

Tragfähigkeitserfassung von kommunalen Hauptverkehrsstraßen mit dem Pavement-Scanner der Bergischen Universität Wuppertal

In Deutschland werden alle vier Jahre netzweite Messungen zur Beurteilung des Zustands von Straßen durchgeführt (ZEB). Die erfassten Merkmale ermöglichen bisher nur eine Bewertung des Oberflächenzustands der Straßen. Um den strukturellen Zustand des gesamten Fahrbahnaufbaus beurteilen zu können, muss die Tragfähigkeit der Straßen berücksichtigt werden. Die effizienteste und störungsärmste Tragfähigkeitsmessung, die auch im Hinblick auf die Arbeits- und Verkehrssicherheit vorteilhaft ist, erreicht das Traffic Speed Deflectometer (TSD) im Pavement-Scanner der Bergischen Universität Wuppertal. Im vorliegenden Pilotprojekt werden mit dem TSD über ein Jahr hinweg Messungen auf kommunalen Hauptverkehrsstraßen in Wuppertal durchgeführt. Es werden Randbedingungen identifiziert und hinsichtlich möglicher unerwünschter Einflüsse auf die Messdaten bewertet. Außerdem wird die Wiederholbarkeit ermittelt. Zur Bewertung der Tragfähigkeit werden Kennwerte gebildet und interpretiert, sodass Straßenabschnitte mit Sanierungsbedarf identifiziert werden können. Insgesamt kann festgestellt werden, dass durch die Untersuchung der Tragfähigkeit visuell nicht erkennbare Schwachstellen im Straßenaufbau identifiziert und bei frühzeitiger Einleitung geeigneter Maßnahmen der bauliche Straßenzustand strategisch und wirtschaftlich sinnvoll verbessert werden kann. Das TSD im Pavement-Scanner erweist sich somit als wesentliches und zuverlässiges Instrument in der Erhaltungsplanung – auch im kommunalen Bereich.

In Germany, network-wide the pavement condition survey and assessment (ZEB) are conducted every four years. Until now, the recorded characteristics only allow an evaluation of the surface condition of roads. In order to assess the structural condition of the entire pavement structure, the load bearing capacity of the road must be taken into consideration. The most efficient and least disruptive bearing capacity measurement, which is also advantageous in terms of operational and traffic safety, is only achieved by the Traffic Speed Deflectometer (TSD) in the Pavement-Scanner of the University of Wuppertal. In the present project, measurements are carried out with the TSD over the period of a year on main municipal roads in Wuppertal. Boundary conditions are identified and evaluated with regard to possible undesirable influences on the data. Furthermore, the repeatability is verified. Characteristic values are formed and interpreted in order to identify road sections in need of restoration measures. It can be concluded that, by examining the bearing capacity, visually undetectable weak points in the pavement can be determined and, if appropriate measures are initiated at an early stage, the structural road conditions can be improved in a strategic and economically beneficial manner. The TSD in the Pavement-Scanner thus proves to be an essential and reliable tool in maintenance planning – even in the municipal scope.

1 Einleitung

Die netzweite Erfassung, Bewertung und Prognose des Fahrbahnoberflächenzustands erfolgt zurzeit mithilfe des standardisierten Verfahrens der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB). Dabei werden alle vier Jahre die an der Oberfläche erkennbaren Zustandsmerkmale erfasst, anhand derer der Straßenzustand beurteilt wird: Ebenheit (Längsunebenheit und Querunebenheit) und Substanzmerkmale der Oberfläche. Nach der Zustandserfassung erfolgt die Bewertung, bei der aus den erfassten Zustandsgrößen der genannten Merkmale dimensionslose und daher vergleichbare Zustandswerte gebildet werden. In einer Wertesynthese werden anschließend ein Gebrauchswert für die Bewertung der Gebrauchsfähigkeit und ein Substanzwert (Oberfläche) für die Substanzbewertung gebildet, wobei deren schlechtester Wert als Gesamtwert für die Erhaltungsplanung herangezogen wird. Der Substanzwert der Oberfläche setzt sich aus

unregelmäßigen Netzrissen, Flickstellen und sonstigen Oberflächenschäden (Ausbrüche, Ausmagerung und Bindemittelanreicherungen) sowie Spurrinntiefe oder Längsebenheit (max. Wert) zusammen (FGSV 2018; FGSV 2012).

