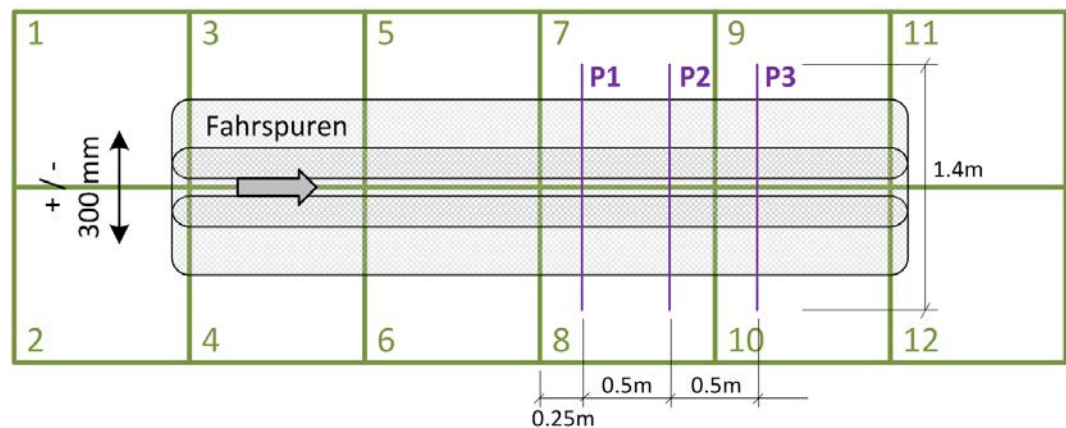


Abb. 22 Positionen der Profilmessungen (nicht kanalisiert)

Dasselbe gilt ebenfalls für die Messpunkte der FWD Messungen (vgl. Abb. 23).

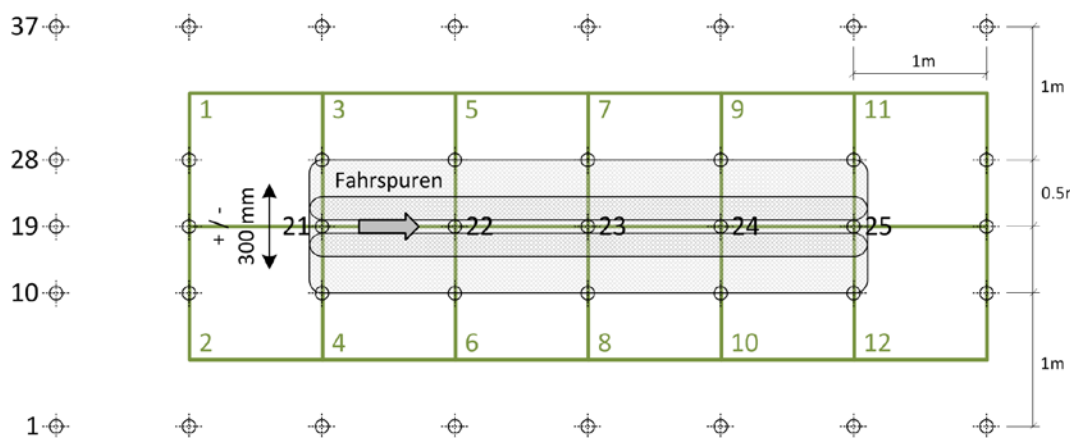


Abb. 23 Positionen der einzelnen FWD-Messungen (nicht kanalisiert)

In Abb. 24 sind die Positionen der Messeinrichtungen dargestellt.

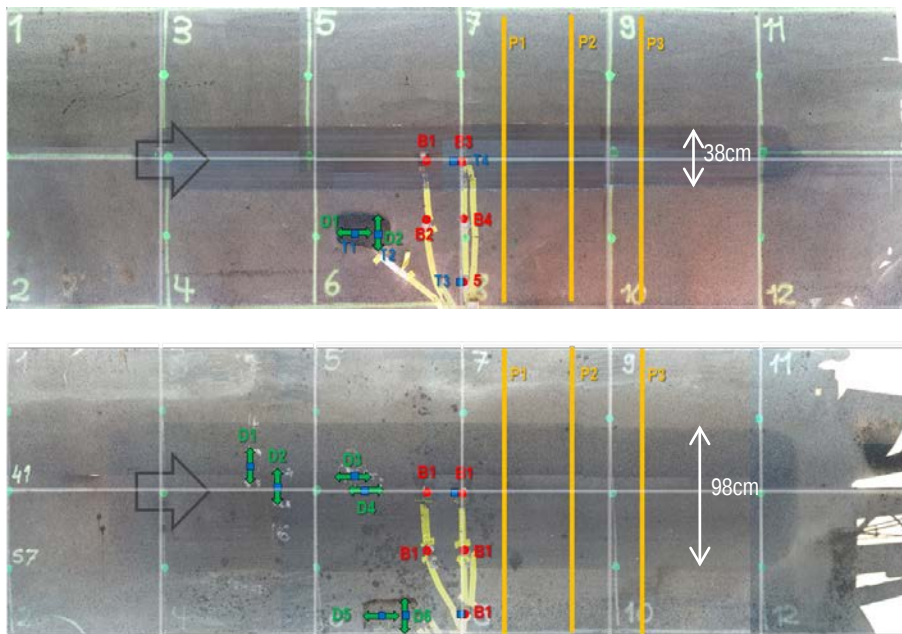


Abb. 24 Ansicht der Sensoren und Messpositionen

Die Temperaturmessung wurde während der gesamten Projektdauer, einschliesslich der Ruhephasen in der Nacht und an den Wochenenden durchgeführt. Dabei wurden die Messwerte alle fünf Minuten einmal gespeichert. Die Messungen der Dehnungen und der Beschleunigungen erfolgen alle fünf Minuten für eine Zeitdauer von 30 Sekunden ausschliesslich während dem MLS10-Betrieb. Die Profilmessungen, die FWD Messungen und die visuellen Inspektionen wurden zu diskreten Zeitpunkten während des Versuchsverlaufs durchgeführt. Einen Überblick der periodischen Messungen ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2 Messzeitpunkte der periodischen Messungen

Prüfposition	Überrollungen	Datum	Querprofil	Inspektion	FWD
Kanalisiert	Nullmessung	22.07.2014			X
		23.07.2015		X	
		24.07.2015	X		
	5'000	24.07.2015	X		
	15'000	29.07.2014	X		
	30'000	30.07.2015	X		
	50'000	31.07.2015	X		
	100'000	05.08.2015	X		
	150'000	11.08.2014	X	X	
	200'000	26.08.2014	X	X	
	250'000	28.08.2014	X	X	
		21.10.2015			X
	Nullmessung	22.07.2014			X
		20.08.2015	X	X	
Nicht kanalisiert	5'000	20.08.2015	X		
	15'000	25.08.2015	X	X	
	30'000	27.08.2015	X		
	50'000	28.08.2015	X	X	
	100'000	07.09.2015	X	X	
	150'000	09.09.2015	X	X	
	200'000	15.09.2015	X	X	
	250'000	21.09.2015	X	X	
		21.10.2015			X

5 Betrieb des MLS10

5.1 Last und Bereifung

Die Last der einzelnen Bogies des MLS10 wurde auf je 65kN festgelegt. Dies entspricht einer totalen Achslast von 130kN. Diese Last wurde in regelmässigen Zeitabständen mit einer statischen LKW Waage der Firma Hänni Instrumente AG überprüft. Der Reifendruck wurde auf 10.5bar eingestellt. Zum Einsatz kam die Super Single Bereifung von Goodyear der Dimension 455/40 R22.5. Die Überrollgeschwindigkeit wurde auf 5m/s, festgelegt.

5.2 Nicht kanalisierte Belastung (Lateral Wandering)

Im nicht kanalisierten Betrieb wurde die Seitwärtsbewegung des Belastungsrades gemäss einer Normalverteilung angesteuert. Hierbei beträgt die maximale Auslenkung auf beiden Seiten 300mm. Diese Distanz wird von der Steuerungssoftware in 14 Positionen aufgeteilt (Abb. 25). Somit beträgt die Differenz zwischen den Positionen 21.4mm. Jede Position stellt genau genommen eine eigene Radspur dar. Die seitlichen Verschiebungen erfolgen gleichzeitig mit den Überrollungen.

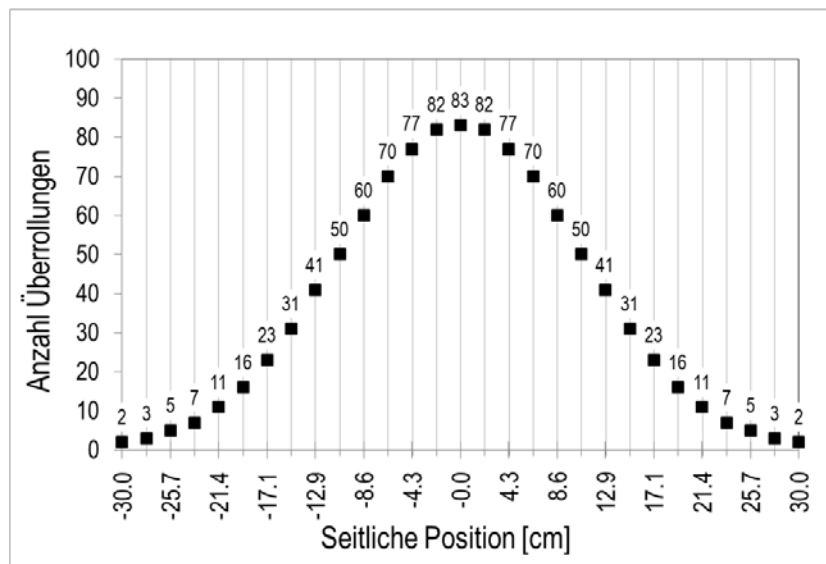


Abb. 25 Verteilung und Anzahl der Überrollungen an den entsprechenden Positionen

5.2.1 Anzahl Überrollungen

Gestützt auf den Resultate von vorgängigen Forschungsprojekte zur Ermittlung der Versagensgrenzen von verschiedene Normbelägen [1] [2] [3], wurden die Anzahl Überrollungen für diese Messkampagne auf 250'000 pro Betriebsart festgelegt. Die in [1] festgehaltenen Resultate haben gezeigt, dass für ähnliche Beläge, nach dieser Anzahl an Lastapplikationen eine genügend verlässliche Aussage bezüglich der Schädigungswirkung und der zugrundeliegenden Mechanismen getroffen werden kann.

Die Belastung des Belags durch den MLS10 wurde in 2 Phasen durchgeführt. Die kanalisierte Belastung wurde im Juli und August 2014 durchgeführt. Um einen realistischen Vergleich der beiden Betriebsarten durchführen zu können, wurde die nicht kanalisierte Belastung zur selben Zeit (August/September) des Jahres 2015 durchgeführt. Somit ergaben sich für beide Betriebsarten ähnliche klimatische

Bedingungen was den direkten Vergleich beider Testfelder begünstigte. Die kumulierte Anzahl an Überrollungen jeder Betriebsart ist in der nachfolgenden Abb. 26 ersichtlich.

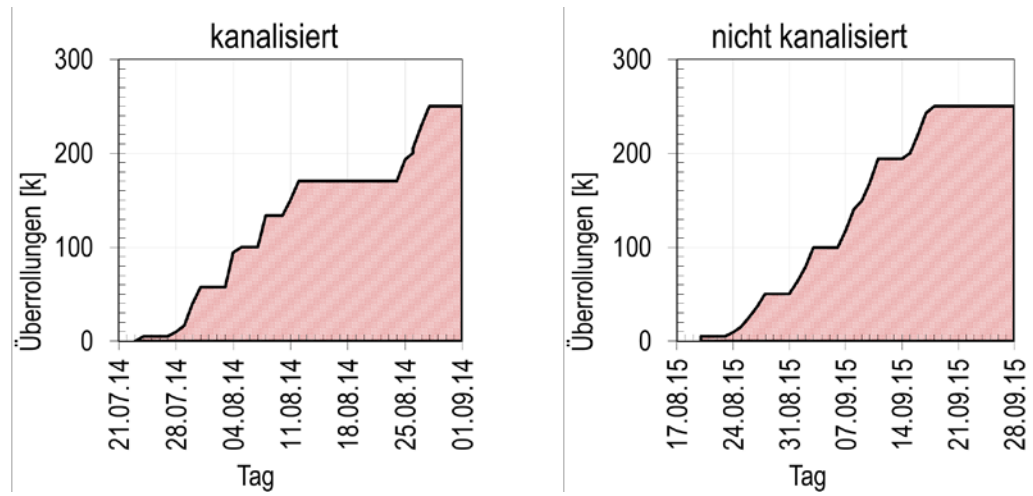


Abb. 26 Kumulierte Überrollungen kanalisierter und nicht kanalisierte Betrieb

6 Ergebnisse

6.1 Temperaturverlauf

Wie bereits erwähnt hat die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des Belages. Für die Resultatinterpretation hebt dieser Umstand die Notwendigkeit einer angemessenen Temperaturüberwachung hervor. Entsprechend sind in Abb. 27 und Abb. 28 die gemessenen Temperaturen während des kanalisierten und nicht kanalisierten Betriebes festgehalten. Aufgrund einer frühzeitigen Funktionsstörung der Thermoelemente T1 und T2 in der nicht kanalisierten Teststrecke wurden diese aus Abb. 28 ausgeblendet.

In der gesamten Testphase betrug die durchschnittliche Temperatur im kanalisierten ca. 20°C und im nicht kanalisierten Betrieb ca. 23°C. Auffallend sind die typischen Tag- und Nacht Temperaturschwankungen.

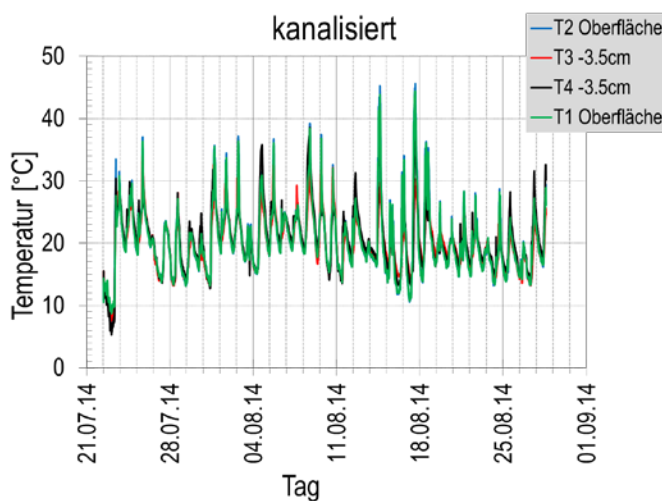


Abb. 27 Temperaturverlauf für die Thermoelemente T1, T2, T3 und T4, kanalisierte Belastung

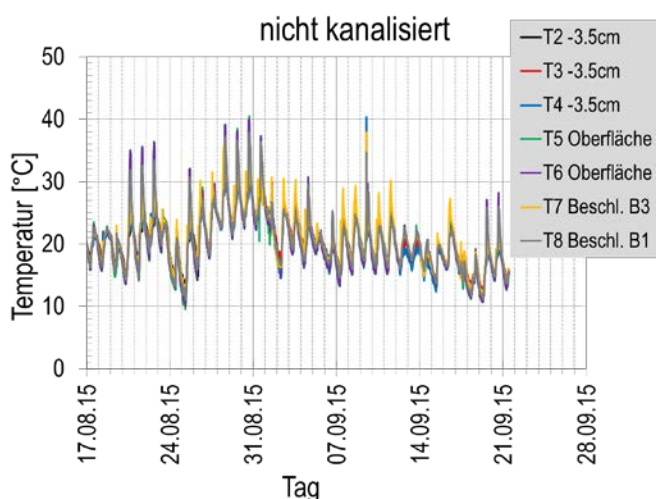


Abb. 28 Temperaturverlauf für die Thermoelemente T2 bis T8, nicht kanalisierte Belastung

In Tabelle. 3 sind die gemittelten Temperaturen während der kanalisierten und nicht kanalisierten Betriebszeiten mit dem MLS10 dargestellt.

