
Substanzdiagnose

**Weiterentwicklung und Bewertung
neuer sowie bekannter Verfahren zur
Tragfähigkeitsbewertung anhand von
Feldversuchen an Fahrbahnbefesti-
gungen mit definiert eingebrachten
Substanzstörungen**

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Substanzdiagnose

Weiterentwicklung und Bewertung neuer sowie bekannter Verfahren zur Tragfähigkeitsbewertung anhand von Feldversuchen an Fahrbahnbefestigungen mit definiert eingebrachten Substanzstörungen

von

Markus Oeser, Frédéric Otto, Pengfei Liz, Dawei Wang
Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen University

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 89.0314
Konzept zu statistisch repräsentativen Verkehrsbeobachtungen

Fachbetreuung:
Dirk Jansen

Referat:
Analyse und Entwicklung von Straßenoberbauten

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

<https://doi.org/10.60850/FV-S-89.0314>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an verlag@bast.de zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Kurzfassung

Substanzdiagnose - Weiterentwicklung und Bewertung neuer sowie bekannter Verfahren zur Tragfähigkeitsbewertung anhand von Feldversuchen an Fahrbahnbefestigungen mit definiert eingebrachten Substanzstörungen

Gegenwärtig verwendete Verfahren zur Substanzbewertung von Asphaltfahrbahnen beruhen vorwiegend auf der Analyse des Oberflächenzustandes, weshalb seit langer Zeit neue Verfahren, die eine zutreffendere Bewertung der Substanz ermöglichen, erforscht werden. Insbesondere Verfahren die auf der Messung der Tragfähigkeit der Straßenkonstruktion basieren stellen einen zentralen Forschungsgegenstand dar. Dabei beruht das Prinzip der Tragfähigkeitsbewertungen darin, über die gemessenen Einsenkungen unter definierter Belastung, Aussagen über die Steifigkeit des Gesamtaufbaues zu ermöglichen. Aus diesen Kennwerten können Aussagen zum Tragverhalten der Fahrbahnbefestigung abgeleitet werden. Es bleibt jedoch weiterhin offen, inwieweit klimatisch bedingte Faktoren wie die Fahrbahntemperatur das Tragverhalten im Verhältnis zu der verkehrlichen Beanspruchung beeinflusst und welche Auswirkungen dies auf die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen haben kann.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Versuchsstrecke mit einer definiert geschädigten Asphalttragschicht angelegt, welche mit einem Monitoringsystem zur Überwachung von verschiedenen Fahrbahnkenngrößen ausgestattet wurde. Im Rahmen von turnusmäßigen zerstörungsfreien Tragfähigkeitsmessungen konnte unter Berücksichtigungen der bekannten klimatischen, verkehrlichen und strukturellen Randbedingungen der Zustand des fortgeschrittenen Substanzverlustes der Versuchsstrecke dokumentiert und bewertet werden.

Darüber hinaus wurden diese Erkenntnisse bei der Entwicklung eines Strukturmodells zur Bewertung der Tragfähigkeitsmessungen als Grundlage für die Validierung verwendet. Dieses Modell wurde verwendet, um verschiedene Aspekte der Wirkung des Substanzverlustes auf das Tragverhalten der Fahrbahn zu untersuchen. Hieraus konnte ein Bewertungshintergrund für Tragfähigkeitsmessungen und den verschiedenen Mechanismen des Substanzverlustes sowie der einwirkenden klimatischen Rahmenbedingungen abgeleitet werden.

Abstract

Substance diagnosis – Further development and evaluation of new as well as known methods for load-bearing capacity assessment on the basis of field-tests carried out on pavements with defined structural flaws

Currently used methods for asphalt pavement substance evaluation are mainly based on the analysis of the state of the pavement surface. For this reason, research has lately been focused on new methods which allow a more accurate substance evaluation. Especially methods based on the measurement of the bearing capacity of the pavement structure are a main object of re-search. The principal of evaluation of bearing capacity is based on the measurement of deformations under a defined load, from which the stiffness of the whole structure can be derived. These characteristic values allow an assessment of the load-bearing behavior of the pavement structure. However, it is unclear in what way climatic factors such as the temperature of the pavement structure have an influence on the load-bearing behavior in relation to the loads induced by traffic and which impact this can have on the results of the load-bearing capacity testing.

In this research project, a testtrack with a base course with defined cracks was built and equipped with a monitoring system in order to keep track of different key figures of the pavement. Load-bearing capacity measurements, which were carried out on a regular basis, allowed with respect to climatic and structural boundary conditions a documentation and evaluation of the structural deterioration of the testtrack.

Furthermore, these results were used to validate a newly developed structural model for the evaluation of the load-bearing capacity measurement. This model was used to analyse the effect of the substance degradation on the load-bearing behavior of the pavement. An assessment background for load-bearing measurements and the different mechanisms of substance degradation as well as the climatic boundary conditions could be derived from this.