Die derzeit erfassten Zustandsmerkmale lassen nur eine Bewertung des Oberflächenzustands der Straßen zu. Tiefliegende Schäden wie ein mangelhafter Schichtenverbund und/oder Ermüdungsrisse, die sich im Asphalt von unten nach oben ausbreiten und die Substanz der Straßenbefestigung signifikant beeinträchtigen, werden nicht berücksichtigt bzw. erst dann berücksichtigt, wenn sie auf der Fahrbahnoberfläche in Erscheinung treten. Demzufolge ist der Substanzwert (Oberfläche) gemäß ZEB alleine nicht ausreichend, um den Zustand der Substanz des Oberbaus zu beschreiben (FGSV 2019).

Zur Beurteilung des strukturellen Zustands des gesamten Straßenaufbaus muss zusätzlich zum Oberflächenzustand die Tragfähigkeit der Straße untersucht werden. Die

Tragfähigkeit ist definiert als der Widerstand des Straßenaufbaus gegen kurzzeitige Belastungen. Sie gibt Auskunft über den strukturellen Zustand des Straßenoberbaus

■ Verfasser

Barbara Esser, M. Sc.
b.esser@uni-wuppertal.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Pahirangan Sivapatham
psivapatham@uni-wuppertal.de

Tim Schrödter, M. Sc.
t.schroedter@uni-wuppertal.de
Bergische Universität Wuppertal
Paulusstraße 11
42285 Wuppertal

Univ.-Prof. a. D. Prof. h. c. (Ukr) Dr.-Ing. Hartmut Johannes Beckedahl
h.j.beckedahl@gmx.de