Tab. 3 Mittlere und Max. bzw. Min. Temperaturen während der Betrieb

	Thermoelement	Mittlere Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]	Min. Temp. [°C]
kanalisiert	T1 Oberfläche	23.5	33.9	13.7
	T2 Oberfläche	23.8	34.5	13.7
	T3 (-3.5cm) neben der Fahrspur	21.5	29.7	13.6
	T4 (-3.5cm) in der Fahrspur	26.2	37.6	13.5
	Mittelwert	23.7	33.9	13.6
nicht kanalisiert	T1 (-3.5cm)		Defekt	
	T2 (-3.5cm)		Defekt	
	T3 (-3.5cm)	23.8	33.6	14.3
	T4 (-3.5cm)	23.7	32.8	14.1
	T5 Oberfläche	22.1	30.8	12.8
	T6 Oberfläche	22.0	30.1	13.8
	T7 Oberfläche	25.1	35.6	14.5
	T8 Oberfläche	21.4	28.6	13.7
	Mittelwert	23.0	31.9	13.9

Betrachtet man die kanalisierte Belastung fällt auf, dass die mittleren Temperaturen der oberflächlich montierten Thermoelementen T1 und T2 ähnlich sind. Im Vergleich dazu fällt jene von T3 ca. 3°C tiefer und jene von T4 ca.3°C höher aus. Obwohl beide Thermoelemente sich in derselben Belagsschicht befinden, weisen sie ein Temperaturunterschied von 6°C voneinander auf. Dieser Diskrepanz entspringt aus der Tatsache, dass während T4 direkt unterhalb der Belastungsspur platziert wurde T3, 1m daneben angeordnet ist. Im ersten Moment ist man geneigt die höhere Temperaturaufzeichnung von T4 der MLS10 Erhitzung zuzuschreiben. Diese hat allerdings nur einen vernachlässigbaren Einfluss, vielmehr ist die Erwärmung dieses Bereiches der mechanischen Belagsreibung zuzuschreiben welche durch die MLS10 Belastung hervorgerufen wird. Bekräftigt wird diese Aussage von den erfassten Minimaltemperaturen welche sich bei den vier genannten Sensoren nur geringfügig voneinander unterscheiden. In den grafisch dargestellten gemittelten Temperaturen während der Betriebsphase von Abb. 29 werden die hier beschriebenen Temperaturentwicklungen verdeutlicht.

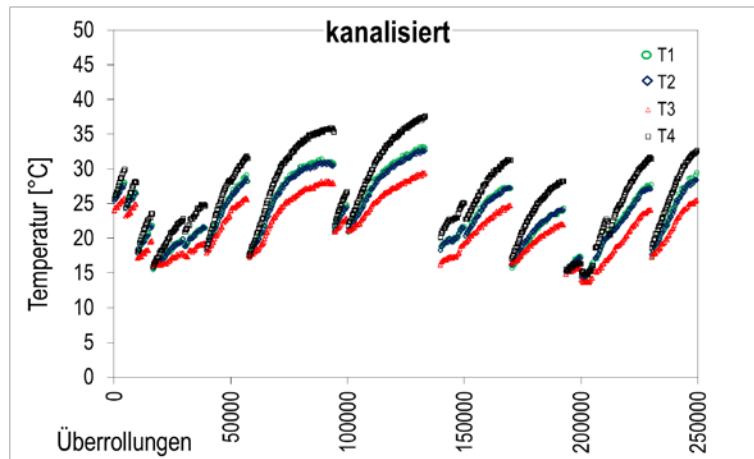


Abb. 29 Temperaturverlauf für während der Betriebsphase, kanalisierte Belastung

Der nicht kanalisierte Testbereich weist eine vergleichbare Temperaturverteilung wie der kanalisierte. Hier befindet sich das Thermoelement T7 direkt unter der Belastungspur und weist demzufolge auch die höchste Temperatur aller in diesem Feld eingesetzten Sensoren. Hingegen hat T8 welcher sich ausserhalb der Spur befindet die niedrigsten Werte aufgezeichnet (vgl. Abb. 30).

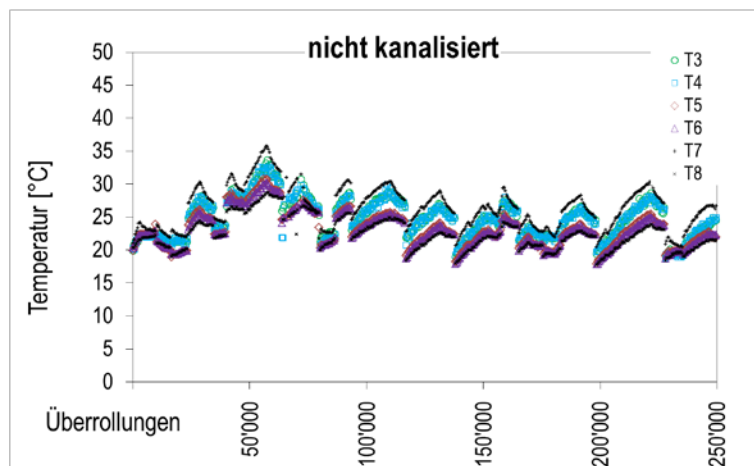


Abb. 30 Temperaturverlauf für während der Betriebsphase, nicht kanalisierte Belastung

Vergleicht man die Temperaturen beider Betriebsarten fallen keine grosse Unterschiede auf. In Abb. 31, ist deutlich zu erkennen, dass die am häufigste registriert Temperatur im kanalisierten Bereich 23°C beträgt. Entsprechend der normalverteilten Belastungsbewegung der MLS10 entstand eine analoge Temperaturverteilung, welche zwischen 15°C und 34°C variierte, mit 20°C als häufigster vertretener Wert.

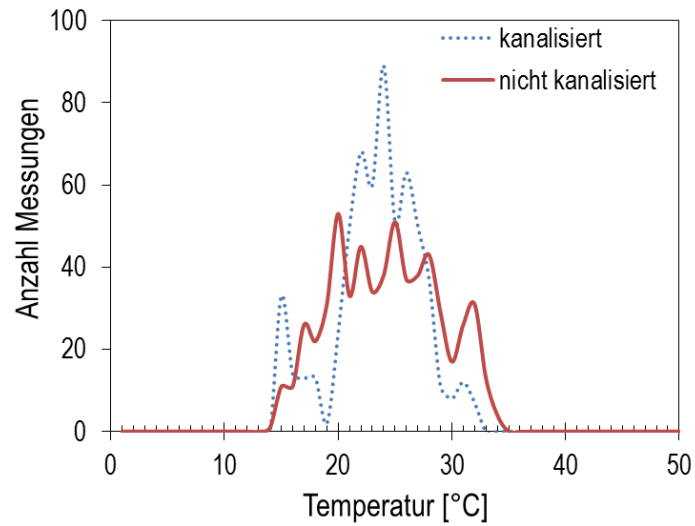


Abb. 31 Häufigkeitsverteilung der Temperatur in den Testfeldern

6.2 Spurrinnenbildung

Da der getestete Belag für die Verkehrslastklasse T2 ausgelegt wurde, sind erwartungsgemäss relativ tiefe Spurrinnen gemessen worden (siehe Abb. 32 und Abb. 33).

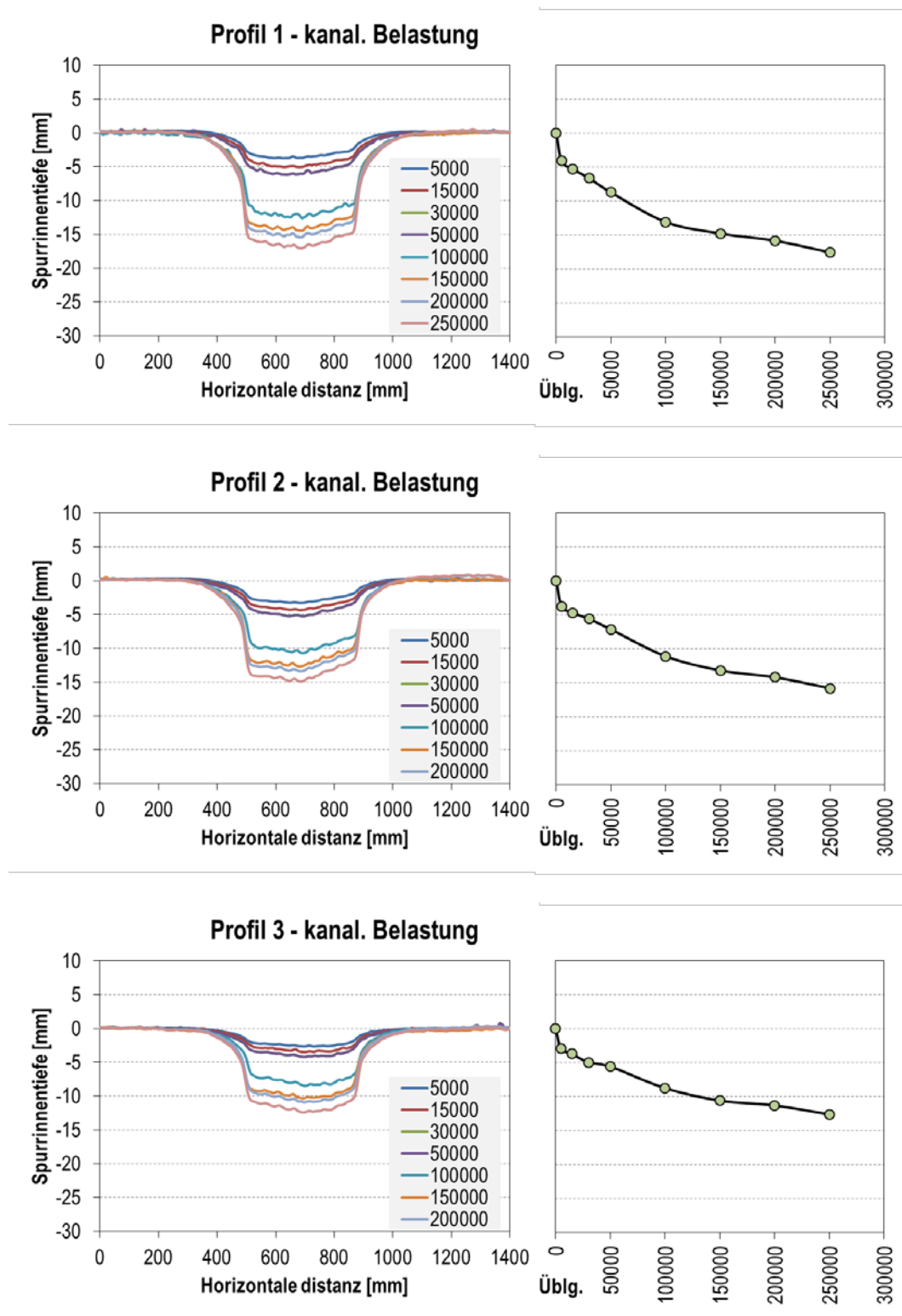


Abb. 32 Querprofile der kanalisierte Belastung in Abhängigkeit der MLS10 Überrollungen

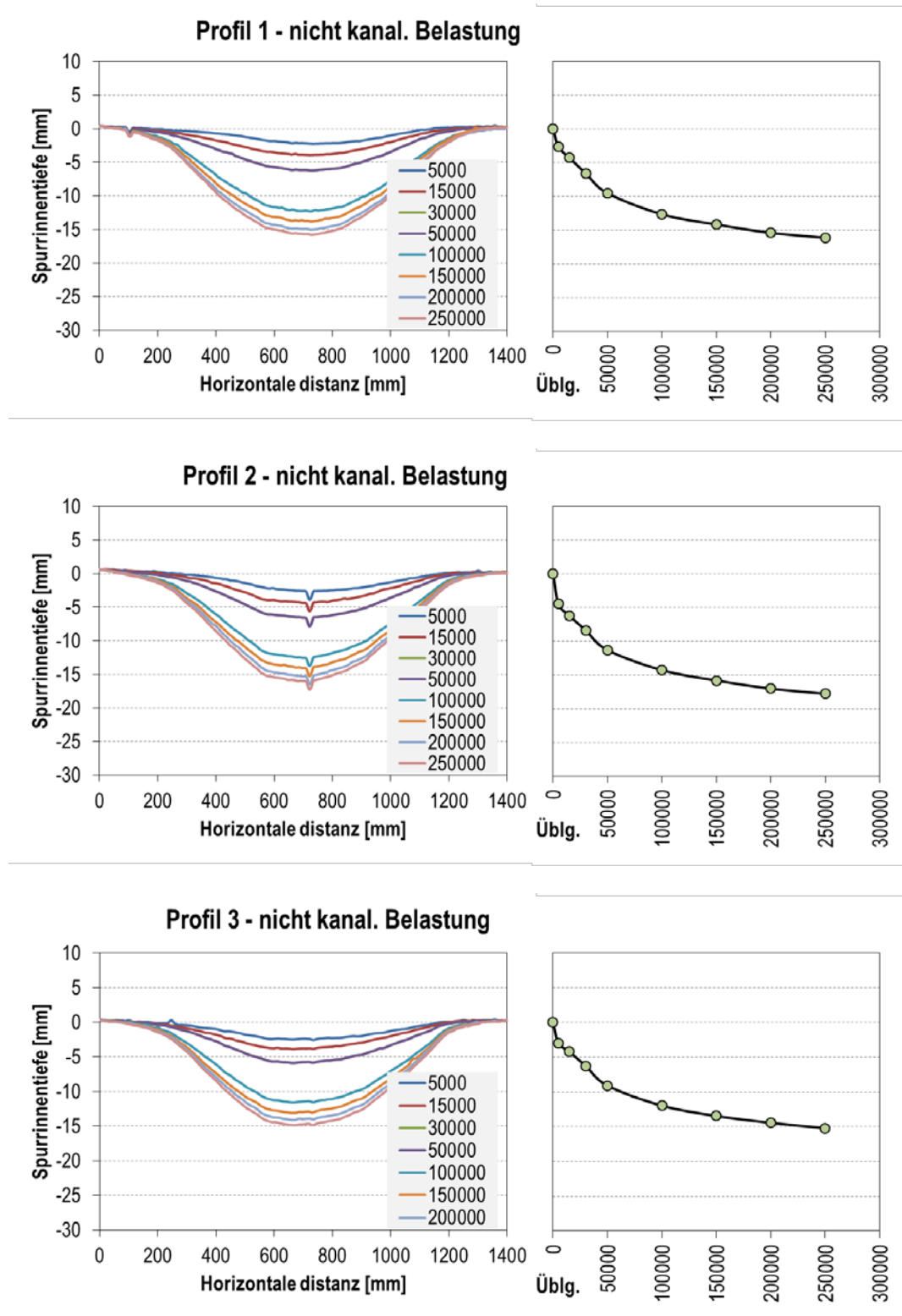


Abb. 33 Querprofile der nicht kanalisierter Belastung in Abhängigkeit der MLS10 Überrollungen

Nachdem der Belag mit 250'000 Überrollungen kanalisiert belastet wurde, ergab die Messung des Profils P1 mit ca. 17mm die tiefste Spurrinne (vgl. Abb. 32). Im Vergleich dazu zeigen Profil P2 und P3 welche sich in der Mitte und am Ende der

Belastungsstrecke befinden mit 15mm respektive 13mm niedrigere Spurrinnentiefen. Nach derselben Anzahl Überrollungen im nicht kanalisierten Betrieb beträgt die Spurrinnentiefe P2 in der Mitte der Belastungsstrecke 17mm. Am Anfang wurde eine Profiltiefe P1 von 16mm und am Ende ein Profiltiefe P3 vom 15mm gemessen. Die genannten Messungen sind in Abb. 34 festgehalten worden. Darin ist deutlich zu erkennen, dass die Resultate aus der kanalisierten Belastungsstrecke mehr streuen als jene der nicht kanalisierten. Ursache dieses Phänomens könnte eine lokale Inhomogenität der Foundation sein welche im kanalisierten Betrieb einen grösseren Einfluss aufweist.