Kurzbericht

Substanzdiagnose - Weiterentwicklung und Bewertung neuer sowie bekannter Verfahren zur Tragfähigkeitsbewertung anhand von Feldversuchen an Fahrbahnbefestigungen mit definiert eingebrachten Substanzstörungen

1 Problemstellung und Zielsetzung

Die derzeit verwendeten Verfahren zur Bewertung der Substanz von Asphaltfahrbahnen beruhen vorwiegend auf der Analyse des Oberflächenzustands. Vor diesem Hintergrund werden seit langer Zeit im umfassenden Maße Verfahren untersucht, welche auf dem Prinzip der Tragfähigkeitsmessung basieren. Dabei wird eine definierte Last auf den Fahrbahnaufbau aufgebracht und die hieraus resultierenden oberflächlichen Einsenkungen in Form einer Deflektionsmulde gemessen. Derartige Verfahren erlauben eine Aussage über die Steifigkeit des Aufbaus, woraus sich Kennwerte für das Tragverhalten der Fahrbahnbefestigung ableiten lassen, welche für die Bewertung der Fahrbahnsubstanz herangezogen werden sollen.

Vor dem Hintergrund der sehr inhomogenen mechanischen Eigenschaften von Asphaltbefestigungen ist die Herstellung eines Zusammenhanges zwischen der Fahrbahndeflektion und der Fahrbahnsubstanz jedoch nur bedingt möglich. Zahlreiche Einflüsse wie z.B. Temperaturen, Lastpausen usw. können die genannten Zielgrößen maßgeblich beeinflussen. Das Ziel dieses Forschungsprojekts bestand darin, die strukturelle Substanz von Asphaltbefestigungen mit definiert eingebrachten Substanzstörungen zu erfassen und zu bewerten. Dies erfolgte anhand einer systematischen Analyse von Deflektionsmessungen, welche auf einer großmaßstäblich angelegten Versuchsstrecke im Freien erfolgte, sodass realitätsnahe klimatische sowie verkehrliche Randbedingungen vorlagen.

Die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurden bei der Entwicklung eines Strukturmodells zur Bewertung der Tragfähigkeitsmessungen als Grundlage für die Validierung verwendet. Dabei wurden bei der Entwicklung dieses Modells verschiedene Aspekte der Wirkung des Substanzverlustes auf das Tragverhalten der Fahrbahn untersucht und sowohl anhand der Messungen im Feld auf der Versuchsstrecke als auch anhand von Laboruntersuchungen an aus der Fahrbahn entnommenen Bohrkernen bewertet. Das Modell soll für künftige Forschung die Möglichkeit bieten, die Möglichkeit den Einfluss verschiedener Arten von strukturellen Schwachstellen wie etwa z.B. von Rissen mit verschiedenen Geometrien und Verläufen auf die direkten Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen, wie z.B. der Deflektionsmulde näher zu untersuchen und zu beurteilen.

2 Untersuchungsmethodik

Die Untersuchung des strukturellen Substanzverlustes sowie dessen Auswirkung auf die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen unter Berücksichtigung klimatischer schwankender Rahmenbedingungen und einer für reguläre Verkehrsverhältnisse üblichen in stochastischen zeitlichen Abständen wiederkehrenden Beanspruchung, erfolgte im Rahmen dieses Projektes durch die Entwicklung eines geeigneten numerischen Modells, welches durch experimentell ermittelte Daten gestützt werden sollte. Zur Entwicklung sowie Validierung dieses Modells wurde eine Versuchsstrecke angelegt, welche die experimentelle Untersuchung des Substanzverlustes ermöglichte.

2.1 Versuchsstrecke

Bei dieser Versuchsstrecke handelte es sich um einen neu angelegten Streckenabschnitt mit einem definierten Fahrbahnaufbau der parallel zu einer bereits bestehenden Zufahrt auf einem privaten Werksgelände angelegt wurde. Diese Zufahrt wurde um einen neuen Asphaltfahrbahnaufbau, bestehend aus ei-

ner 16 cm dicken Asphalttragschicht und einer 4 cm dicken Asphaltdeckschicht, mit einer Breite von 3,50 m erweitert. Die Asphalttragschicht wurde hierbei in zwei Lagen eingebaut, wobei mithilfe eines Fugenschneides eine Substanzstörung („Riss“) in die untere Lage eingebracht wurde.

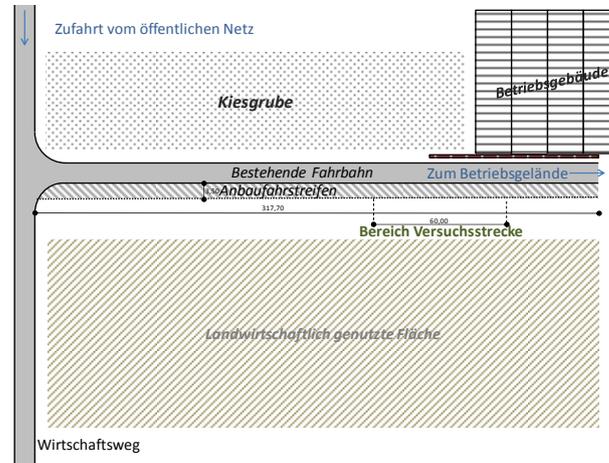


Bild 2-1: Schematische Andeutung der Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke wurde nach ihrer Fertigstellung dem Verkehr übergeben und insgesamt 20 Monate lang betrieben. Ein Monitoringsystem überwachte den Zustand der eingebrachten Risse hinsichtlich ihrer Öffnungsweite kontinuierlich. Ebenfalls erfasst wurden die im Fahrbahnaufbau herrschenden Temperaturen sowie der Wassergehalt des Untergrundes.