BeStIng GmbH
Mozartstraße 76
40724 Hilden

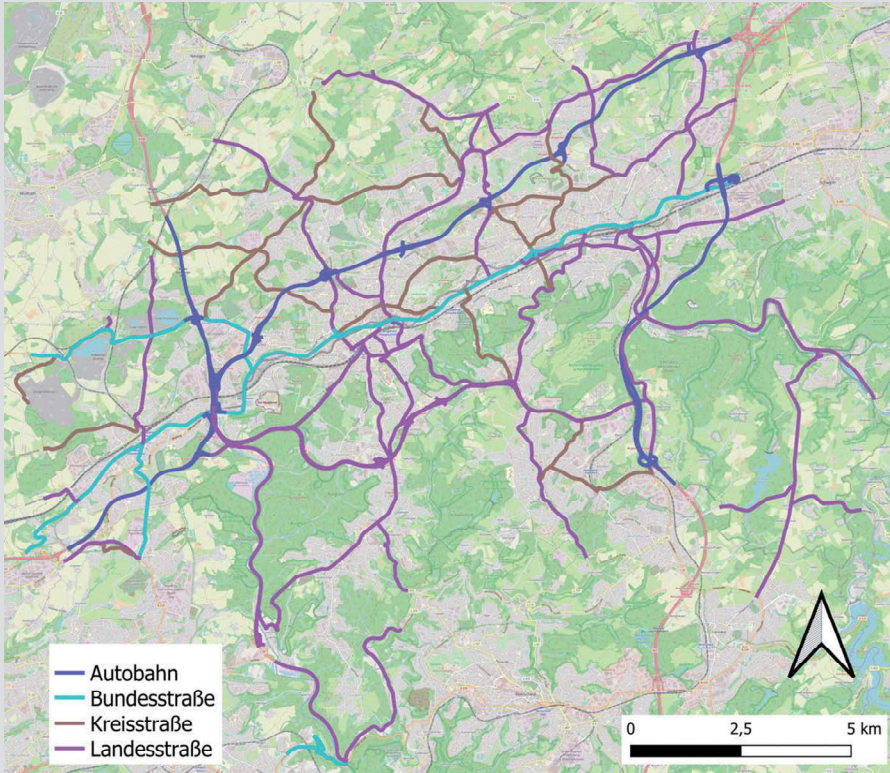


Bild 1: Untersuchungsstrecken in Wuppertal, Quelle: OpenStreetMap, bearbeitet

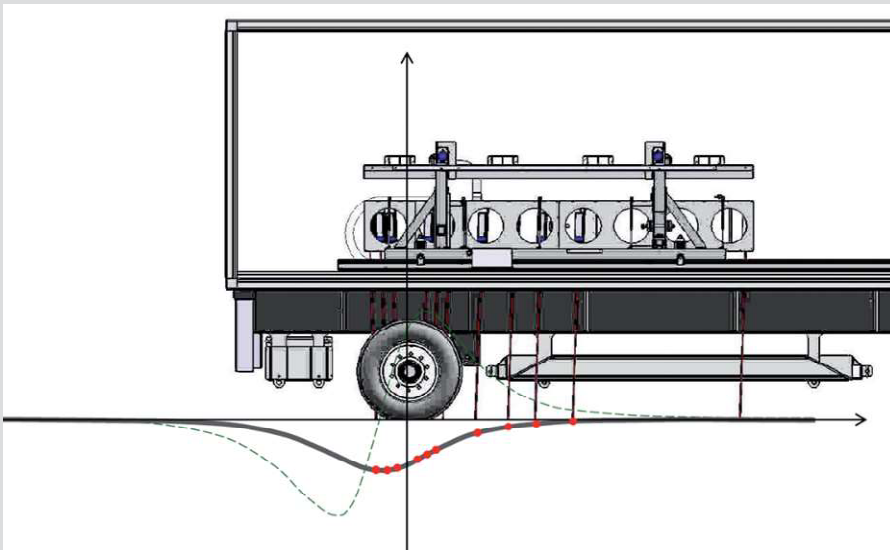


Bild 2: Qualitativer Verlauf der Deflexionsmulde (schwarze Linie) mit den Stützstellen der einzelnen Laser-Sensor-Positionen (rote Punkte) während der Überfahrt mit dem Pavement-Scanner [5]

und des Untergrunds bzw. Unterbaus [3]. Tragfähigkeitsbestimmungen werden seit den 1950er-Jahren mit stationär arbeitenden Tragfähigkeitsmesssystemen wie z. B. dem Benkelman-Balken oder dem Falling Weight Deflectometer (FWD) durchgeführt, die in der Regel durch Untersuchungen von Bohrkernen erweitert werden. Für eine netzweite Erfassung sind aufgrund des hohen Zeit- und Personalaufwands sowie der erforderlichen verkehrsrechtlichen Absicherung weder destruktive flächendeckende Bohrkern-

entnahmen noch der Einsatz zerstörungsfreier stationärer Tragfähigkeitsmesssysteme geeignet.

Die effizienteste, verkehrsstörungsärmste und auch hinsichtlich der Arbeitssicherheit vorteilhafte Tragfähigkeitsmessung erzielt das Traffic Speed Deflectometer (TSD) im Pavement-Scanner der Bergischen Universität Wuppertal, das im fließenden Verkehr bei Geschwindigkeiten von 5 bis 80 km/h kontinuierlich messen kann. Das TSD wird seit 2004 weltweit u. a. in Australien, Euro-

pa, den USA und China bei der netzweiten Zustandserfassung von Straßen eingesetzt. Obwohl es international bereits erfolgreich eingesetzt wird, stellt das TSD in Deutschland ein relativ junges Verfahren dar, sodass noch Bedarf hinsichtlich der Erfahrungssammlung – insbesondere im kommunalen Bereich – besteht (FGSV 2020).