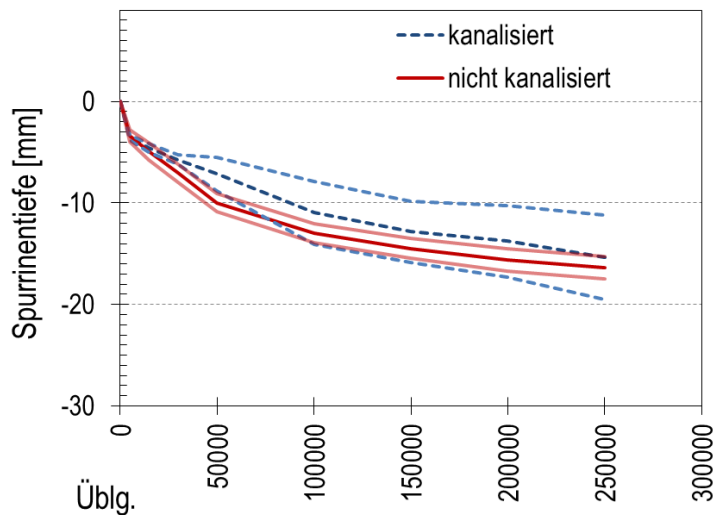


Abb. 34 Vergleich der Spurrinnentiefe der kanalisierte und nicht kanalisierte Belastung

In Abb. 35 ist ein Vergleich der Spurrinnenform für Profile P1 im nicht kanalisierten und P2 im kanalisierten Betrieb aufgezeigt. Die dabei gemessenen Maximaltiefen nach 250'000 Überrollungen ergeben mit 16mm respektive 15mm ähnliche Werte. Die Formen der gemessenen Profile unterscheiden sich wie erwartet entsprechend der gewählten Betriebsrat.

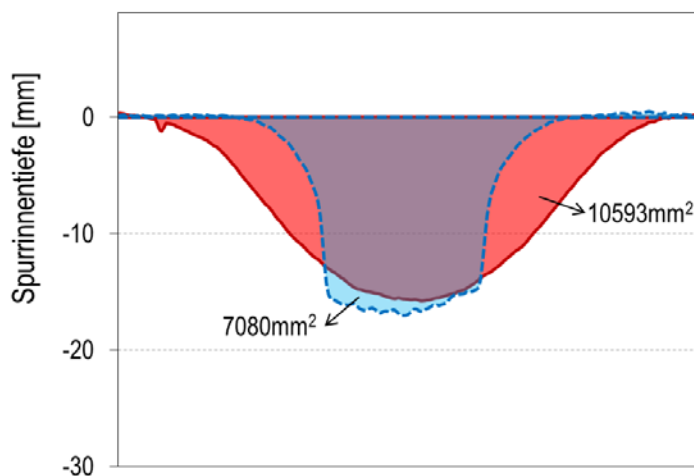


Abb. 35 Vergleich der Spurrinnenform P1 bei nicht kanalisierter und P2 bei kanalisierter Belastung nach 250'000 Überrollungen

Obwohl in der nicht kanalisierten Betriebsart der mittlere Bereich der Spurrinne weniger oft als im kanalisierten Fall überrollt wird, entstehen wie erwähnt ähnliche Spurrinntentiefen. Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen kann den relativ dünnen Asphaltsschichten zugeschrieben werden welche eine höhere Lasteinwirkung im Untergrund zur Folge haben. Hierbei breitet sich in transversaler Richtung der aufgetragene Druck zwiebelförmig aus und verursacht in der Mitte beider Testobjekte ähnliche Verdichtungs/-Deformationserscheinungen.

Da die Maximaltiefe der erzeugten Spurrinne massgebend für die Lebensdauer eines Belages ist, kann in diesem Fall anhand der erhaltenen Resultate behauptet werden, dass für die Ermittlung der Spurrinnenbildung die kanalisierte Belastungsart genügt.

6.3 Risse an der Oberfläche

Anhand einer visuellen Beurteilung wurde die Rissbildung in den einzelnen Versuchsfeldern begutachtet. Abb. 36 und Abb. 37 geben einen Überblick über die Risse am Ende der Belastungszyklen. Die Fotos veranschaulichen das Aussehen der Belagsoberflächen. Die Ermittlung von Rissen mit Breiten unter 1mm konnte nur dank deren höheren Feuchtigkeitsrückhaltung ermöglicht werden. Im Anhang II sind Bilder der periodischen visuellen Oberflächeninspektionen nach einer bestimmten Anzahl Überrollungen hinterlegt.

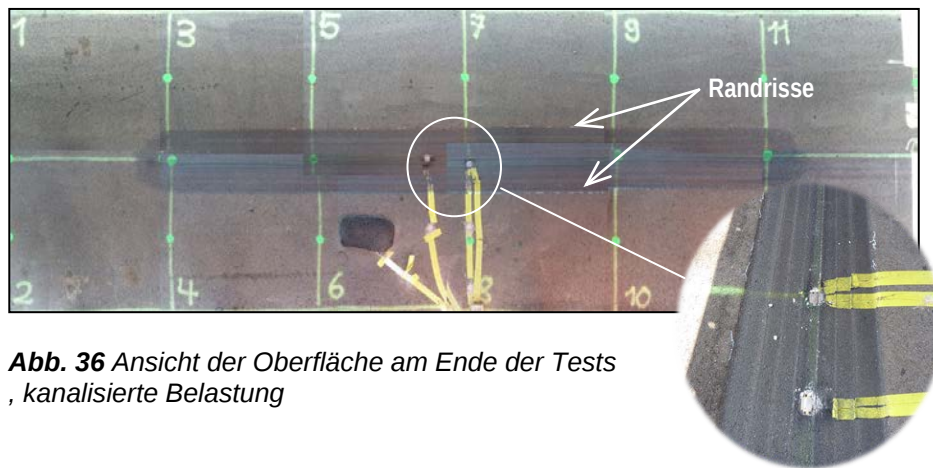


Abb. 36 Ansicht der Oberfläche am Ende der Tests , kanalisierte Belastung

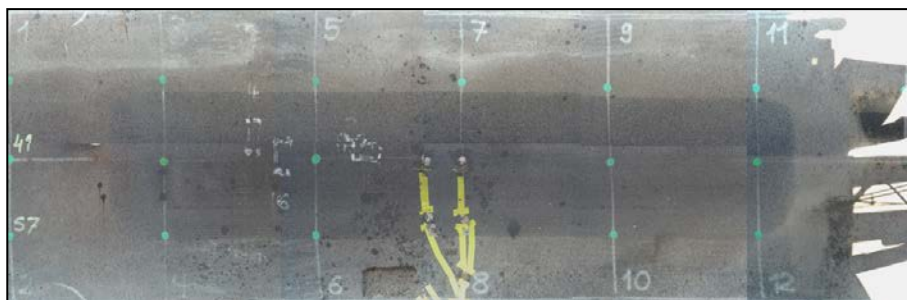


Abb. 37 Ansicht der Oberfläche am Ende der Tests, nicht kanalisierte Belastung

Während in der kanalisierten Belastung Risse schon ab 150'000 Überrollungen sichtbar wurden, bleiben bei der nicht kanalisierten Belastung bis ans Ende der Prüfung aus. Dieser Unterschied entspringt den hohen Schärkräften welche im kanalisierten Betrieb am Rand des Rades wiederholt einwirken und Randrisse erzeugen. Da im realen

Verkehrsvorkommen diese Belastungsart praktisch nicht stattfindet, entspricht dieses Versagenskriterium nur bedingt der erreichten Lebensdauer eines Belages.

6.4 Dynamische Dehnungen im Belag

Die in Abb. 38 dargestellten Diagramme zeigen die Resultate von zwei Dehnungsmessstreifen (DMS) zu Beginn der Belastungsphase. Der dargestellte Aufzeichnungsintervall hat eine Länge von vier Sekunden, was ausreichend ist um die durch alle vier MLS10 Räder verursachten Dehnungsspitzen zu visualisieren. Jede Grafik ist zudem mit dem Zeitpunkt der Messerfassung, der Temperatur des Belags und der abgeschätzten Anzahl Überrollungen versehen. Darüber hinaus ist jede Messkurve mit der Systembezeichnung und der DMS Nummer bezeichnet. Übersichtshalber wurde die Position des jeweiligen DMS-Sensors im Belag bildlich dargestellt.

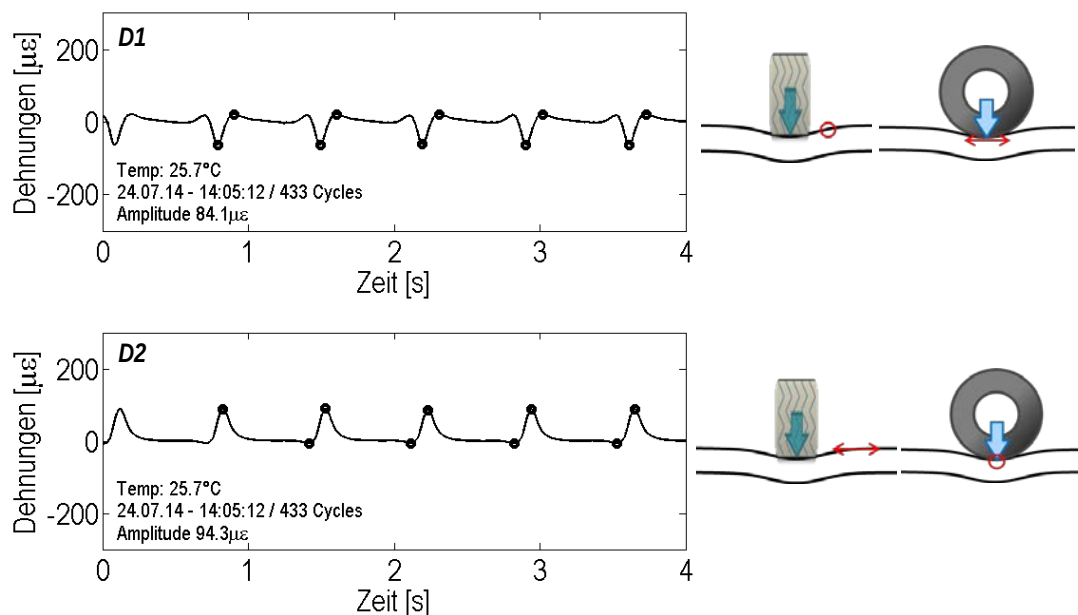


Abb. 38 Ansicht der gemessenen Dehnungen, kanalisierte Belastung

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

- Der Sensor D1 welcher direkt auf der Fahrbahnoberfläche, neben der Radspur angebracht wurde, misst Dehnungen in Fahrrichtung. Bei einer Radüberrollung entstehen Reaktionskräfte im Belag welche diesen in einer Abfolge von Zug-Druck-Zugbelastungen beansprucht. Hierbei sind die Druckmaxima vergleichsweise am bedeutsamsten.
- Der Sensor D2 welcher in der Fahrbahnoberfläche, neben der Radspur montiert wurde, misst Dehnungen senkrecht zur Fahrrichtungen und zeigt kleine Druckmaxima gefolgt von großen Zugmaxima.

In Abb. 39 entspricht jede hellfarbige Markierung der gemittelten Differenzen der Dehnungsamplituden aus jeweils ca. 40 Überrollungen (vgl. Kapitel 5.3.2). In grauer Farbe sind für die entsprechenden Intervalle die dazugehörigen Temperaturen gemittelt und entsprechend aufgetragen worden. Diese Datenanalyse erfolgte für die gesamte

Betriebszeit der MLS10. Um einen temperaturunabhängigen Vergleich ermöglichen zu können, wurden die Resultate bei einer Temperatur von 20°C hervorgehoben. Abb. 40 zeigt dieselben Resultate in einem zeitabhängigen Diagramm.

Aus den Resultaten der genannten Analysen für die kanalisierte Betriebsart ist ersichtlich, dass mit steigender Temperatur der Belag höheren Dehnungsamplituden ausgesetzt wird (vgl. hellfarbige Markierungen in Abb. 39 und Abb. 40). Betrachtet man hingegen die Entwicklung der Dehnungsamplituden im Fortschreiten der Stresszyklen fällt eine grosse Streuung der Resultate auf welche keine eindeutige Tendenz aufzeigt.

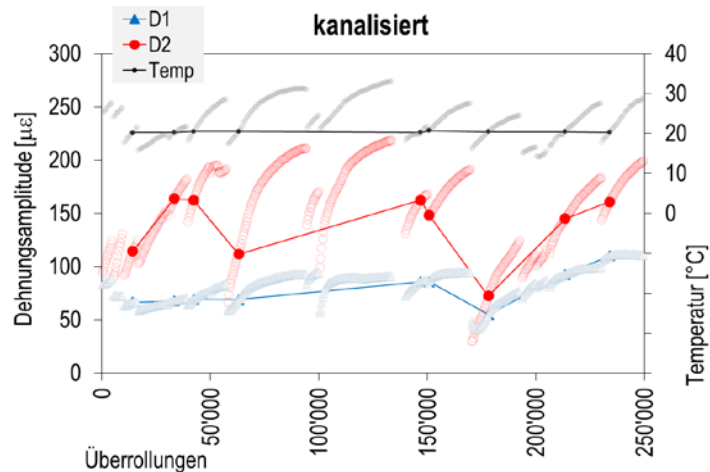


Abb. 39 Dehnungsamplituden und Temperaturen in Abhängigkeit der Überrollungen über die gesamte kanalisierten Belastungsphase. Die Dehnungsamplituden für eine Temperatur von 20°C sind überlagert.

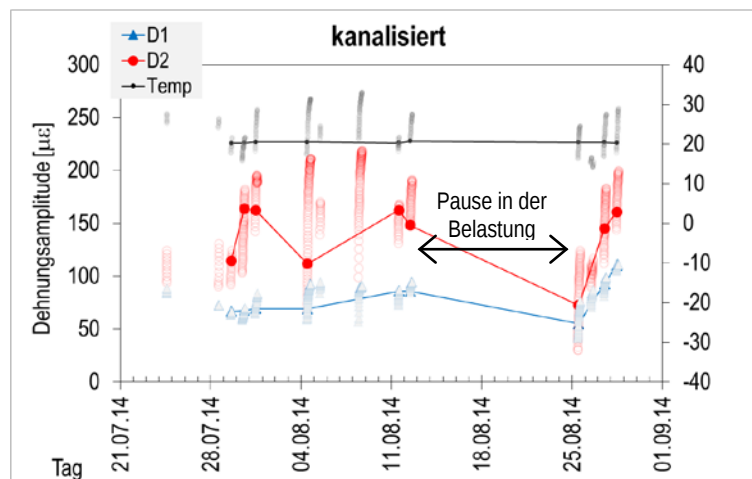


Abb. 40 Zeit abhängigen Dehnungsamplituden und Temperaturen über die gesamte kanalisierten Belastungsphase. Die Dehnungsamplituden für eine Temperatur von 20°C sind überlagert.