Zur Beurteilung des Verfalls der strukturellen Substanz unter den vorliegenden klimatischen sowie verkehrlichen Bedingungen, wurden in einem regelmäßigen Turnus Tragfähigkeitsmessungen mithilfe eines speziellen zerstörungsfreien Messverfahren durchgeführt. Bei diesem Verfahren werden 12 Geophone auf der Fahrbahnoberfläche parallel zur Fahrtrichtung des Schwerlastverkehrs auf einer definierten „Messachse“ über eine Länge von 3,30 m äquidistant verteilt angeordnet. Ein definierter 5-achsiger Sattelzug mit einem 40 t Gesamtgewicht und einer bekannten Achslastverteilung fuhr bei den Versuchen mit einer definierten Geschwindigkeit und einem definierten Seitenabstand zu den Geophonen entlang der Messachse. Die von den Geophonen registrierte Erschütterungsgeschwindigkeit der Fahrbahnoberfläche, konnte im Nachgang der Versuche in eine Oberflächendeformation der Fahrbahn in Form einer Deflektionsmulde umgerechnet werden.



Bild 2-2: Darstellung des Messprinzips der Tragfähigkeitsmessung anhand von Geophonen

2.2 Strukturmodell

Zur Beurteilung der Einflüsse von Temperatur und Bodenfeuchte sowie der Risse auf die Ergebnisse der

Tragfähigkeitsmessungen war ein Strukturmodell zu entwickeln, welches in der Lage ist das Tragverhalten der Asphaltfahrbahn realitätsnah abzubilden. Zur Ermittlung der Tragfähigkeitsparameter aus den Deflektionsmessungen wurde ein Verfahren, welches im Rahmen des Forschungsprojektes FE 88.0317/2014 entwickelt wurde, zugrunde gelegt. Bei diesem Verfahren wird ein Künstliches Neuronales Netz (KNN) auf Grundlage eines FE-Modells dahingehend trainiert, für verschiedene Fahrbahndeflektionen die Materialparameter eines 2-Schichtensystems, bestehend aus einer Asphaltschicht und einer ungebundenen Schicht, zu berechnen. Änderungen in den Materialparametern liefern somit eine Aussage über Änderungen im Tragverhalten des Gesamtaufbaus und dienen als wichtige Indikatoren für den strukturellen Substanzverlust der Fahrbahn.

Zur Berücksichtigung der in der Fahrbahnstruktur eingebrachten Substanzstörung, wurde das FE-Modell, welches für das Training des KNN verwendet wurde, in Analogie zum realen Fahrbahnaufbau mit einer gleich gearteten Substanzstörung modelliert.

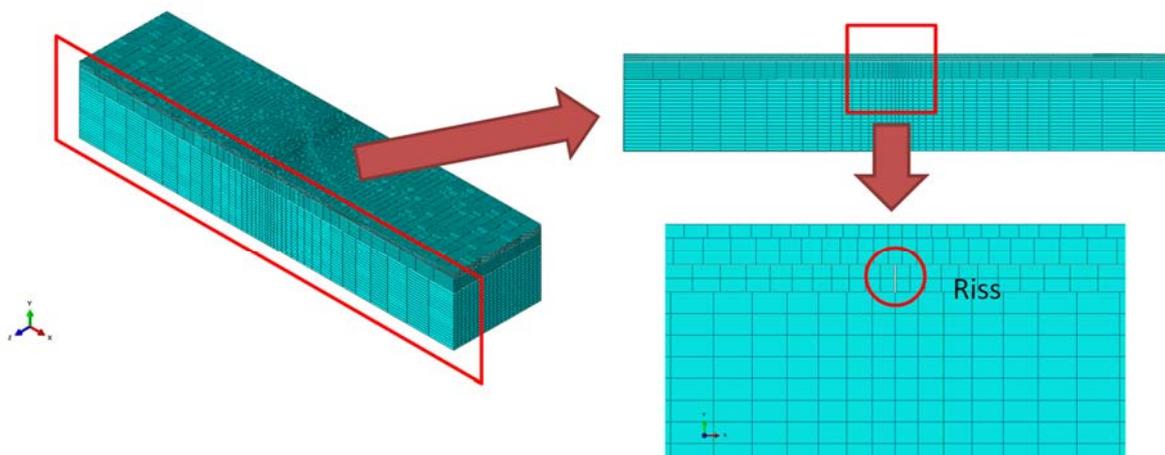


Bild 2-3: 3D FE-Modell in ABAQUS (mit Riss)

Es wurde für das Training des KNN eine Datenbank mit insgesamt 88 Materialparameterkombinationen erstellt. Für jede Kombination wurde der Fahrbahnaufbau mit einem virtuellen LKW belastet, welcher zum Versuchs-LKW aus den Tragfähigkeitsmessungen, identische Eigenschaften besaß. Dieser erzeugte in dem Simulationsmodell für jede der oben genannten Materialparameterkombinationen eine Deflektionsmulde, sodass für das Training und für die Validierung des KNN eine entsprechende Datenbank zur Verfügung stand.