Um diesen Bedarf zu decken, wurden im vorliegenden Pilotprojekt kommunale Hauptverkehrsstraßen im Gebiet der Stadt Wuppertal mit dem Pavement-Scanner über ein Jahr lang befahren. Ziel dieses Projekts war die Darstellung der Machbarkeit und Durchführbarkeit von Tragfähigkeitsmessungen im fließenden Verkehr auf kommunalen Hauptverkehrsstraßen unter Berücksichtigung der besonderen Randbedingungen (geringe Geschwindigkeiten, Unebenheiten durch Einbauten in Straßen etc.). Die Untersuchungsstrecke wurde in Abstimmung mit der Stadt Wuppertal ausgewählt, in und gegen Stationierungsrichtung sowie teilweise mehrfach befahren. Mehrfache Messungen der gleichen Strecke bei unterschiedlichen Bedingungen ermöglichen es, verschiedene Einflüsse der Fahrdynamik auf das Messsystem zu identifizieren und potenziell zu eliminieren. Für die Untersuchung der Veränderung des Tragverhaltens über den Verlauf mehrerer Jahreszeiten und bei verschiedenen Temperaturen wurden die Messungen an mehreren Messtagen zwischen August 2020 und Juni 2021 realisiert und summierten sich auf ca. 710 km Messstrecke (Bild 1).

2 Messsystem und Datenverarbeitung

Ziel der TSD-Messung ist die Bestimmung der Verformungsmulde (Deflexionsmulde), die bei Überfahrt eines Messpunkts mit einer definierten Achslast in der Fahrbahn entsteht. Dazu wird im Fall des Pavement-Scanners mit 11 Lasern in bestimmten Abständen zur Lastachse die relative Geschwindigkeit der Fahrbahnoberfläche zum Fahrzeug gemessen und daraus eine Funktion für die Deflexionsmulde hergeleitet (schwarze Linie in Bild 2). Aus der Deflexionsmulde werden im Anschluss verschiedene Kennwerte gebildet, mit denen sich die Tragfähigkeit vergleichen lässt. (Krupp 2016)

Die aussagekräftigste Information über die Deflexionsmulde liefert das Maximum der Verformung, das naturgemäß immer nah am Lasteinleitungspunkt gelegen ist. Als Annä-

herung an dieses Maximum wird die Verformung unterhalb der Lastachse herangezogen, die als D_0 -Wert bezeichnet wird (FGSV 2020).

Gemäß den Forschungsergebnissen von Čičković et al. (Čičković, Bald et al. 2020) ist der D_0 -Wert jedoch nicht so verlässlich wie der sogenannte „Surface Curvature Index“ (SCI), der die Differenz zwischen der Deflexion auf Höhe der Lastachse und der Deflexion in einem bestimmten Abstand davor bezeichnet. Der am meisten verwendete Wert ist der SCI_{300} , der aus der Differenz von D_0 und D_{300} (Verformung 300 mm vor der Lastachse) gebildet wird. Durch ihn lässt sich auf die Tragfähigkeit der gebundenen Schichten schließen. Neben dem SCI_{300} sind die Werte SCI_{200} ($D_0 - D_{200}$) und SCI_{SUB} ($D_{900} - D_{1500}$) von Interesse. Mithilfe des SCI_{SUB} kann auf die Tragfähigkeit des Untergrunds bzw. der ungebundenen Schichten geschlossen werden und der SCI_{200} gibt Auskunft über den Zustand der oberen Asphalt-schichten. Allgemein kann festgehalten werden, dass, je weiter die Deflexionen, aus denen sich der SCI zusammensetzt, von der

Lastachse entfernt sind, desto tiefer liegt die Schicht, über die er Aufschlüsse gibt (Beckedahl, Koppers et al. 2019).

Zur Untersuchung der ungebundenen Schichten können der Unterbauschadensindex BDI ($D_{300} - D_{600}$) und der Unterbaukrümmungsindex BCI ($D_{600} - D_{900}$) insbesondere in Verbindung mit dem SCI_{SUB} wertvolle Zusatzinformationen liefern (Lukanen, Stubstad et al. 2000).