Da in der nicht kanalisierten Betriebsrat der Abstand zwischen der Radspur und der Sensoren ständig variiert (vgl. Abb. 41), gestaltet sich eine Dehnungsanalyse entsprechend komplizierter. Die erhaltenen Daten wurden in diesem anspruchsvollen Fall nach bestimmten transversalen Positionen der Spurrinne gruppiert und ausgewertet. Dabei wurden die Resultate der einzelnen kollinearen Spurrinnen zuerst einzeln ausgewertet um dann in einem Gesamtbild zusammengeführt zu werden. In Abb. 42 sind die entsprechenden Resultate für einen Zeitraum von fast 4000 Sekunden grafisch dargestellt. Hierbei dauert eine komplette transversale Wanderung (Komplettzyklus) des Randes von einer Seite zur andern und wieder zurück ca. 1560 Sekunden (ca. 26min)

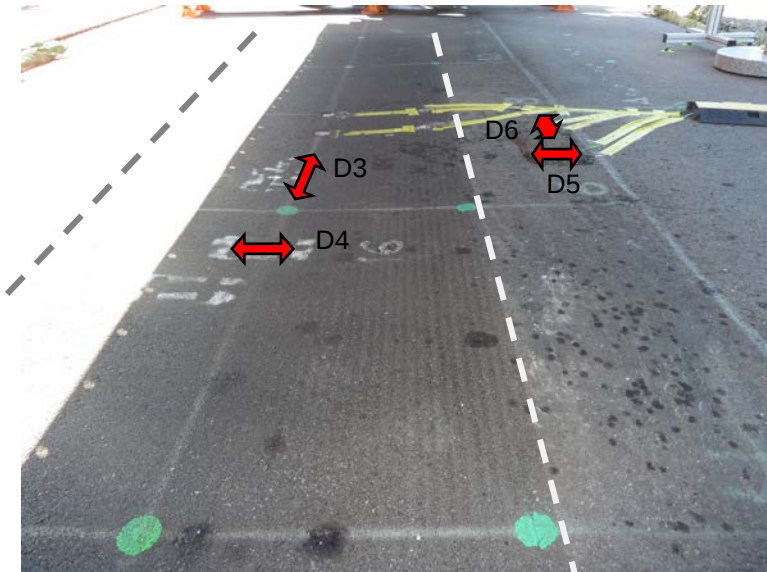


Abb. 41 Hervorhebung der DMS-Sensoren in der nicht kanalisierten Belastungstrecke

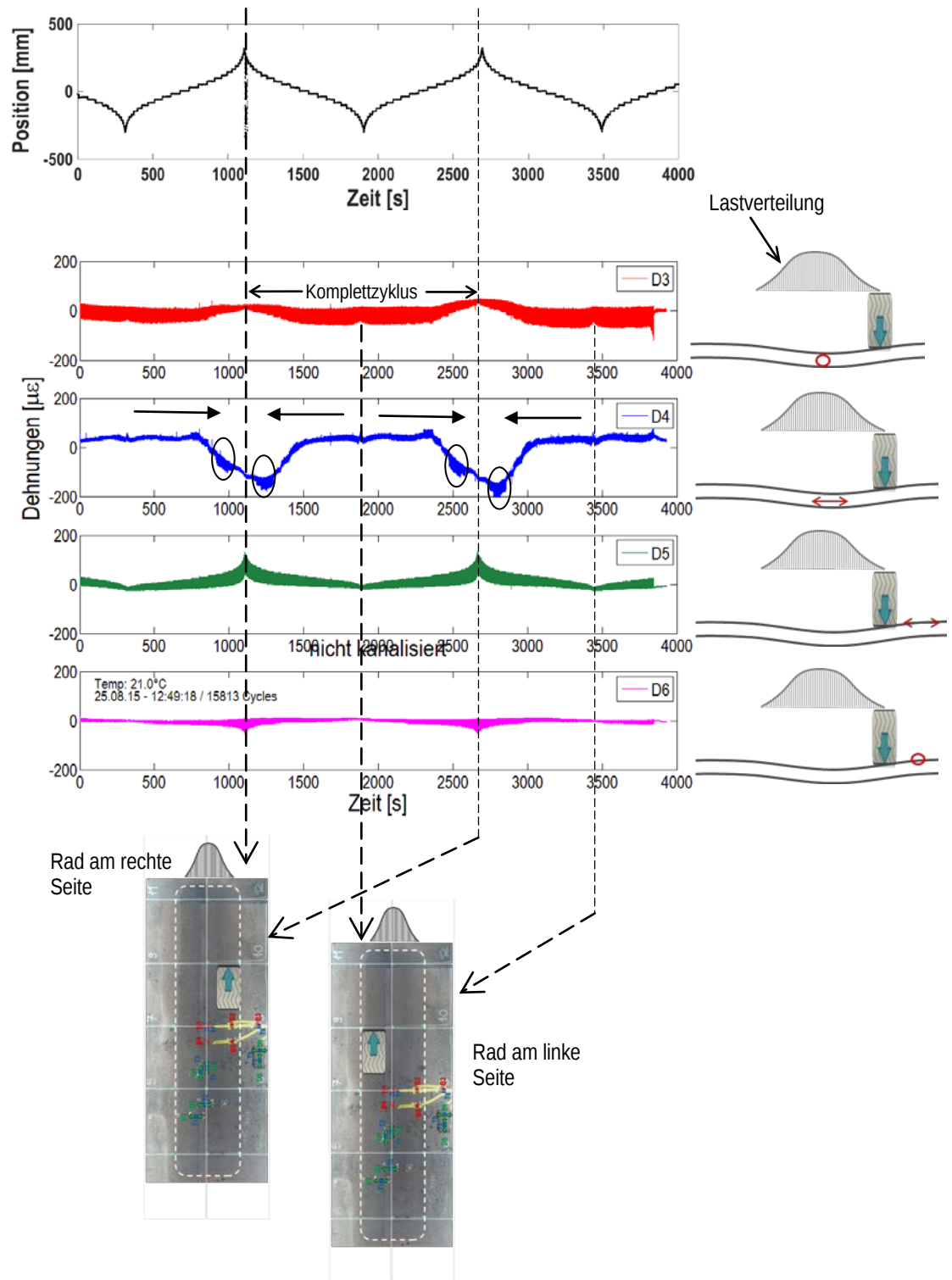


Abb. 42 Ansicht der gemessene Dehnungen in Abhängigkeit der Zeit bzw. der Position des Rades

Die Dehnungsamplituden der verschiedenen DMS-Sensoren im nicht kanalisierten Feld sind in Abb. 43 dargestellt. Dabei fällt die starke Abhängigkeit der Resultate von der transversalen Position des Rades auf.

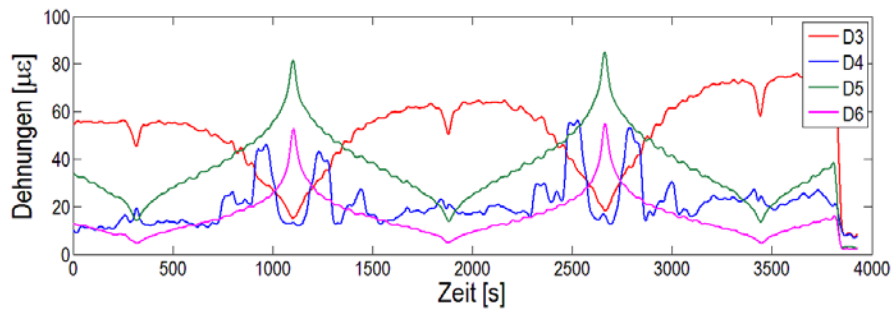


Abb. 43 Dehnungsamplituden in Abhängigkeit der Position des Rads

Eine detaillierte Ansicht der Dehnungen bei einzelnen Überrollungen ist in Abb. 44 gegeben.

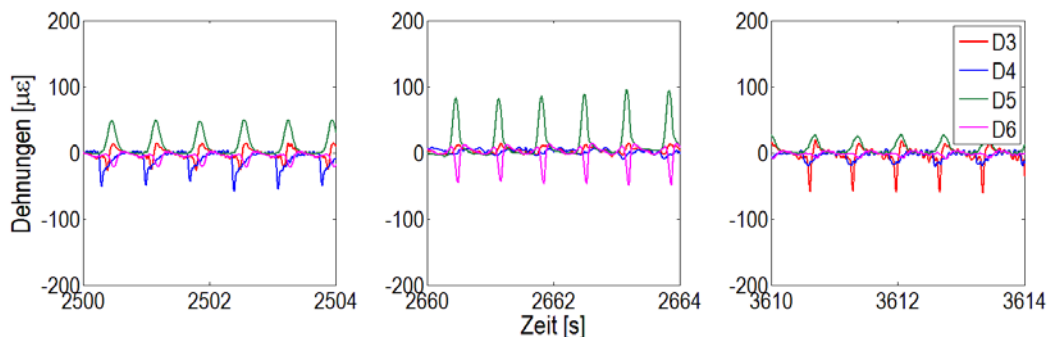


Abb. 44 Detail der gemessenen Dehnungen in Abhängigkeit der Position des Rads

Ausgehend von einer bestimmten Sensorposition zeichnen sich nachvollziehbare Belagsdeformationen aus. Folgend werden die in Abb. 44 festgehaltenen Signale kurz kommentiert.

- Der Sensor D3 liegt in der Mitte des nicht kanalisierten Testfeldes zwischen den Asphaltsschichten und misst Deformationen in Fahrtrichtung (rote Linie). Im entsprechenden Signal ist ein Druckmaximum gefolgt von einem kleinen Zugmaximum klar ersichtlich. Der Spitzenwert des Druckmaximums erfolgt, wenn sich das Rad senkrecht über dem Sensor befindet.
- DMS D4 befindet sich im selben Bereich wie D3 aber um 90 Grad gedreht und misst daher Dehnungen quer zur Fahrtrichtung (blaue Linie). Auch hier erfolgen die Druckmaxima bei Überrollen des Sensors. In Abb. 42 ist deutlich zu erkennen, dass wenn sich das Rad an der rechten Seite der Wanderung befindet, der Sensor eine Stauchung registriert, welche sich mit dem Wandern des Rades gegen die linke Seite des Testfeldes verringert. Dies lässt vermuten, dass der Sensor sich etwas näher bei der rechten Seite der Fahrbahn befinden muss. Diese Verschiebung von der Mittellinie (Nulllinie) kann beim Einbauprozess erfolgt sein.
- D5 ist quer zur Fahrtrichtung orientiert und befindet sich auf der Belagsoberfläche, rechts neben der Fahrspur. Die Messungen zeigen wie erwartet, Zugdehnungen die am grössten sind, wenn das Rad am Sensor vorbeirollt (grüne Linie).
- Neben D5 liegt parallel zur Fahrtrichtung orientiert DMS D6. Die Ergebnisse zeigen eine Abfolge von Zug-Druck-Zug Maxima. Hierbei sind die Druckmaxima vergleichsweise am bedeutsamsten (lila Linie).

Trotz relativ stabil bleibender Temperatur steigen die ermittelten Dehnungsamplituden der Sensoren D3 und D4 bei grösser werdenden Überrollungsanzahl an. Dieser Trend konnte bei den Sensoren D5 und D6 in den Analysen nicht eindeutig verzeichnet werden (vgl. Abb. 45). Weiter ist zu vermerken, dass weil die Sensoren D2 und D3 nach ca. 40'000 Überrollungen beschädigt wurde dessen Daten nicht in die Analysen eingeflossen sind.

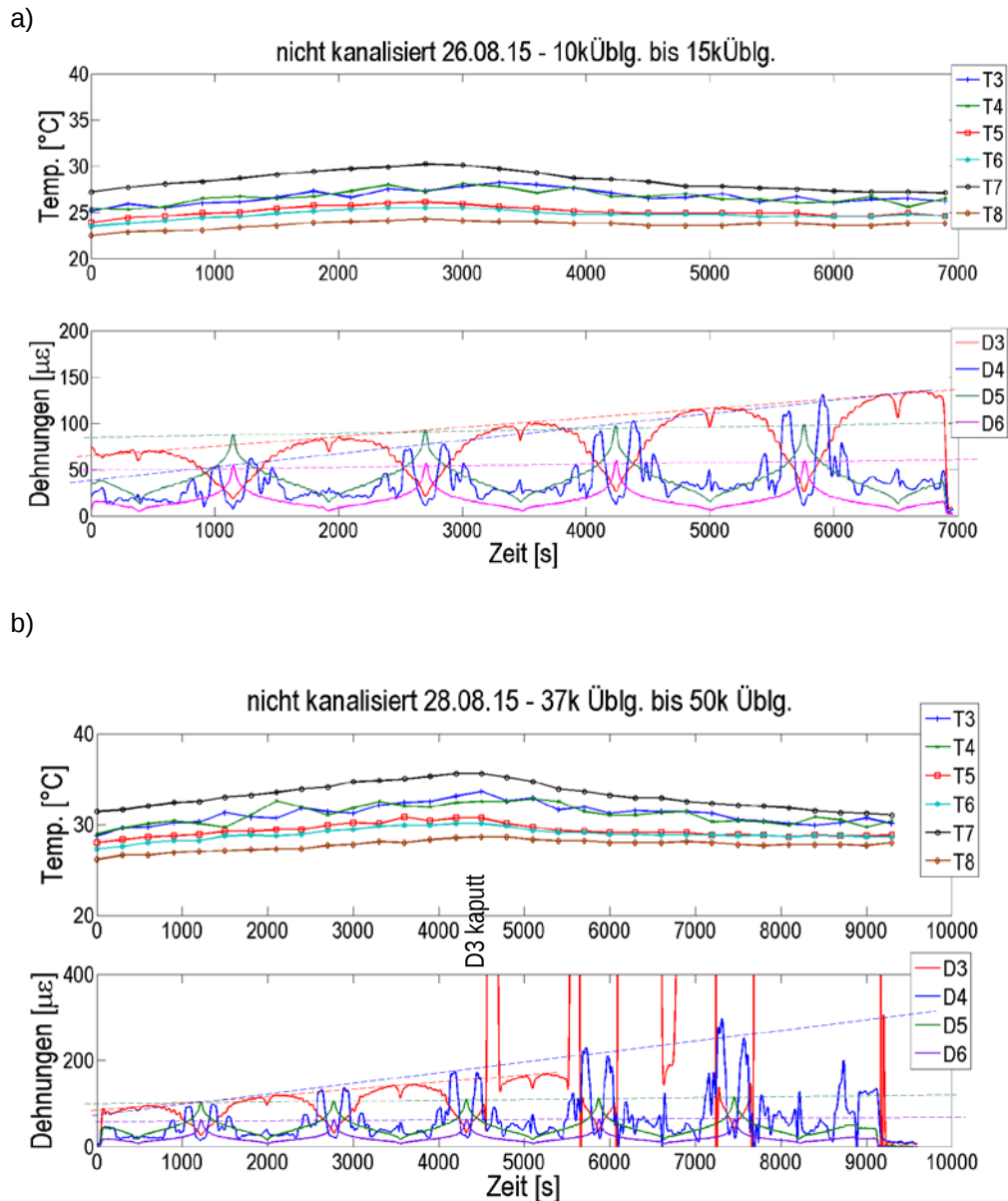


Abb. 45 Gemessene Dehnungsamplituden und Temperatur am (a) 26.08.15 und (b) 28.08.15

Abb. 46 zeigt die Spannungsamplituden gegenüber den akkumulierten Lastzyklen. Die Temperatur ist gemäss der rechten Diagrammachse ebenfalls festgehalten worden. Der qualitative Vergleich der Datensätze zeigt die starke Abhängigkeit zwischen Spannungs- und Temperaturverläufen. Wie im Fall der kanalisierten Belastung gibt es keinen klaren Trend, der zeigen könnte, dass der Belag aufgrund der Belastung beeinträchtigt wurde.

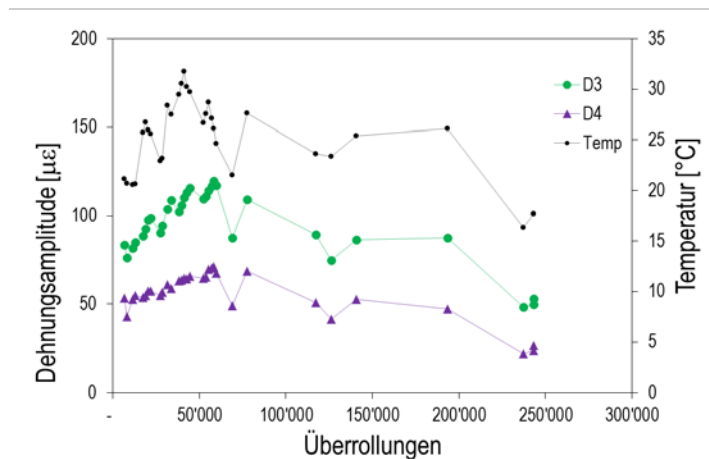


Abb. 46 Dehnungsamplituden in Funktion der kumulierten Überrollungen

6.5 Dynamische Beschleunigungsmessungen

Abb. 47 zeigt die gemessenen Beschleunigungsamplituden in Abhängigkeit zu den kumulierten Überrollungen. Die hellfarbigen Markierungen entsprechen der gemittelten Differenzen der Beschleunigungsamplituden aus jeweils ca.40 Überrollungen (vgl. Kapitel 5.3.3). In grauer Farbe sind für die entsprechende Intervalle die dazugehörige Temperatur gemittelt und entsprechend aufgetragen worden. Diese Datenanalyse erfolgte für die gesamte Betriebszeit der MLS10. Um ein temperaturunabhängigen Vergleich ermöglichen zu können, wurden die Resultate bei einer Temperatur von 20°C hervorgehoben. Abb. 48 zeigt dieselben Resultate in einem zeitabhängigen Diagramm.

Aus den Resultaten der genannten Analysen für die kanalisierte Betriebsart ist ersichtlich, dass mit steigender Temperatur der Belag höheren Beschleunigungsamplituden ausgesetzt wird (vgl. hellfarbige Markierungen in Abb. 47 und Abb. 48). Betrachtet man hingegen die Entwicklung der Beschleunigungsamplituden im Fortschreiten der Stresszyklen fällt keine eindeutige Tendenz auf.