3 Untersuchungsergebnisse

Aus dem 20 Monate lang andauernden Monitoring konnten Erkenntnisse hinsichtlich der innerhalb dieses Zeitraumes auftretenden verkehrlichen sowie klimatischen Beanspruchung der Versuchsstrecke entnommen werden. Dabei wurden insgesamt 107 203 Schwerfahrzeuge registriert, was einem DTV von 178 Schwerfahrzeugen/24h entspricht (Mittelwert über den gesamten Zeitraum, unter Einbeziehung von Sonn- und Feiertagen). Die Fahrzeuge wurden mithilfe eines Kamerasystems registriert und anschließend in der angrenzenden Kiesgrube verwogen, sodass neben der Anzahl der Fahrzeuge auch Aussagen zu der Belastung der Versuchsstrecke getroffen werden konnten. Unter Verwendung eines Achslastverteilungsmodells wurde eine Belastung von 121 680 äquivalenten 10-to Achsen innerhalb des gesamten Untersuchungszeitraumes ermittelt.

Aus dem Monitoringsystem konnten die klimatischen Extrembeanspruchungen der Versuchsstrecke ermittelt werden. Dabei lag die Tiefstemperatur im Asphaltaufbau bei $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Höchsttemperatur bei

+52 °C. Der Wassergehalt im Fahrbahnuntergrund lag, aufgrund des hohen Schluffgehaltes, zwischen 25 Vol.-% und 38 Vol.-%, je nach Lage und Jahreszeit.

3.1 Charakteristika der Rissöffnung

Eine wesentliche Erkenntnis aus dem Monitoring lag in der Größenordnung der Temperaturabhängigkeit der Öffnungsweite der Risse. Ausgehend vom Startzeitpunkt, welcher im Spätsommer lag, konnte beobachtet werden, wie sich ein Riss über die Winterperiode temperaturbedingt um 0,4 bis 0,6 mm öffnete und anschließend in der Sommerperiode auf bis zu -0,3 mm gegenüber dem Ausgangszustand wieder verschloss. Auch tageszeitliche Schwankungen, wiesen auf derartige Phänomene hin, wobei das Verhalten der tageszeitlichen Rissbewegung je nach saisonalem Temperaturbereich, von der Größenordnung her unterschiedlich ausfiel (im Winter waren höhere temperaturbedingte Rissbewegungen zu beobachten als im Sommer).

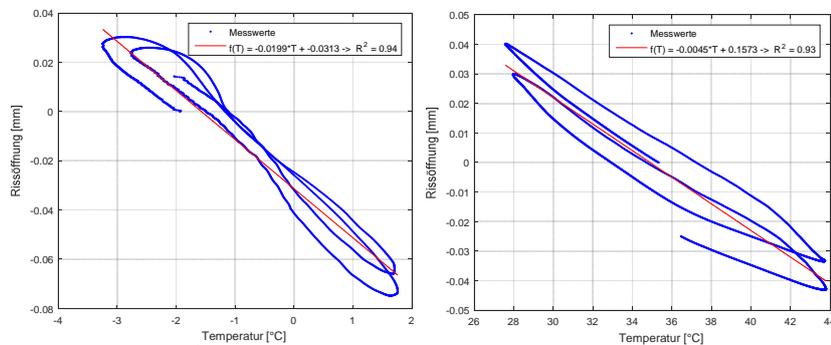


Bild 3-1: (links) Gegenüberstellung von Rissöffnung und Temperatur im Winter

Bild 3-2: (rechts) Gegenüberstellung von Rissöffnung und Temperatur im Sommer

Bei der verkehrlichen Beanspruchung handelt es sich um kurzzeitige Ereignisse, da die Überrollung der Fahrbahn und die damit verbundenen Bewegungen im Rissbereich innerhalb von Sekunden und zumeist in Form von Lastkollektiven, bedingt durch die Anzahl von Achsen je Fahrzeug sowie durch mögliche Fahrzeugkolonnen, auftreten. Unter Verwendung der bekannten Fahrzeuglasten, der bekannten Fahrgeschwindigkeit und der ebenfalls bekannten Fahrbahntemperatur, konnten isoparametrische Untersuchungen vorgenommen werden, welche erlaubten die aus den einzelnen Fahrzeugachsen resultierenden Bewegungsimpulse im Riss zu charakterisieren.