Ein vielversprechendes Verfahren, das bisher

noch nicht bei TSD-Messungen verwendet wird, ist die Bewertung der Tragfähigkeit gemäß Tragfähigkeitszahl T_z . Bei der Tragfähigkeitszahl T_z werden der Krümmungsradius und die Verformung im Lasteinleitungspunkt in Relation gesetzt. Der Krümmungsradius R_0 ist der Radius des Kreises, der sich in die Verformungsmulde unterhalb der Lastachse passend einschmiegen würde. Er wird anhand eines Regressionsansatzes berechnet. Für T_z resultiert eine Kennzahl zwischen 0 und 10, die sich vergrößert, so-

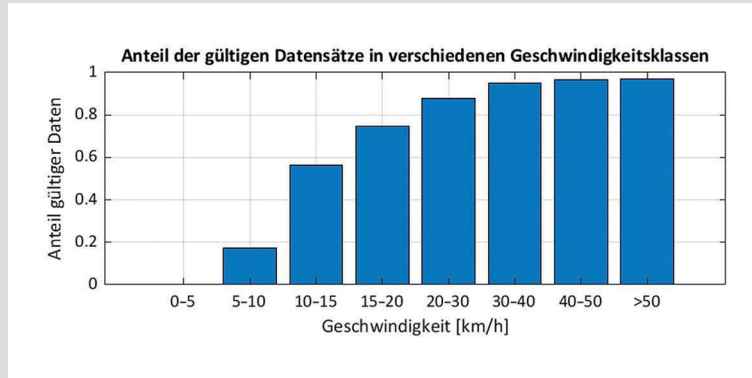


Bild 3: Anteil der gültigen Datensätze in verschiedenen Geschwindigkeitsklassen; Quelle: eigene Abbildung

VERKEHRSFLUSS STATT VERKEHRSFRUST?

Unsere intelligenten Verkehrstelematik-Lösungen sorgen für mehr Sicherheit bei der Umsetzung von Wechselverkehrsführungen.



I MASCHINEN- UND GERÄTEVERMIETUNG
II TEMPORÄRE INFRASTRUKTUR
III BAULOGISTIK

0800-18058888 oder zeppelin-rental.de

III WIR HABEN DAS ZEUG DAZU.

ZEPPELIN **Rental**
 STORE

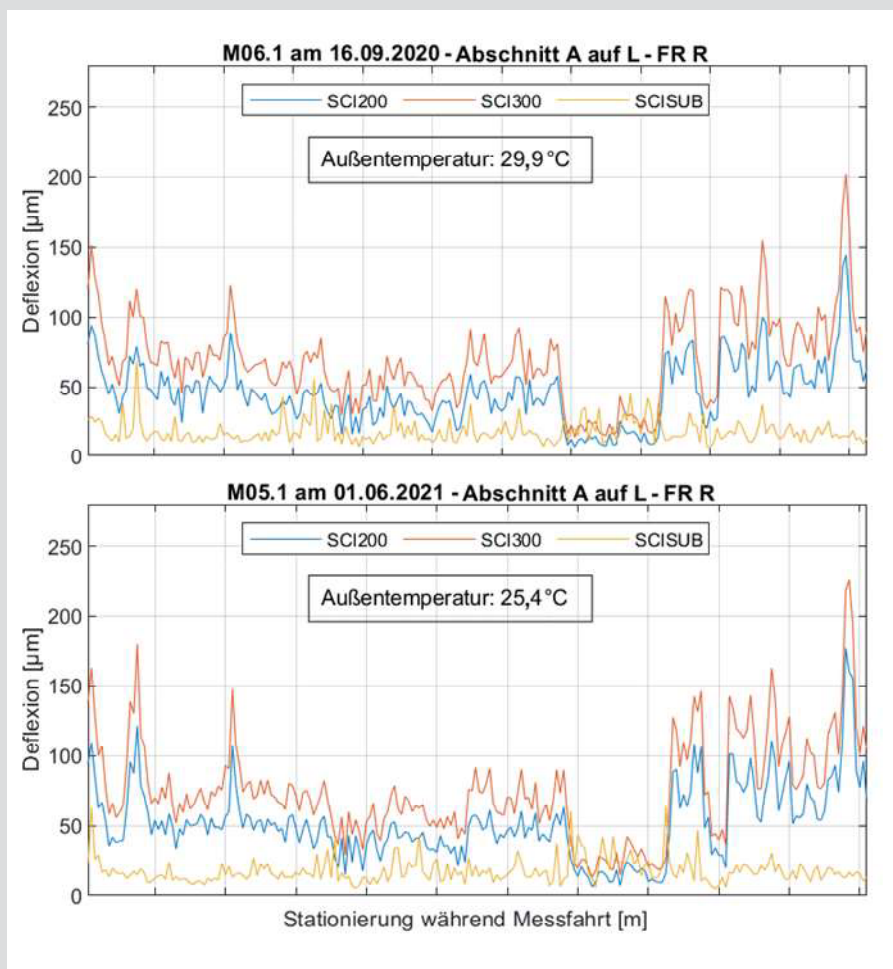


Bild 4: Messung auf Abschnitt „A“ einer Landstraße in Stationierungsrichtung am 16.9.2020 und 1.6.2021; Quelle: eigene Abbildung