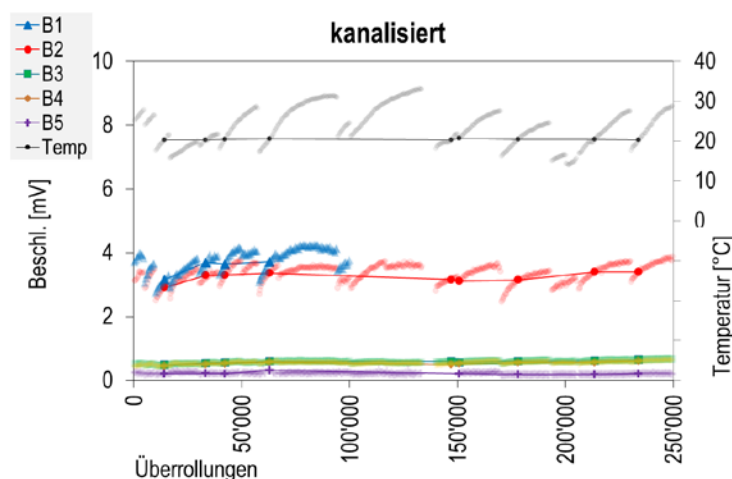


Abb. 47 Beschleunigung und Temperaturen in Abhängigkeit der Überrollungen über die gesamte kanalisierte Belastungsphase. Die Beschleunigungsamplituden für eine Temperatur von 20°C sind überlagert.

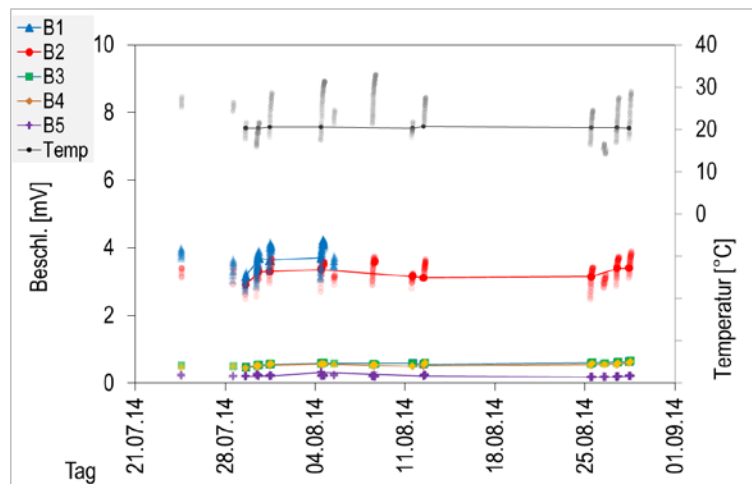


Abb. 48 Zeit abhängigen Beschleunigung und Temperaturen über die gesamte kanalisierte Belastungsphase. Die Beschleunigungsamplituden für eine Temperatur von 20°C sind überlagert.

Die Analyse der erhobenen Beschleunigungsmessungen im nicht kanalisiertem Betrieb erfolgt nach derselben Methodik wie für die Dehnungsmessungen. In Abb. 49 sind die entsprechenden Messungen für einen Zeitraum von mehr als 3000 Sekunden grafisch dargestellt. Hierbei dauert eine komplette transversale Wanderung (Komplettzyklus) des Randes von einer Seite zur Andern und wider Zurück ca. 1560 Sekunden (ca. 26min). Die Beschleunigungssensoren B1 und B5 fielen kurz nach dem Start der Messkampagne bzw. nach einer Betriebswoche aus.

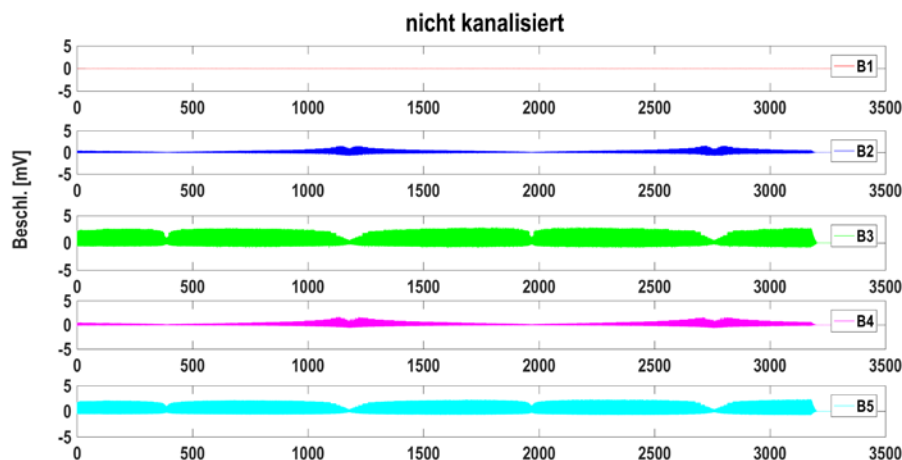
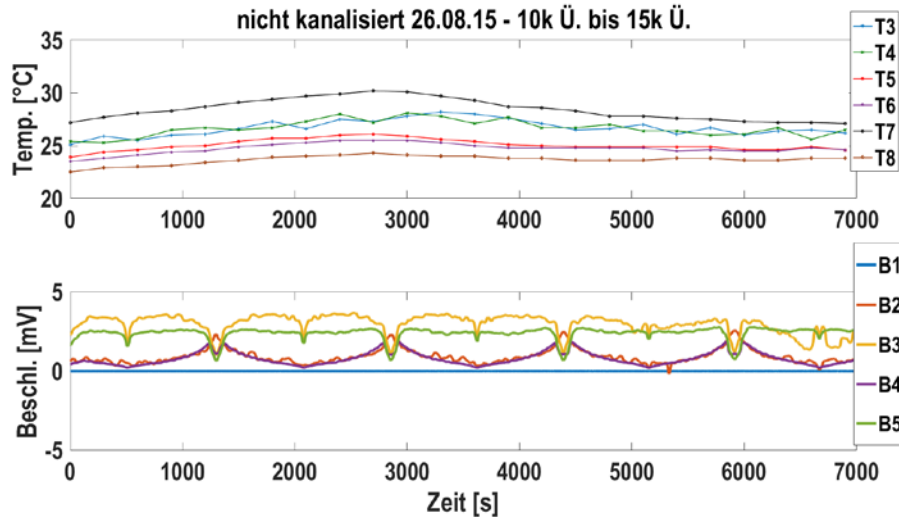


Abb. 49 Grafische Darstellung der gemessenen Beschleunigungen in Abhängigkeit der Zeit bzw. der Position des Rades im nicht kanalisiertem Betrieb.

In Abb. 50 sind die Beschleunigungsamplituden in Abhängigkeit der kumulierten Überrollungen auf der nicht kanalisierten Belastungsstrecke an zwei verschiedenen Tage dargestellt. Dabei fällt, wie bei die Dehnungen, die starke Abhängigkeit der Resultate von der transversalen Position des Rades auf.

a)



b)

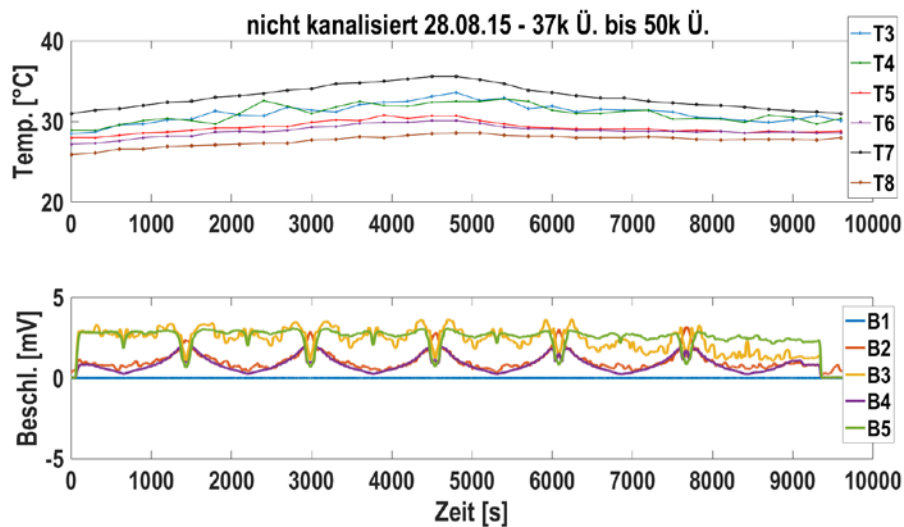


Abb. 50 Beschleunigungsamplituden und Temperaturverläufe in Abhängigkeit der kumulierten Überrollungen am 26.08.15 (a) und am 28.08.15 (b)

6.6 Falling Weight Deflectometer (FWD)

Die Messungen mit dem FWD wurden jeweils am Anfang (erster Messtermin bei 0 Überrollungen) und am Ende des Tests (zweiter Messtermin bei 250'000 Überrollungen im kanalisierten und im nicht kanalisierten Belastungsbereiche) durch die Firma Infralab SA aus Romanel (Lausanne) bzw. durch die Universität Parma durchgeführt. Die Messungen mit dem FWD erfolgten über ein dynamisches Messverfahren, bei dem ein Kraftimpuls auf die Fahrbahnoberfläche einwirkte. Wie es der Name vermuten lässt, wird dieser Impuls durch ein Gewicht erzeugt welches auf eine Grundplatte fällt die vorgängig auf dem Belag platziert wurde. Jeder Schlag soll die lokale Belastung einer MLS10-Radüberrollung simulieren. Hierbei wird die kurzzeitige Verformung der Straßenoberfläche im Lastzentrum und in diskreten Abständen dazu, aufgezeichnet. Wie bereits in Kapitel 5.4 erwähnt wurden bei diesem Projekt insgesamt 80 Lastapplikationen mit dem FWD gemessen und ausgewertet. Die Bewertung der Tragfähigkeit des Belages anhand der 80 FWD-Messungen erfolgte nach dem Prinzip der approximierten Deflektionsmulden. Hierbei entsprechen grössere Belagsdeflektionen tieferen Tragfähigkeiten und umgekehrt.

Die nachfolgende Graphik (vgl. Abb. 51) veranschaulicht die aufgezeichneten maximalen Deflektionen an den Messstellen beider Testfelder ohne Temperaturkorrektur. In der Grafik sind die genannten Werte vor und nach der Belastung mit der MLS10 farblich festgehalten. Rot gefärbte Bereiche entsprechen Regionen hoher und grün gefärbte Bereiche tiefer Deflektionen. In Abb. 52 sind die prozentualen Änderungen zwischen den genannten Belastungszuständen festgehalten worden. Vergleicht man die dadurch erhaltenen Farbmuster fällt auf, dass im kanalisierten Belastungsbereich die Deflektionen zunehmen während sich diese im nicht kanalisierten Bereich nur geringfügig ändern. Der ermittelte Unterschied lässt darauf schliessen, dass der kanalisierte Belastungsbereich eine vergleichsweise höhere Materialermüdung erlitten haben muss als der nicht kanalisierte Bereich. Die erhaltene Erkenntnis über das unterschiedliche Verhalten beider Betriebsarten veranschaulicht auf prägnanter Art und Weise die Notwendigkeit der hier vorliegenden Arbeit und kann als wegweisendes Indiz für künftige Projekte herangezogen werden.

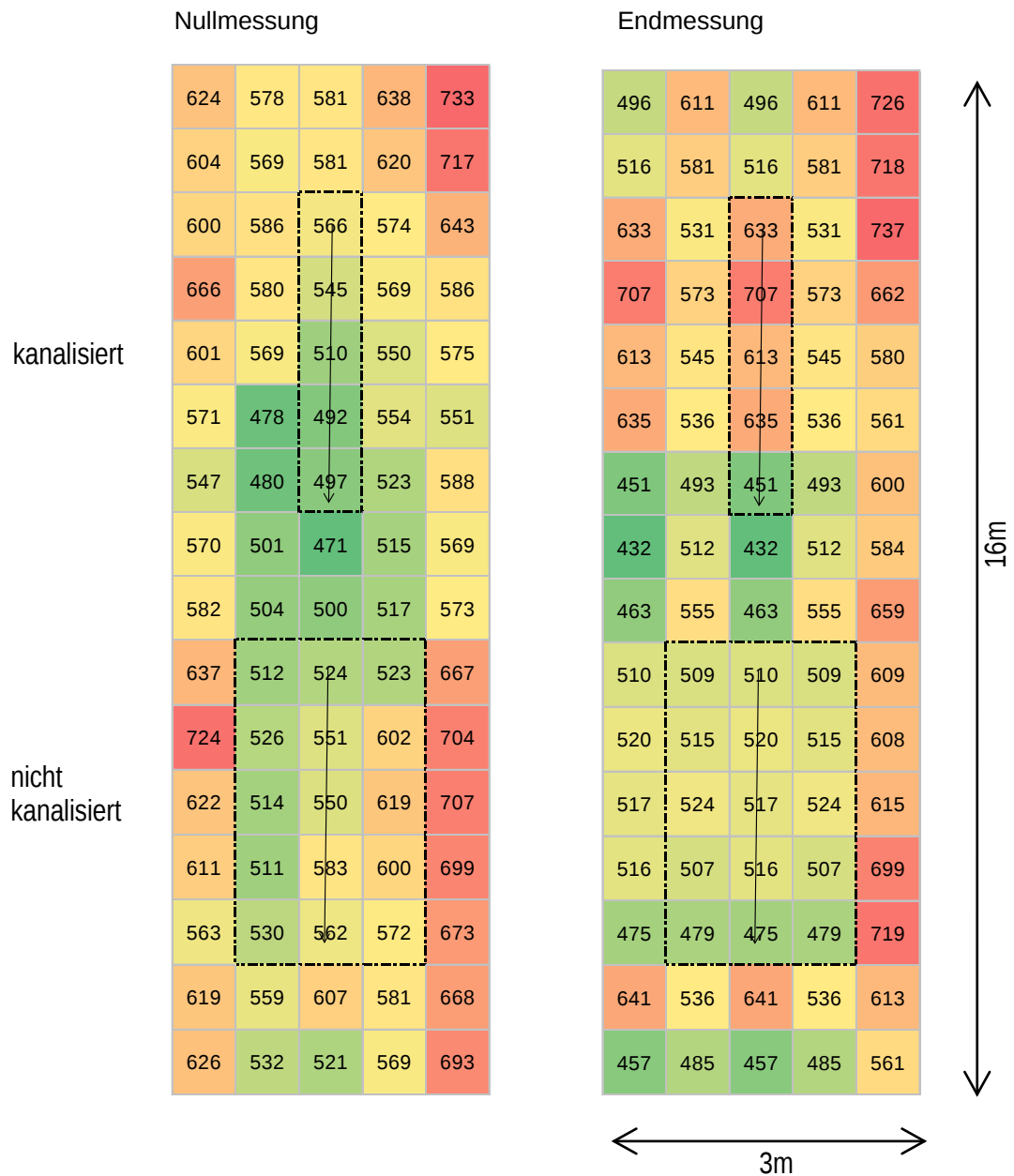


Abb. 51 Gemessene Deflektionen in Mikrometer[nm] vor und nach der Belastung. Rot markierte Felder veranschaulichen hoher Deflektionen, Grün markierte Felder niedriger Deflektionen.

kanalisiert	-21%	6%	-15%	-4%	-1%
	-15%	2%	-11%	-6%	0%
	6%	-9%	12%	-8%	15%
	6%	-1%	30%	1%	13%
	2%	-4%	20%	-1%	1%
	11%	12%	29%	-3%	2%
	-18%	3%	-9%	-6%	2%
	-24%	2%	-8%	0%	3%
nicht kanalisiert	-21%	10%	-7%	7%	15%
	-20%	-1%	-3%	-3%	-9%
	-28%	-2%	-6%	-15%	-14%
	-17%	2%	-6%	-15%	-13%
	-16%	-1%	-12%	-16%	0%
	-16%	-10%	-15%	-16%	7%
	4%	-4%	6%	-8%	-8%
	-27%	-9%	-12%	-15%	-19%

Abb. 52 Prozentuale Differenz zwischen der Deflektionen der ersten und letzten Messung. Rot markierte Felder veranschaulichen Deflektionszunahme, Blau markierte Felder Deflektionsabnahme.

Die gemessenen Deflektionen nach der kanalisierten Belastung sind um bis zu 30% höher als davor. Dies lässt auf eine Schädigung (Rissbildung) der Asphaltsschichten in diesem Bereich schliessen. In der nicht kanalisierten Belastungsstrecke ist dieses Phänomen aus den erhobenen Daten nicht eindeutig erkennbar.

7 Untersuchungen an Bohrkernen

Anschliessend an die MLS10-Betriebspause und die genannten Messungen wurden Bohrkern mit 100mm und 150mm Durchmesser aus beiden Belastungsbereichen herausgebohrt. Diese wurden für die in den folgenden Kapiteln (vgl. Kapitel 7.1 und 7.2) erläuterten Materialuntersuchungen verwendet. Die Entnahme- bzw. Bohrpläne für beide Testfelder sind in Abb. 53 und Abb. 54 dargestellt.