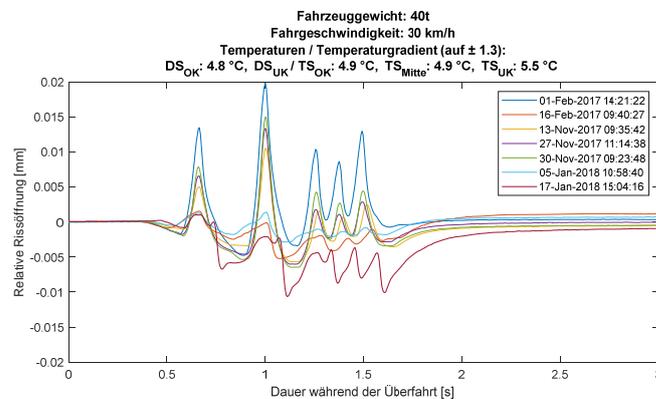


Bild 3-3: Superposition der aus den Überrollungen resultierenden Bewegungsimpulse der Risse unter isoparametrischen Bedingungen

Dabei weist jeder Bewegungsimpuls eine Impulshöhe und eine Impulsdauer auf. Es konnte nachgewie-

sen werden, dass die Impulsdauer temperaturabhängige Charakteristika aufweist, wohingegen die Impulshöhe, entgegen der Erwartung mit zunehmender Fahrbahntemperatur und abnehmender Fahrbahnsteifigkeit nicht zunahm, sondern im Gegenteil, geringer wurde. Numerische Untersuchungen ergaben, dass die Entwicklung der Parameterverhältnisse aus Steifigkeit der Asphaltfahrbahn, des Untergrundes sowie die Verbundbedingungen zwischen diesen beiden Schichten einen solchen Effekt hervorrufen können, jedoch nicht in der gemessenen Größenordnung. Da das Modell ausschließlich auf einem linear-elastischen Ansatz und einer quasi-statischen Last beruhte, zeigt dies den hohen Einfluss, den die temperaturabhängige Visko-Elastizität sowie das dynamische Verhalten der Fahrbahn infolge der bewegten Last auf das Rissbewegungsverhalten besitzen.

3.2 Entwicklung der Tragfähigkeit der Fahrbahn

Aus den Tragfähigkeitsmessungen konnte, unter Berücksichtigung der vorherrschenden Fahrbahntemperatur, spätestens nach 83 500 bis 101 500 äquivalenten 10-to Achsübergängen ein struktureller Substanzverlust in der Asphaltfahrbahn verzeichnet werden. Dies geht auf einen signifikanten Rückgang des E-Moduls des Asphaltpaketes, bei gleichzeitig sinkenden Fahrbahntemperaturen, zurück.

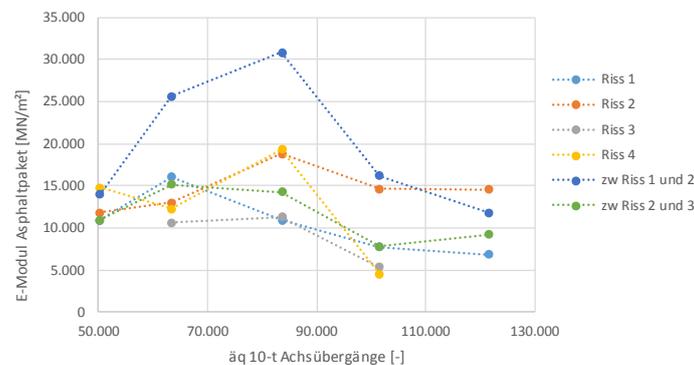


Bild 3-4: Berechnete E-Moduln des Asphaltpaketes über die erfolgten äq 10-to Achsübergänge

Die Entnahme von Bohrkernen aus der Versuchsstrecke und die an diesen Bohrkernen ermittelten Ermüdungs- und Steifigkeitskennwerte ergaben jedoch, dass das Material auf der Unterseite des Asphaltpaketes sowohl in den Rollspuren als auch in den unbelasteten Bereichen der Versuchsstrecke die gleiche Ermüdungsresistenz sowie Steifigkeit ergaben und auch ansonsten keine charakteristischen Unterschiede aufwiesen. Ebenso konnten im Bereich der Substanzstörungen keine Rissfortpflanzungen visuell festgestellt werden. Jedoch stellte sich ein auf der Versuchsstrecke herrschender flächendeckender gestörter Schichtenverbund heraus. Der somit systematisch festgestellte Tragfähigkeitsverlust der Asphaltfahrbahn wird auf diesen Verlust des Schichtenverbundes zurückgeführt.

4 Fazit

Die kontinuierliche Überwachung einer Versuchsstrecke mit eingebrachten Substanzstörungen, haben umfassende Erkenntnisse zu den komplexen Zusammenhängen, welche zwischen der Tragfähigkeit der Fahrbahn, den klimatischen Rahmenbedingungen, der Wirkung von Rissen auf das Tragverhalten sowie dem allgemeinen fortschreitenden Substanzverlust bestehen. Die Tragfähigkeitsmessungen und die Anwendung des Strukturmodells auf diese Tragfähigkeitsmessungen konnten einen strukturellen Substanzverlust verzeichnen, welcher sich jedoch anders als erwartet manifestiert hat. Die so gewonnenen Erkenntnisse bieten ein hohes Weiterentwicklungspotenzial der derzeit etablierten Verfahren zur Bewertung der Substanz von Asphaltfahrbahnen auf Grundlage von Tragfähigkeitsmessungen.