bald sich die Krümmung und/oder Verformung unter der Lastachse verringert. Eine flache Deflexionsmulde resultiert folglich in einer großen Tragfähigkeitszahl und indiziert eine hohe Tragfähigkeit. Bei FWD-Messungen in Deutschland wird diese Kenngröße für die Bewertung des strukturellen Zustands des gesamten Straßenaufbaus verwendet (FGSV 2014).

3 Untersuchung möglicher Einflüsse der Fahrdynamik auf die Messergebnisse

Da der Pavement-Scanner nicht statisch, sondern im fließenden Verkehr auf bestehenden (oftmals gekrümmten und unebenen) Verkehrsflächenbefestigungen misst, entstehen variierende Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in verschiedene Richtungen, die Einfluss auf die Messergebnisse ausüben können.

Aufgrund der variierenden vertikalen Be-

schleunigungen des Messfahrzeugs – induziert durch Unebenheiten oder Kurven – entspricht die Belastung der Fahrbahn durch ein rollendes Rad nicht der statischen Radlast. Die für die Messung maßgebende rechte Radlast variiert punktuell in den einzelnen Messungen um mehrere Tonnen, obwohl sich die statische Radlast von 5 Tonnen nicht verändert. Um die Einflüsse der Fahrdynamik auf die Belastung bestimmen und später (bei Bedarf) eliminieren zu können, sind Dehnungsmessstreifen am Pavement-Scanner auf beiden Seiten der Lastachse angebracht. Aus deren Messdaten kann unter Beachtung der fahrzeugspezifischen und klimatischen Randbedingungen die jeweils aktuelle dynamische Radlast bestimmt werden. Wenn die Einflüsse der dynamischen Belastung begrenzt werden sollen, können die Messdaten auf eine Regelbelastung normiert werden (FGSV 2014). Alle Messdaten im vorliegenden Projekt werden nach dem Export vor der weiteren Auswertung normiert. Die Regelbelastung

ist dabei das arithmetische Mittel der rechten Radlast aller Datensätze.

Auch die Messgeschwindigkeit kann einen Einfluss auf die Messergebnisse ausüben. Geringe Messgeschwindigkeiten und Standzeiten sind insbesondere im kommunalen Bereich aufgrund von Knotenpunkten und Störungen im Verkehrsfluss nicht zu vermeiden. Da die Belastungsdauer auf die Reaktion des Asphalts Einfluss nimmt (Mollenhauer 2008) und bei geringen Geschwindigkeiten Einflüsse aus der dynamischen Belastung verschwinden, Einflüsse aus Beschleunigungs- und Bremsvorgängen dafür an Bedeutung gewinnen (Schäfer 2009), ist eine Veränderung der Tragfähigkeitsmessdaten bei sehr geringen Messgeschwindigkeiten zu erwarten.

Standardmäßig werden von der Verarbeitungssoftware daher Datensätze mit Geschwindigkeiten von weniger als 5 km/h als nicht verwendbar ausgeschlossen. Vom Hersteller wird eine konstante Geschwindigkeit von über 40 km/h bzw. von 80 km/h auf Autobahnen empfohlen. Im innerstädtischen Bereich sind konstante Geschwindigkeiten nur über kurze Strecken zu erreichen und Geschwindigkeiten von unter 40 km/h sind keine Seltenheit. Daher wird im Folgenden untersucht, inwiefern Geschwindigkeiten unter 40 km/h verwendbar sind.