Abb. 53 Entnahmeplan Kanalisierte Belastung

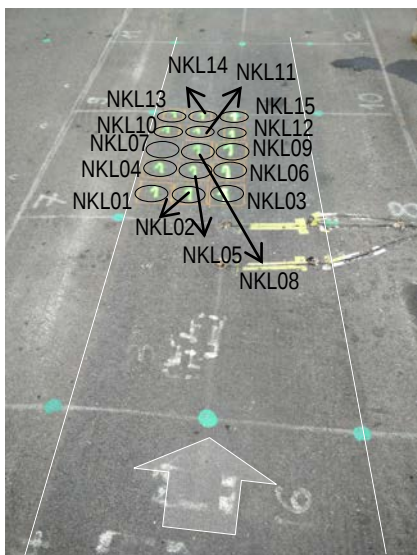


Abb. 54 Entnahmeplan nicht Kanalisierte Belastung

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 [20]
- Korngrößenverteilung SN 670 402, EN 12697-2 [21]
- Rohdichte Mischgut SN 670 405, EN 12697-5 [22]
- Bestimmen der Raumdichte, Berechnen des Hohlraumgehalts SN 670 406, EN 12697-6 [23]

Die Ergebnisse der Bindemittelanteil, Korngrössverteilung sind in Tab. 4, **Abb. 55** und **Abb. 56** dargestellt und zeigen, dass das Material gemäss Norm hergestellt wurde.

Tab. 4 Ergebnisse der Bohrkernuntersuchung

AC 8 N	Bindemittelanteil [%]	5.6
	Rohdichte [kg/m ³]	2.460
AC T 11 N	Bindemittelanteil [%]	5.5
	Rohdichte [kg/m ³]	2.480

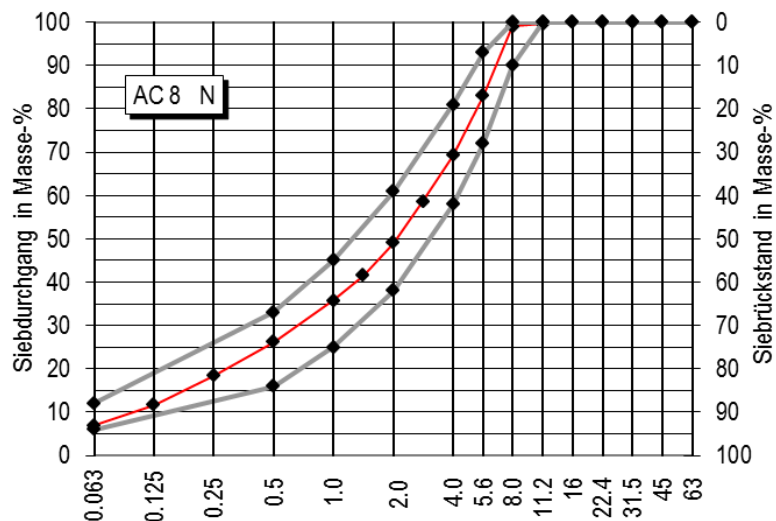


Abb. 55 Korngrößenverteilung Deckschicht AC 8 N im unbefahrenen und befahrenen Bereich

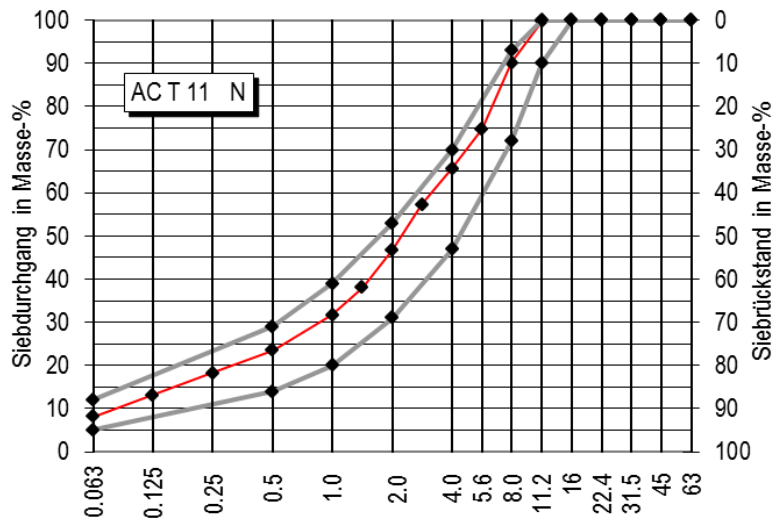
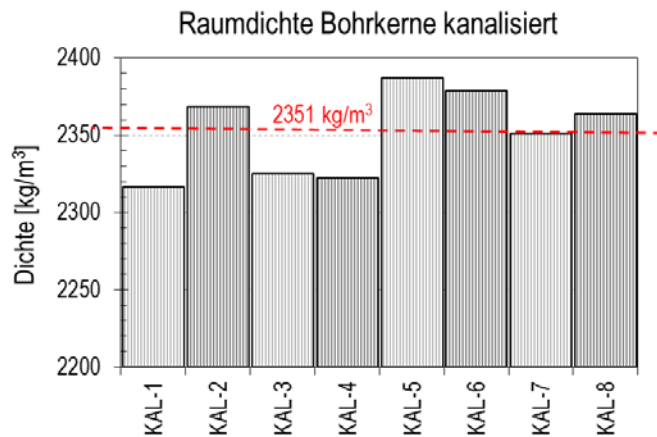


Abb. 56 Korngrößenverteilung Tragschicht AC T 11 N im unbefahrenen und befahrenen Bereich

In Abb. 57 sind die gemessenen Raumdichten der verschiedenen Borkernen aus beiden Belastungsstrecken dargestellt. Wie erwartet sind die gemittelten Werte der Bohrkerne aus der kanalisierten Belastungsstrecke höher ausgefallen als jene der nicht kanalisierten. Grund für diesen Unterschied ist die höhere lokale Nachverdichtung welche im kanalisierten Feld durch die kollineare Überrollungsverteilung stattgefunden hat. Vergleicht man die Bohrkerne NKL-3, NKL-6 und NKL-9 welche aus der Mitte der nicht kanalisierten Belastungsstrecke entnommen wurden mit NKL-1, NKL-4 und NKL-7. aus den Randgebieten desselben Feldes ist eine höhere Verdichtung in der mittleren Region dieser Teststrecke ersichtlich.

a)



b)

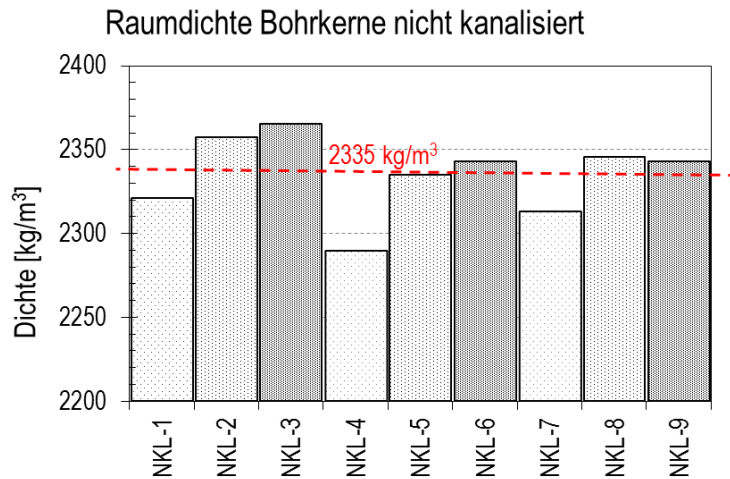
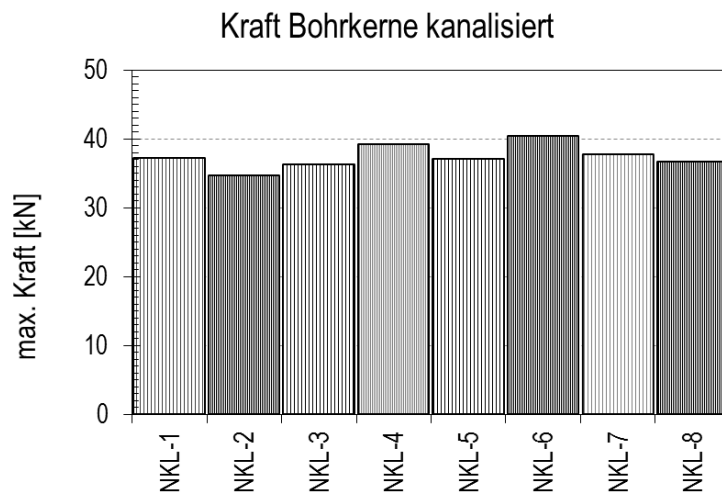


Abb. 57 Grafische Darstellung der gemessenen Raumdichte aus Bohrkernen welche von der kanalisiert (a) und nicht kanalisierte (b) Belastungstrecke stammen.

7.2 Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner

Für die Prüfung des Schichtenverbunds nach Leutner wurden jeweils 8 und 9 Bohrkernen mit Durchmesser 150mm aus den kanalisierten bzw. nicht kanalisierten Bereichen entnommen. Von diesen Prüfungen wurde jeweils der Schichtenverbund zwischen Deck- und Tragschicht untersucht. Die dabei erhaltenen einzelnen Ergebnisse sind in Abb. 58 und Anhang 0 grafisch dargestellt, deren arithmetische Mittelungen sind in Abb. 59 gezeigt.

a)



b)

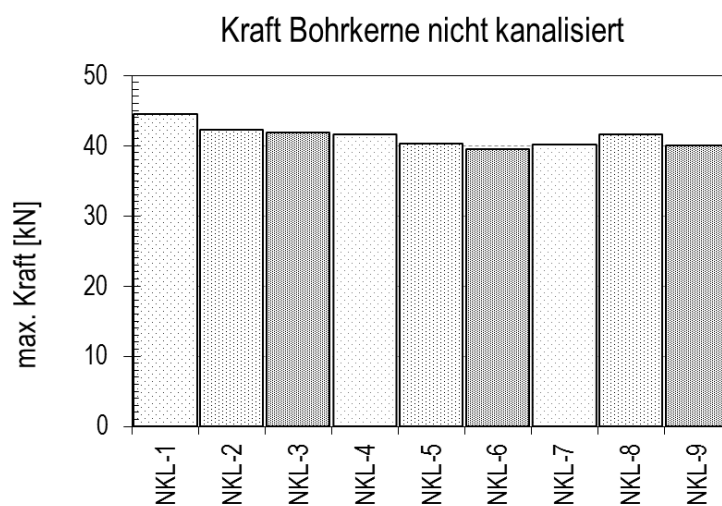


Abb. 58 Grafische Darstellung der gemessenen Schichthaftung aus Bohrkernen welche von der kanalisiert (a) und nicht kanalisierte (b) Belastungstrecke stammen.

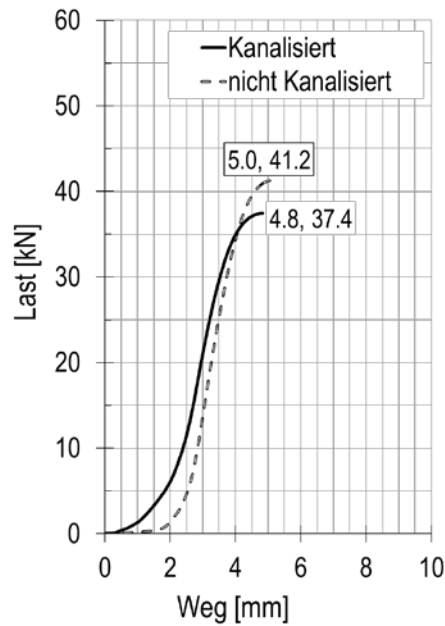


Abb. 59 Ergebnisse der Schichthaftung zwischen Deckschicht AC 8 N und Tragschicht ACT11N, Mittelwert aus je 8 und 9 Prüfkörpern (erster Wert: Weg [mm], 2. Wert: Kraft [kN])

Vergleicht man die Resultate aus den Bohrkernen beider Prüffelder, zeigt sich unter der Annahme vergleichbaren Anfangsbedingungen eine schwächere Schichthaftung in der kanalisierten Belastungsstrecke. Grund dafür sind höhere lokale Scherkräfte welche aus dieser Belastungsart resultieren und folglich die Schichthaftung mehr abschwächen.

8 Schlussfolgerungen

Diese Studie befasst sich mit den Auswirkungen des verkehrsbedingten seitlichen Spurdriftens auf die Dauerhaftigkeit, Versagensgrenze und Schädigungsmechanismen eines Belags. Zwecks einer Charakterisierung dieser Kriterien liegt der Fokus dieser Arbeit im Vergleich mit den Auswirkungen einer kanalisierten Belastung.

Rollt ein Rad wiederholt, immer über die gleiche Stelle entstehen an den seitlichen Rändern dieser kanalisiert Fahrspur intensive Schubbeanspruchungen welche Oberflächenrisse und eine Durchstanztendenz hervorrufen. Im tatsächlichen Verkehrsvorkommen ist dieser Effekt durch das seitliche Driften der aufeinanderfolgenden Fahrzeuge und der damit einhergehende Lastverteilung abgeschwächt. Dieser Beobachtung zur Folge sollte also eine kanalisierte Belastung die Versagensgrenze eines Belages früher hervorrufen als die tatsächlich vorkommende nicht kanalisierte Verkehrsbeanspruchung. Im Rahmen der Validierung dieser Hypothese sollen neben der genannten Rissbildung ermittelt werden, ob weitere Störungsmechanismen wie z.B. Kornverluste an der Fahrbahnoberfläche hervortreten.

Zu diesem Zweck wurde der Verkehrssimulator MLS10 eingesetzt. Unter kontrollierten Bedingungen wurde mit dieser Maschine derselbe Belag mit derselben Anzahl Lastzyklen kanalisiert und an einer anderen Stelle im seitlichen Driftmodus nicht kanalisiert belastet.

Der verwendete Belag wurde absichtlich mit einer dem hiesigen Strassenwesen nicht gänzlich konform geringeren Tragfähigkeit gewählt. Im Hinblick auf den benötigten Ressourcen dieser Messkampagne wurde diese Wahl mit dem Fokus einer Reduktion der erforderlichen Belastungsdauer getroffen. Aufgrund der Erfahrung bei einer analogen Versuchsanordnung [1] wurden für das Erreichen der Versagensgrenze des hier verwendeten Belages, 250'000 Zyklen als hinreichend angenommen.

Mit den zur Verfügung stehenden Mittel war es nicht möglich die Temperatur des Belages oder die darauf fallende Regenmenge kontrolliert zu beeinflussen. Um die kanalisierte und nicht kanalisierte Belastungsanordnung unter ähnlichen klimatischen Bedingungen durchführen zu können, wurde die Messkampagne in zwei aufeinanderfolgende Jahren im Spätsommer/Früherbst aufgeteilt. Obwohl etwas aufwendig erzielte diese Strategie zufriedenstellende Resultate. Messungen haben während beider Belastungsperioden durchschnittliche Temperaturen von 23.7°C bzw. 23.0°C sowie ähnliche Extremwerte ergeben was die Vergleichbarkeit der Resultate gewährleistet.

Hinsichtlich der Spurrinnenbildung streuen die drei Messungen der kanalisierten Belastungsstrecke deutlich mehr als bei der nicht kanalisierten Strecke. Es wird vermutet, dass die Ursache dieses Phänomens an lokalen Inhomogenitäten der Fundamentsverdichtung gebunden ist. Je kleiner die betrachtete Fläche desto mehr kommt diese Diskontinuität zum Tragen. Dieser Einfluss ist bei der kanalisierten entsprechend grösser als bei der nicht kanalisierten Spurrinne. Vergleicht man die Messungen in der Mitte beider Spurrinnen weisen die Ergebnisse mit 16 respektive 15mm ähnliche Werte auf. Gemäss den erhaltenen Resultaten kann gefolgert werden, dass bei einem Aufbau wie der gewählten T2-S2-Struktur bzgl. maximaler Spurrinnentiefe beim MLS 10 eine kanalisierte Belastung gleichwertige Resultate bringt wie eine nicht kanalisierte Belastung. Dasselbe gilt jedoch nicht für die gebildete Spurrinnenform welche nur durch seitliches Driften der Belastungsräder nachgebildet werden kann (vgl. Abb. 35).