Summary

Substance diagnosis – Further development and evaluation of new as well as known methods for load-bearing capacity assessment on the basis of field-tests carried out on pavements with defined structural flaws

1 Introduction and objectives

Currently used methods for evaluation of the substance of asphalt pavements are mainly based on the analysis of the state of the surface. For this reason, methods based on the principle of load-bearing capacity measurement have been lately thoroughly investigated. A defined load is being applied on the pavement and the resulting superficial deformations, which appear as a deflection bowl, are being measured. These types of measurements allow an assessment of the stiffness of the pavement, from which information about the load-bearing behavior of the structure can be derived and be used for the evaluation of the pavement substance.

Given the fact, that asphalt pavements possess extremely inhomogeneous mechanical properties, the relationship between the deflection bowl and the pavement substance can only be established very loosely. Numerous influence factors such as temperature, the time between two loads etc. can have a significant influence on the aforementioned target figures. The goal of this research project was to detect and evaluate the structural substance of asphalt pavements with defined structural flaws. This was achieved by a systematic analysis of deflection measurements, carried out on a large-scale test track located outdoors, in order to obtain realistic climatic as well as traffic related conditions.

The results obtained during the experimental studies were used for the development of a structural model to evaluate the load-bearing capacity measurements as a basis for validation. Different aspects of the effect of loss of substance on the load-bearing behavior of the pavement were analyzed during the development of the model and evaluated with the use of measurements on the test track as well as laboratory tests on cores taken from the pavement. The model will offer the possibility for future research, to analyze and assess the effect of different types of structural flaws with different geometries and shapes on the direct results of the load-bearing behavior.

2 Research methodology

The analysis of the structural substance degradation as well as its effect on the results of the load-bearing capacity tests with respect to the fluctuating climatic conditions as well as the for regular traffic conditions typical stochastic loading pattern, was carried out in this project by developing a suitable numerical model, which should be supported by data obtained through experiments. For the development and validation of this model, a test track was built, which made the experimental analysis of the structural substance degradation of the pavement possible.

2.1 Test track

This test track was a newly constructed road segment with a defined pavement structure, which was arranged parallel to an existing access road of a private company areal. This access road was widened by a new asphalt pavement structure, consisting of an asphalt bearing course of 16 cm thickness and an asphalt surface layer of 4 cm thickness, with a width of 3,50 m. The asphalt bearing course was built in two layers; a structural flaw ("crack") was introduced into the bottom layer by the use of a joint cutter.

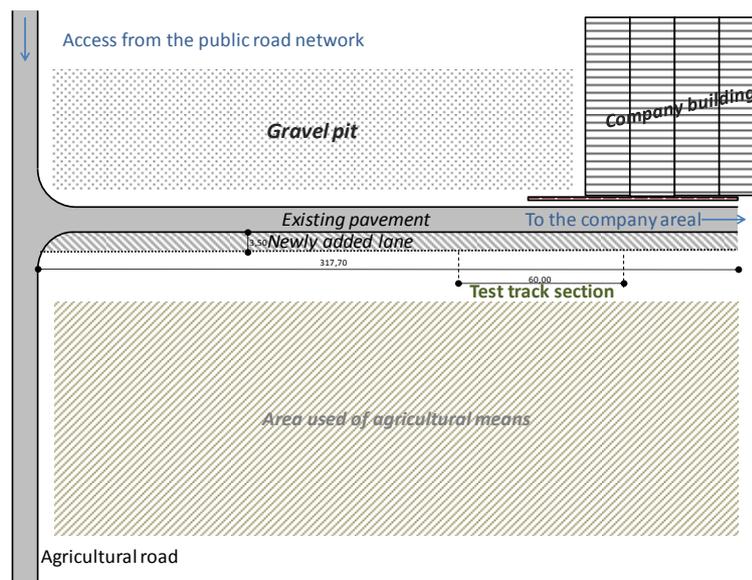


Figure 2-1: Schematic plan of the arrangement of the test track

After the construction works were done, the test track was opened for public traffic and used for a period of 20 months. A monitoring system was placed in order to continuously keep track of the state of the implemented cracks regarding their opening width. Furthermore, the pavement temperature as well as the moisture content of the subbase were monitored as well.

In order to assess the structural substance degradation under the actual climatic and traffic related conditions, load-bearing capacity measurements were carried out on a regular basis by the use of a specific non-destructive testing method. This method consists of 12 geophones being arranged on the pavement surface parallel to the driving direction of the heavy load traffic on a defined "measurement axis" on a length of 3,30 m distributed at equal distance. A defined 5-axle semitrailer with a 40 t total load and a known axle load distribution was passing by the geophones during the tests with a defined lateral distance and a defined driving speed. The speed of the surface vibrations was registered by the geophones and could be calculated into a deflection bowl in the post-process.