Die Verarbeitungssoftware des Herstellers schließt Daten automatisch aus, aus denen sich unplausible Deflexionsmulden ergeben und gibt stattdessen Datenlücken aus. Aus den Messdaten des vorliegenden Projekts kann Bild 3 abgeleitet werden, in dem der Anteil der gültigen Datensätze (ohne Datenlücken) an den gesamten gemessenen Daten bei verschiedenen Messgeschwindigkeiten dargestellt ist.

Der prozentuale Anteil der gültigen Datensätze an den gesamten Datensätzen steigt mit zunehmender Messgeschwindigkeit, wobei er ab Geschwindigkeiten von 30 km/h bereits bei über 95 % liegt. Insgesamt kann festgehalten werden, dass ab 15 km/h drei Viertel der Messwerte verwendet werden können und somit eine zufriedenstellende Anzahl gültiger Daten schon bei diesen Messgeschwindigkeiten zur Verfügung steht. Daten, die bei Geschwindigkeiten von weniger als 15 km/h aufgenommen wurden, machen jedoch mit 2.697 von 70.957 Datensätzen (3,8 %) nur einen geringen Teil der Messdaten aus Wuppertal aus.

4 Wiederholbarkeit der Messungen

Im Arbeitspapier zur Tragfähigkeit der FGSV wird festgestellt, dass das TSD „sehr gut für ein netzweites Monitoring geeignet ist“ (FGSV 2020). Zusätzlich belegt eine Vielzahl von Studien, sowohl in Deutschland (Čičković, Bald et al. 2020; Beckedahl, Koppers et al. 2019) als auch international (Wix, Murmane et al. 2016; Rasmussen, Aagaard et al. 2008; FHWA 2016) die Reproduzier- und Wiederholbarkeit von TSD-Messungen – auch bei variierenden Randbedingungen. Der visuelle Vergleich der Messergebnisse im vorliegenden Pilotprojekt bestätigt dies. Beispielhaft zeigt Bild 4 zwei Messungen desselben Abschnittes („A“) einer Landesstraße in Stationierungsrichtung, wobei die SCI-Werte jeweils in 10-m-Intervallen dargestellt sind. Die Messungen fanden in einem Abstand von neun Monaten statt und die Wiederholbarkeit ist auch nach mehreren Jahreszeiten gegeben.

Dass das TSD auch bei Extremtemperaturen zuverlässige Messergebnisse erbringt, verdeutlicht beispielhaft Bild 5. Das obere Diagramm zeigt die SCI-Werte einer Messung eines Abschnittes („B“) einer Bundesstraße im Juni 2021 bei Normaltemperaturen und das untere Diagramm eine zweite Messung auf dem gleichen Abschnitt einige Tage später bei ungewöhnlicher Hitze. Trotz verschiedener Randbedingungen sind die lokalen Maxima und Minima der Tragfähigkeit des Abschnitts deutlich zu erkennen.

5 Bewertung der Tragfähigkeit

Für die Bewertung der Tragfähigkeit aus den Messdaten des TSD gibt es zurzeit noch keinen in Deutschland gültigen Ansatz (FGSV 2020). In anderen Ländern werden verschiedene aus Erfahrungswerten hergeleitete, an das eigene Land angepasste Verfahren angewendet. Dadurch, dass das Klima, die Bauweisen und die Belastungen in Deutschland von denen anderer Länder abweichen, kann das Bewertungssystem eines anderen Landes jedoch nicht für die Bewertung der Tragfähigkeit auf den Verkehrsflächen in Deutschland empfohlen werden. Ein Vergleich der Bewertungsverfahren aus Großbritannien, Polen, Irland und den USA bestätigt dies für die gemessenen Tragfähigkeitskenngrößen im Rahmen des vorliegenden Pilotprojekts.