Die Rissbildung ist bei der kanalisierten Belastung deutlich ausgeprägter als bei der nicht kanalisierten. Während im erst genannten Belastungsfall erste Randrisse bereits nach 150'000 Überrollungen erscheinen, sind in der nicht kanalisierten Fahrspur bis zum Ende der Prüfung weder Ermüdungs- noch Längsseitenrisse zu erkennen. Diese Beobachtung bekräftigt die Behauptung, dass die kanalisierte Belastung eine höhere Strukturschädigung aufweist, welche die Dauerhaftigkeit der Prüflinge verkürzt. An dieser

Stelle muss erwähnt werden, dass abgesehen von den genannten Randrissen in der kanalisierten Fahrspur bei beiden Feldern keine Ermüdungsrisse gefunden wurden

Beachtet man die Sensordaten aus Dehn -und Deflektionsmessungen im Fortschreiten der Überrollungen, fällt eine grosse Streuung der Resultate auf welche keine eindeutige Tendenz einer strukturellen Änderung der Beläge erkennen lässt. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in der Komplexität des Versuchsaufbaus und in den lokal beschränkten Messstellen. Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse der FWD-Messungen, welche eine Schädigung der kanalisierten Fahrspur veranschaulichen.

Als Letztes sollen noch die Erkenntnisse der Leutner-Tests erwähnt werden, welche die Schichthaftung zwischen Trag-und Deckschicht aus Belagsproben beider Prüfstrecken kennzeichnen. Die Ergebnisse dieser Überprüfung zeigen eine niedrigere Schichthaftung in der kanalisierten Fahrspur, welche auf eine stärker lokalisierte Verformung zurückzuführen ist. Weiter haben Dichtemessungen an Bohrkerne gezeigt, dass in der kanalisierten Fahrspur eine höhere erhöhte Verdichtung als in der nicht kanalisierten Anordnung stattgefunden hat. In beiden Fällen wurden gleiche Anfangsbedingungen angenommen.

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass im vorliegenden Fall, hinsichtlich der Spurrinnentiefe die kanalisierte Belastungsanordnung die nicht kanalisierte Belastungsanordnung genügend gut annähert. Um jedoch den Einfluss einer allfälligen Inhomogenität in der Fundation zu minimieren soll der Belag an mehreren Stellen untersucht werden. Hinsichtlich oberflächlichen Längsrisse, Nachverdichtung und Spurrinnenform nähert die nicht kanalisierte Belastungsanordnung die Auswirkungen des realen Verkehrsaufkommens besser an als die kanalisierte Anordnung. Bei der Analyse der Strukturermüdung wurde kein Unterschied zwischen beiden Prüffelder gefunden. Alle vorliegenden Resultate sind mit anders Strukturierte Normbeläge zu verifizieren.

Anhänge

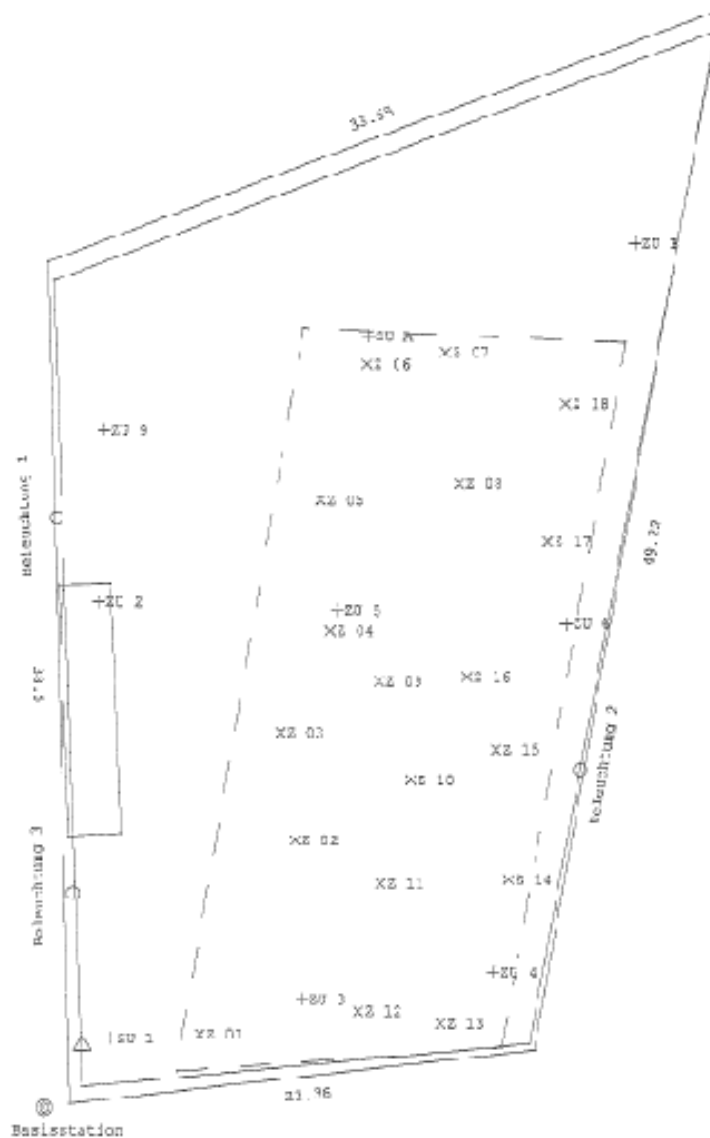
I	Untersuchungen auf Planum und Planie	71
I.1	Plattendruckversuche auf dem Planum	71
I.2	Plattendruckversuche auf der Planie	72
II	Fotos visuelle Inspektion	75
III	Ergebnisse Schichthaftung nach Leutner	77

I Untersuchungen auf Planum und Planie

I.1 Plattendruckversuche auf dem Planum

Messpunkte im Untergrund nach Aushub

07.- 09.08.2012



Messergebnisse : Punkte sind mit ZU bezeichnet.

ZU1 =

ZU2 = 9.09 / 36.76 MN/m²

ZU3 = 13 MN/m²

ZU4 = 15.5 MN/m²

ZU5 = 11.83 / 29.15 MN/m²

ZU6 = 36 MN/m²

ZU9 = 51.96 MN/m²

ZUA = 27.21 MN/m²

ZUB = 22.87 MN/m²

Abb. 1 Untersuchungsergebnisse – Position und Ergebnisse LFG-Messungen

I.2 Plattendruckversuche auf der Planie



Prüfbericht:

Plattendruckversuch M_E und E_v gemäss SN 670 317b / SOP 3080

Messung mit TFB-LKW als Gegengewicht

Projekt-Nr.: 126213-01
Objekt: Rastplatz A1 (41012021)
Messort/Bauteil: Lenzburg
Messdatum: 24.08.2012
Temperatur: 21 °C
Witterung: starke Bewölkung
Bodenart: Kiessand / UG
gemessene Schicht: Fundationsschicht, Fahrbahn

Messbeginn vor Ort: 14:07
Messende vor Ort: 15:10
Wassergehalt Boden: erdfeucht
Korngrösse max.: 63 mm
Prüfung durchgeführt: ck

Messung 1-6	Erstbelastung						Entlastung			Zweitbelastung				
	1	2	3	4	5	6	E1	E2	E3	1	2	3	4	5
Spannung [MN/m ²]	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45		0.25	0.10	0.01	0.05	0.15	0.25	0.35	
Setzung [mm]	0.08	0.38	0.59	0.78	0.94		0.91	0.75	0.50	0.55	0.67	0.79	0.89	
Spannung [MN/m ²]	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45		0.25	0.10	0.01	0.05	0.15	0.25	0.35	
Setzung [mm]	0.15	0.38	0.57	0.74	0.85		0.84	0.69	0.44	0.50	0.64	0.74	0.81	
Spannung [MN/m ²]	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45		0.25	0.10	0.01	0.05	0.15	0.25	0.35	
Setzung [mm]	0.08	0.38	0.61	0.82	0.97		0.96	0.80	0.47	0.55	0.72	0.85	0.94	
Spannung [MN/m ²]	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45		0.25	0.10	0.01	0.05	0.15	0.25	0.35	
Setzung [mm]	0.13	0.36	0.54	0.63	0.77		0.76	0.63	0.35	0.42	0.55	0.65	0.70	
Spannung [MN/m ²]														
Setzung [mm]														
Spannung [MN/m ²]														
Setzung [mm]														

Verlangter M_{E1} -Wert:		nach SN 670'317b		100 MN/m ²		auf Fundationsschicht	
		nach SN 670'317a		(100'000) kN/m ²		im Bereich 0.15 - 0.25 MN/m ²	
Messung	Profil	E_{v1}	E_{v2}	M_{E1}		M_{E2}	M_{E2}/M_{E1}
Nr.		[MN/m ²]	[MN/m ²]	[MN/m ²]	[kN/m ²]	[MN/m ²]	[kN/m ²]
1	Nr. 1	100.6	198.6	127.8	ok (139'500)	260.9	(263'200) 2.04 ok
2	Nr. 2	121.0	235.1	153.6	ok (162'200)	289.0	(291'300) 1.88 ok
3	Nr. 3	96.0	184.3	121.9	ok (133'300)	226.2	(227'300) 1.86 ok
4	Nr. 4	136.3	258.4	171.3	ok (170'500)	309.4	(312'500) 1.81 ok

Beurteilung der Messwerte:

- M_{E1} : ok = verlangter M_{E1} -Wert erreicht; ! = verlangter M_{E1} -Wert nicht erreicht
- $M_{E2}/M_{E1} = f_E$: ok = f_E -Wert erreicht; ! = f_E -Wert nicht erreicht (SN 640 585b, Tab. 1, Strassenbau)
Wenn M_{E1} -Werte deutlich (ca. >40%) über dem Sollwert liegen, ist die Verhältniszahl ($f_E = M_{E2}/M_{E1}$) u. E. nicht mehr relevant.

Bemerkungen:

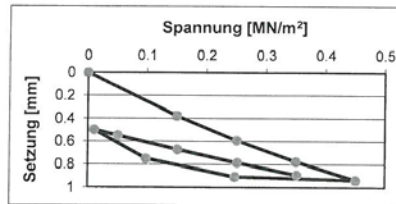
Abb. 2 Plattenversuch M_E – Messungen (Blatt 1)



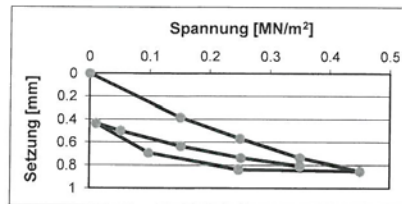
Technik und Forschung im Betonbau

Projekt-Nr.: 126213-01
 Objekt: Rastplatz A1 (41012021)
 Messort: Lenzburg
 Messdatum: 24.08.2012

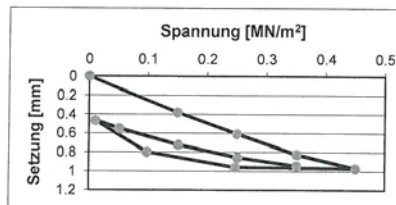
Messung Nr. 1:



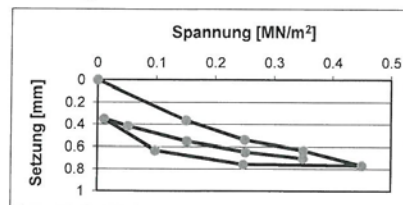
Messung Nr. 2:



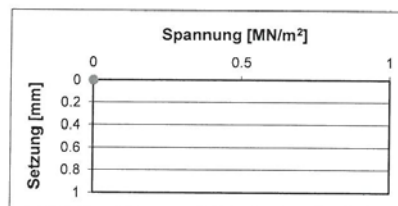
Messung Nr. 3:



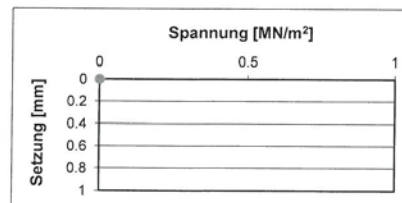
Messung Nr. 4:



Messung Nr. 5:



Messung Nr. 6:



Wildeg, 24. August 2012

ME-Messungen: Sabrina Gumann i.V. J. Seutg

Bei Messungen mit dem TFB-LKW als Gegengewicht erfolgt die Setzungsmessung elektronisch. Bei Handmessungen (Gegengewicht bauseitig) ist die Setzungsmessung mechanisch. Für die Plattenunterlage wird trockener Sand verwendet. Die Prüfergebnisse haben nur Gültigkeit für die untersuchten Stellen am Bauobjekt. Die Laststufen sind der jeweiligen Verwendung der untersuchten Schicht (Fundation, Tragschicht, Planum bzw. Unterbau) angepasst und können auf speziellen Wunsch bei der TFB nachgefragt werden. Dieser Bericht darf nicht auszugsweise kopiert werden. Das Auftragsdossier wird während 13 Jahren archiviert. Der Auftraggeber kann die Dienstleistungen innerhalb von 30 Tagen beanstanden. Bitte beachten Sie die "Allgemeinen Geschäftsbedingungen". Weitere Informationen: www.tfb.ch.



3080aPBd.xls-BPM-09

126213-01 / 24.08.2012

Seite 2 von 2

TFB AG - Lindenstrasse 10 - CH-5103 Wildegg - Tel 062 887 72 72 - Fax 062 887 72 70 - www.tfb.ch

Abb. 3 Plattenversuch M_E – Messungen (Blatt 2)

II Fotos visuelle Inspektion

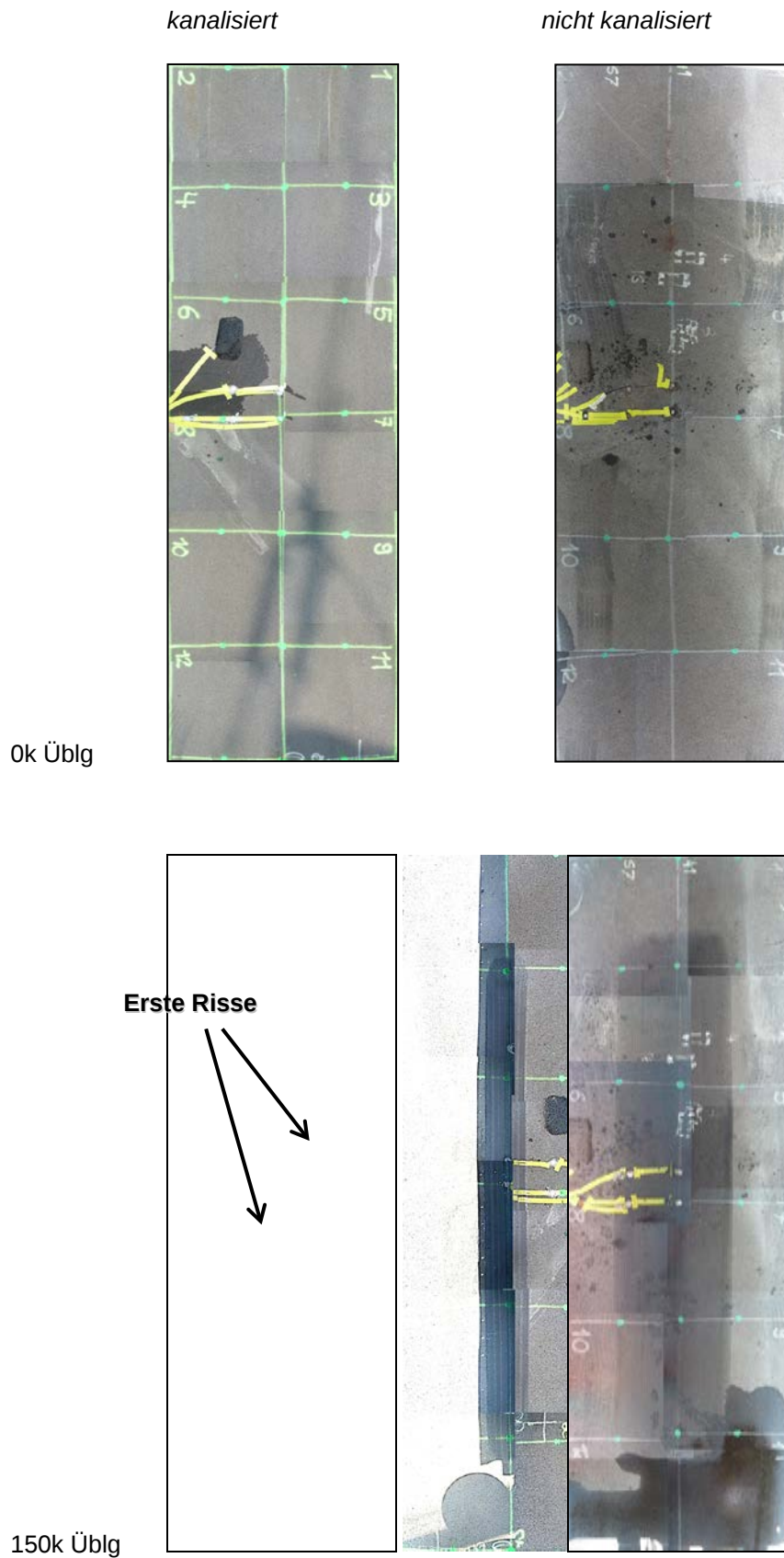
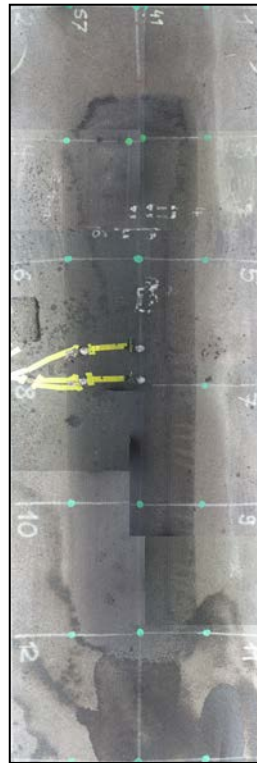
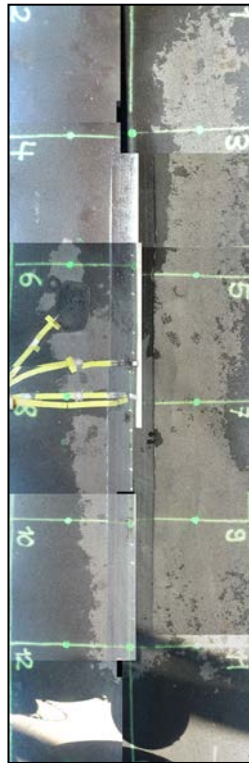