Figure 2-2: The measurement principle of load-bearing capacity measurement with geophones

2.2 Structural model

In order to evaluate the influence of temperature and moisture content of the subgrade as well as of the cracks on the results of the load-bearing capacity measurements, a structural model had to be developed with the requirement to be able to realistically represent the load-bearing behavior of the asphalt pavement.

In order to obtain parameters related to the load-bearing behavior from the deflection measurements, a procedure, which was developed in the research project FE 88.0317/2014, was used. In this procedure, an artificial neuronal network (ANN) was trained with an FE-Model, in order to calculate from different pavement deflection bowls the material parameters of a 2-layer system, consisting of an asphalt layer and an unbound layer. Changes in those material parameter make it possible to estimate changes in the load-bearing behavior of the whole structure, which is an important indicator for the structural degradation of the pavement.

In order to take the structural flaw which has been implemented into the pavement structure, the FE-model which was used for the training of the ANN was modeled analogously to the real pavement structure, with a similar structural flaw.

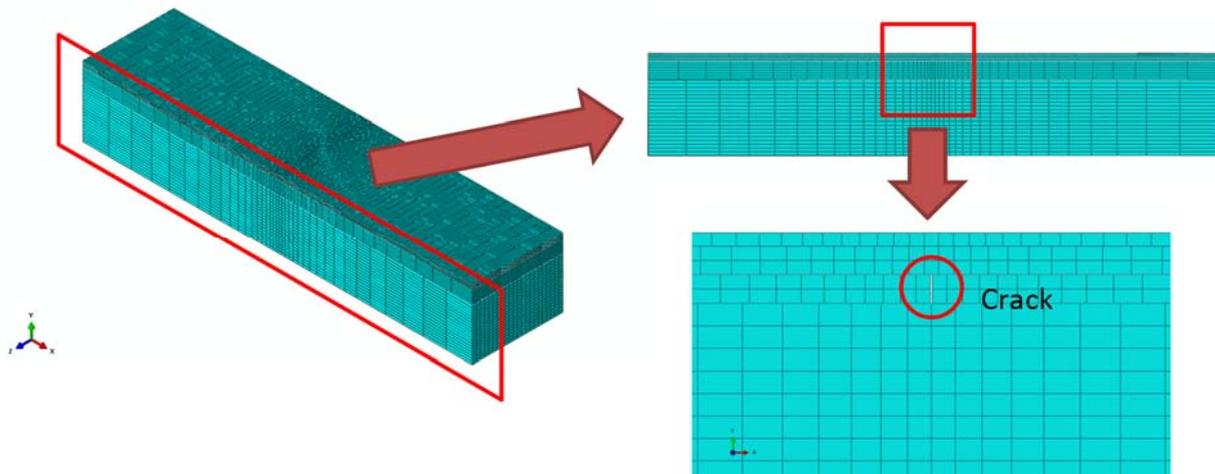


Figure 2-3: 3D FE-Model in ABAQUS (with a crack)

For the training of the ANN a database with 88 material parameter combinations in total was set up. For every combination the pavement structure was loaded with a virtual semitrailer, which possessed identical properties with the semitrailer used in the load-bearing capacity tests. This virtual semitrailer created in the simulation model a deflection bowl for every of the material parameter combinations mentioned above, which allowed to obtain an adequate data basis in order to train and validate the ANN.

3 Results

From the monitoring of the test track, which lasted for 20 months, findings regarding the climatic and traffic loads to which the test track was submitted could be taken from the monitoring data. In total 107 203 heavy vehicles were registered, which corresponds to an average daily traffic of 178 heavy vehicles/24h (mean value over the whole time period, including Sundays and public holidays). The vehicles were registered with a camera system and afterwards weighed in the adjoining gravel pit, which in addition to the number of vehicle passes allowed an assessment of the loads that had been applied onto the test track. With the use of an axle-load distribution model, a total number of 121 680 equivalent 10-to axle passes could be determined.

From the monitoring system, the climatic extreme situations to which the test track was subjected, could be determined. The lowest temperature was found to be of -7°C , while the highest temperature was found to $+52^{\circ}\text{C}$. The moisture content of the subgrade was between 25 Vol.-% and 38 Vol.-%, due to the high content of silt, depending on the location and season.