Abb. 4 Ansicht die Belagsoberfläche nach verschiedene Anzahl Überrollungen

200k Üblg



250k Üblg

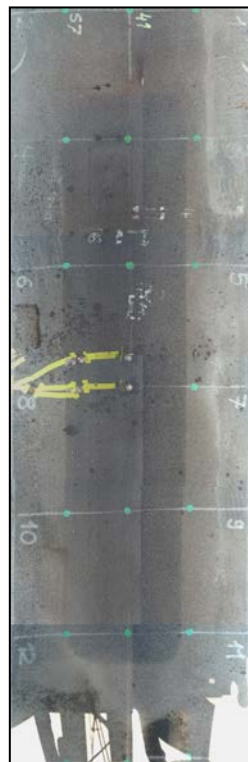
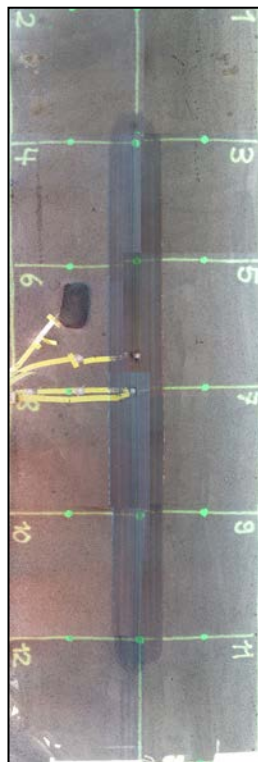
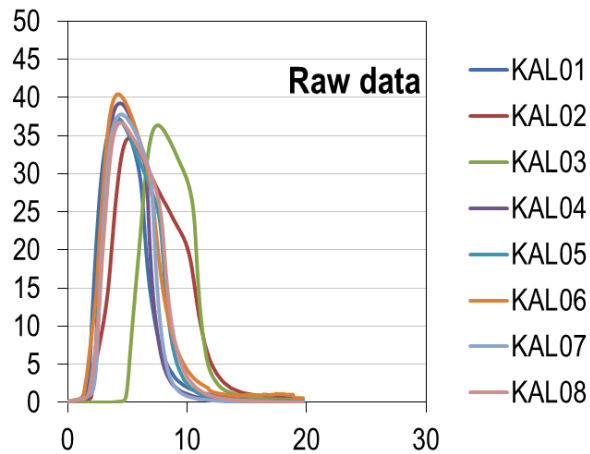


Abb. 4 Ansicht die Belagsoberfläche nach verschiedene Anzahl Überrollungen

III Ergebnisse Schichthaftung nach Leutner

a)



b)

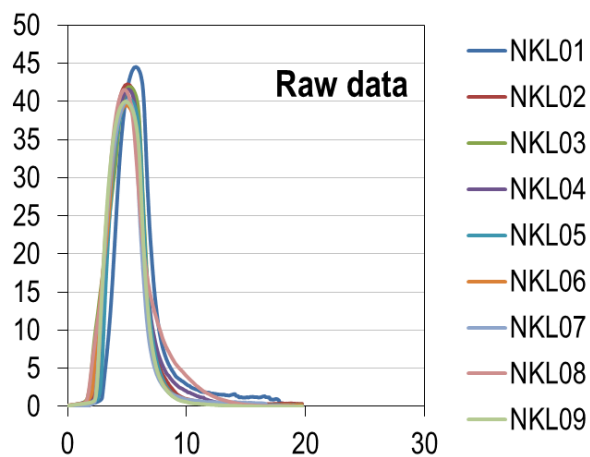


Abb. 5 Ergebnisse der Schichthaftung Tests nach Leutner, für die Bohrkerne aus der kanalisierte (a) und nicht kanalisierte (b) Fahrbahn

Glossar

Begriff	Bedeutung
APT	Accelerated Pavement Testing
ASTRA OFROU	Bundesamt für Strassen <i>Office fédéral des routes</i>
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
SN	Schweizer Norm
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FWD	Falling Weight Deflectometer
IGT	Institute for Geotechnical Engineering
LFG	Leichtes Fallgewichtsgesetz
LIM	Lineare Induktions Motoren
LWD	Light Weight Deflectometer
MLS10	Mobile Load Simulator
PSPA	Portable Seismic Pavement Analyzer
M_E	Verformungsmodul des Bodens
M_{E1}	Verformungsmodul des Bodens bei Erstbelastung
M_{E2}	Verformungsmodul des Bodens bei Zweitbelastung
E_{v1}	statischer Verformungsmodul des Bodens bei Erstbelastung
E_{v2}	statischer Verformungsmodul des Bodens bei Zweitbelastung
E_{vd}	elastischer Verformungsmodul des Bodens

Literaturverzeichnis

- [1] M. Arraigada, A. Treuholtz 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 1462
- [2] M. Arraigada, A. Treuholtz und M.N. Partl (2015), **“Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10“**, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. ASTRA 2011/013, Bericht 1545
- [3] M. Arraigada, Treuholtz, A und M.N. Partl (2016) **“Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T4-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10“**, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. ASTRA 2011/014 Report 1558
- [4] F. Hugo, M. Arraigada, L. Shu-Ming, T. Zefeng und Y.R. Kim (2012), **“International Case Studies in Support of Successful Applications of Accelerated Pavement Testing”**, Proceedings of the 4th international conference on accelerated pavement testing, Davis, CA, USA, Sep 19-21 2012, ISBN 978-0-415-62138-0, pp. 93-104
- [5] R. Blab und J. Litzka (1995), **“Measurements of the lateral distribution of heavy vehicles and its effects on the design of road pavements”** Proceedings of the International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Road Transport Technology, University of Michigan, pp. 389–395
- [6] O. Sirin, M. Tia, R. Roque und B. Choubane (2007) **“Evaluation of performance characteristics of the heavy vehicle simulator in Florida”**, Building and Environment 42, pp. 1270-1277
- [7] A. Bayat, M. Knight und A. Adedapo (2010), **“Flexible pavement response under dynamic wheel loads – a CPATT full – scale instrumented test road study”**, Proceedings Annual Conference – Canadian Society for Civil Engineering Volume 2, pp. 1264–1273
- [8] X. Teng X. Li und K. Chou (2008), **“Application of finite element analysis to access the rutting potential in asphalt pavements”**, Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation and Development, Volume 319, pp. 480–485
- [9] C. Villiers, R. Roque, B. Dietrich (2005), **“Interpretation of transverse profiles to determine the source of rutting within an asphalt pavement system”**, Transportation Research Record, Issue 1905, pp. 73-81
- [10] J. Wu, F. Ye, J. Ling, J. Qian und S. Li (2012), **“Rutting resistance of asphalt pavements with fine sand subgrade under full – scale trafficking at high and ambient air temperature”**, Proceedings of the 4th international conference on accelerated pavement testing, Davis, CA, USA, Sep 19-21 2012, ISBN 978-0-415-62138-0, pp. 265-276
- [11] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2011), **„Dimensionierung Strassenaufbaus, Unterbau und Oberbau“**, SN 640 324.
- [12] P. Bodmer, H. Byland, H. de Witte (2014), **„Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungs-kontrolle von Fundamentalschichten“**; Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfach, VSS 2002/501, Bericht 1459
- [13] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (1998), **„Böden - Plattendruckversuch EV und ME“**, SN 670317b.
- [14] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2007), **„Verdichtung und Tragfähigkeit – Anforderungen“**, SN 640 585b
- [15] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013) **„Walzasphalt - Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten“**, SN 640 430c
- [16] A. Bohn, P. Ullidtz, R. Stubstad und A. Sørensen (1972), **“Danish Experiments with the French Falling Weight Deflectometer”**, Proc. 3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1:1119–1128
- [17] H. Beckedahl, H. Hürtgen, E. Straube und H-W. Horz (1996), **„Begleitende Forschung zur Einführung des Falling Weight Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland“**, Bonn-Bad Godesberg : Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Strassenbau. (Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik ; Heft 733.
- [18] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2006), **„Bestimmung des Schichtenverbunds (nach Leutner)“**, SN 670 641
- [19] 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
- [20] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **„Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt“**, SN 670 401, EN 12697-1

-
- [21] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), „**Asphalt - Prüfverfahren - Teil 2: Korngrößenverteilung**“, SN 670 402, EN 12697-2
-
- [22] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2012), „**Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt -Teil 5: Bestimmung der Rohdichte**“, SN 670 405, EN 12697-5
-
- [23] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), „**Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern**“, SN 670 406, EN 12697-6
-
- [24] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2011), „**Dimensionierung des Strassenaufbaus; Äquivalente Verkehrslast**“, SN 640 320
-

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: 06.09.2017

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2013/006
Projekttitel: Einfluss kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung mit der Grossversuchsanlage MLS10 auf die Widerstandsfähigkeit eines T2 Norm-Belages
Enddatum: 06.09.2017

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Effekte von kanalisierter und nicht kanalisierter Belastungen auf die Performance eines Asphaltbelages wurde mit dem Mobile Load Simulator MLS10 untersucht. Im kanalisierten Belastungsmodus betrieht das Lastrad der Maschine wiederholt die gleiche Spur ab. Da aber im Strassenverkehr aufeinanderfolgende Fahrzeuge seitlich abweichen, sind kanalisierte Verkehrssimulationen nur als Annäherungen der realen Vorkommnisse zu verstehen. Trotzdem wird diese Belastungsart aufgrund der hohen lokalisierten Belastungseinwirkung, welche zu schnellen Versagenserscheinungen führt, bevorzugt. Eine wahrheitsgetreuere Verkehrssimulation sieht ein seitliches Driften der aufeinanderfolgenden Belastungsräder vor. Ob mit dieser Anordnung bessere Resultate erzielt werden können, ist aus der vorhandenen Literatur nicht eindeutig ersichtlich. Um diese Wissenslücke zu schliessen wurde eine für geringes Verkehrsaufkommen entwickelte T2-S2 Fahrbahn aufgebaut und an zwei Positionen kanalisiert und nicht kanalisiert belastet. Abgesehen von einigen oberflächlichen Randrissen in der kanalisierten Fahrspur ergaben Rissuntersuchungen an beiden Belastungsstrecken bis zum Ende der Prüfungen keine weiteren Befunde. Diese Ergebnisse weisen in beiden Fällen auf eine noch nicht erreichte Strukturermüdung auf. Aus den erhobenen Daten aus Dehn- und Beschleunigungsmessungen konnte keine eindeutige Tendenz für ein Strukturwandel festgestellt werden. Im Gegensatz dazu zeigen die Resultate der FWD-Messungen, dass in der kanalisierten Fahrspur eine stärkere Schädigung als in der nicht kanalisierten stattgefunden hat. Die Spurrinnen beider Belastungsanordnungen zeigen trotz der breiteren Form der nicht kanalisierten Fahrbahn ähnliche Tiefen. Volumetrische Labormessungen an den entnommenen Bohrkernen veranschaulichen, dass in der kanalisierten Belastungsanordnung eine höhere Nachverdichtung stattgefunden hat. Vergleicht man die Schichthaltung beider Betriebsarten ergaben Laboruntersuchungen eine niedrigere Schichthaltung in der kanalisierten Fahrspur, welche auf eine stärker lokalisierte Verformung hinweist. Anhand der Resultate beider Belastungsanordnungen kann zusammenfassend behauptet werden, dass hinsichtlich der Strukturermüdung die kanalisierte Belastung gute Resultate erzielt. Um aber oberflächliche Verschleisserscheinungen (Rissbildung, Kornausbrüche, Spurrinnengestaltung etc.) richtig simulieren zu können, ist eine nicht kanalisierte Anordnung unerlässlich.



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 es, mithilfe der mobilen Grossversuchsanlage MLS10, die unterschiedliche Wirkung kanalisierter und nicht kanalisierter beschleunigter Verkehrslastsimulation auf Asphaltbeläge zu ermitteln. Damit sollten die Grundlagen für die quantitative und qualitative Beurteilung des Einflusses beiden Betriebsarten unter klar definierten Lastbedingungen geschaffen werden.

Dank der geleisteten Arbeit, konnten die Schädigungsmechanismen ermittelt werden, welche zum Versagen der unterschiedlich belasteten Beläge geführt haben. Die Resultate umfassen für jede Belastungsart

- Die Analysen und Charakterisierung der Spurrinnenbildung (Tiefe, Form, usw.)
- Die Rissevolution und deren Ursachen
- Die Charakterisierung der Steifigkeit und Tragfähigkeit des gewählten Belages, anhand der gemessenen Verformungen bei den unterschiedlichen Belastungskonfigurationen

Folgerungen und Empfehlungen:

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass im vorliegenden Fall, hinsichtlich der Spurrinnentiefe die kanalisierte Belastungsanordnung die nicht kanalisierte Belastungsanordnung genügend gut annähert. Um jedoch den Einfluss einer allfälligen Inhomogenität in der Fundation zu minimieren soll der Belag an mehreren Stellen untersucht werden. Hinsichtlich oberflächlichen Längsrisse, Nachverdichtung und Spurrinnenform nähert die nicht kanalisierte Belastungsanordnung die Auswirkungen des realen Verkehrsaufkommens besser an als die kanalisierte Anordnung. Bei der Analyse der Strukturermüdung wurde kein Unterschied zwischen beiden Prüffelder gefunden. Alle vorliegenden Resultate sind mit anders Strukturierte Normbeläge zu verifizieren

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Partl

Vorname: Manfred N.

Amt, Firma, Institut: Empa, Dübendorf

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



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. Es konnte aufgezeigt werden, dass hinsichtlich der Strukturermüdung die kanalisierte Belastung gute Resultate erzielt. Für die Beurteilung von oberflächlichen Verschleisserscheinungen (Rissbildung, Komausbrüche, Spurrinnengestaltung etc.) eignet sich die nicht kanalisierte Belastung wesentlich besser.

Umsetzung:

Für die Anordnung der Simulation und für die Beurteilung der Resultate liefert die Forschung gute Grundlagen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Weitere, zum Teil bereits abgeschlossene Forschungsprojekte dienen ebenfalls als Grundlage für die Überarbeitung der Dimensionierungsnormen. Weiterer Forschungsbedarf ist gesamtheitlich zu klären.

Einfluss auf Normenwerk:

Das vorliegende Projekt kann Grundlagen für die Überarbeitung der Dimensionierungsnormen liefern.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Studer

Vorname: Dominik

Amt, Firma, Institut: Kanton Aargau, Abteilung Tiefbau

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.