3.1 Characteristics of the cracks opening

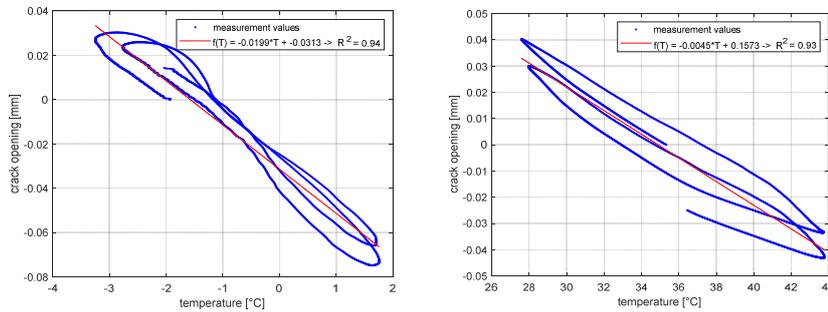


Figure 3-1: (left) comparison of crack opening and temperature during winter

Figure 3-2: (right) comparison of crack opening and temperature during summer

The traffic loads produce short term effects, since the passing of the pavement segment and the movement in the area of the cracks appear only within seconds and usually as load-collectives, depending in the number of axles for each vehicle, as well as possible convoys. With the known loads of the vehicles, the known driving speed and the known pavement temperature, isoparametric studies could be carried out, which allowed a characterization of the movement impulses induced in the cracks by each single vehicle axle.

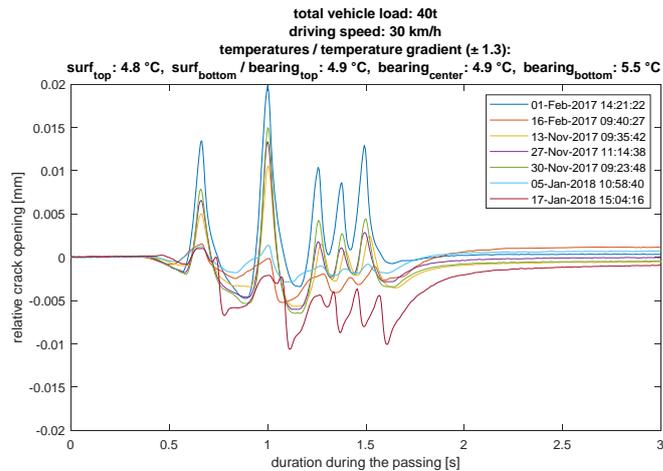


Figure 3-3: Superposition of the movement impulses of the cracks resulting from the vehicle passes under isoparametric conditions

Each movement impulse can be described with an impulse height and an impulse duration. It could be proven, that the impulse duration possesses temperature dependent characteristics, whereas the impulse height did not increase with increasing pavement temperature and increasing pavement stiffness, but on the contrary, decreased. Numerical studies showed, that the evolution of certain parameters such as the stiffness of the two layers of the model, as well as the bonding conditions between those two layers can produce such an effect, however not within the same magnitude. Since the model is explicitly based on a linear-elastic approach with a quasi-static load, this shows the considerable influence, which the temperature dependent visco-elasticity as well as the dynamic behavior of the pavement has on the crack movement behaviour, due to the moving load.

3.2 Evolution of the load-bearing capacity of the pavement

From the load-bearing capacity measurements, with respect to the current pavement temperature, a structural substance degradation in the asphalt pavement could be proven at least after 83 500 to 101 500 equivalent 10-t axle passes. This is due to the significant decrease of the E-modulus of the asphalt layer, with decreasing pavement temperatures at the same time.

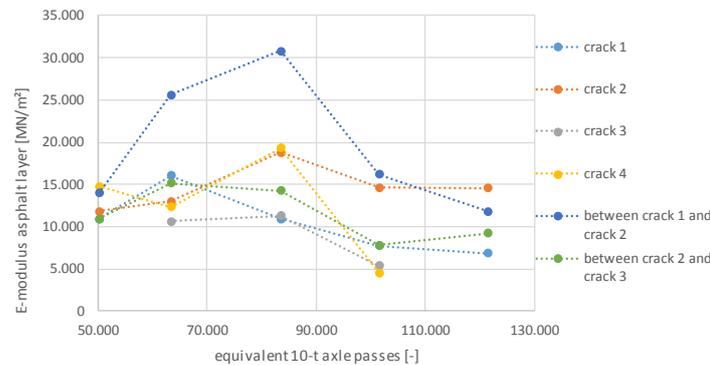


Figure 3-4: Calculated E-moduli of the asphalt layers with respect to the 10-t axle passes

The cores taken from the test track and the fatigue resistance as well as stiffness tests carried out on these cores showed however, that the material on the bottom side of the asphalt layers showed the same results regarding the resistance against fatigue as well as stiffness, independently whether taken from within the wheel path or outside the loaded areas and did not manifest any further specific differences. Furthermore, in the area of the cracks no visual manifestation of crack propagation could be seen. However, an extensive lack of bonding behavior between the two asphalt bearing courses could be found throughout the whole testing area. The systematically determined structural degradation of the asphalt pavement is being traced back to this loss of inter-layer bonding.

4 Conclusion

The continuous monitoring of a test track with defined structural substance flaws, has led to extensive findings regarding the complex relationships between the load-bearing capacity of the pavement, the climatic conditions, the effect of cracks on the load-bearing behavior as well as the general continuing substance degradation of the pavement. Load-bearing capacity tests and the use of the structural model on these tests could detect a loss of structural substance, which however manifested itself in a different manner than expected. The results that were retrieved from this research can be regarded as a significant potential for further development of currently established methods for the evaluation of the substance of asphalt pavements based on load-bearing capacity tests.