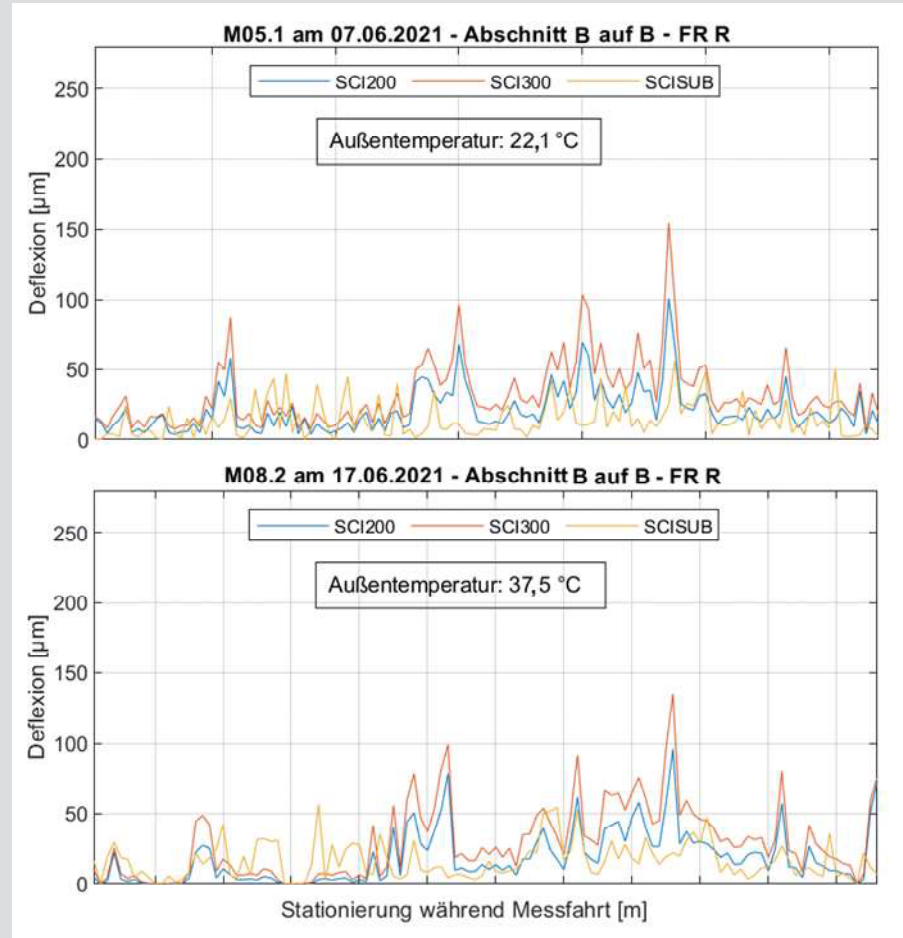


Bild 5: Messungen auf Abschnitt „B“ einer Bundesstraße in Stationierungsrichtung bei 22,1 °C und 37,5 °C; Quelle: eigene Abbildung

SCI ₃₀₀ [µm]	Bundesstraßen	Landesstraßen	Kreisstraßen
Beste 5 %	< 5,64	< 13,16	< 12,33
Beste 25 %	< 17,89	< 25,48	< 25,29
Median	30,69	41,79	45,05
Schlechteste 25 %	> 54,46	> 70,41	> 80,17
Schlechteste 5 %	> 114,80	> 139,64	> 145,36

Tabelle 1: Bewertung der Messdaten anhand des SCI₃₀₀ getrennt je Straßenklasse

Im Arbeitspapier zur Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen wird daher empfohlen, die Tragfähigkeitskennwerte gemäß Häufigkeitsverteilungen in Klassen einzuteilen und anhand dieser Klassen zu bewerten (FGSV 2020). Für die Messdaten im vorliegenden Projekt wird folglich ein lokales Bewertungsschema herangezogen, welches anhand der Quartile (25 %, 50 % und 75 %) sowie der 5-%- und 95-%-Quantile aller gültigen Datensätze für die einzelnen Kennwerte gebildet wird (Tabelle 1 und Tabelle 2).

Wichtig bei der Bildung von Klassen und der anschließenden Bewertung der Tragfä-

higkeit ist, dass dabei zwischen verschiedenen Aufbauten bzw. Belastungsklassen (Bk) unterschieden wird. So wird der Aufbau einer Bk32 wegen der dickeren Schichten und höherwertigen Materialien natürlich eine geringere Deflexion als der einer Bk3,2 aufweisen. Aufgrund der verschiedenen Anforderungen an die beiden Belastungsklassen kann aber dennoch bei beiden Verkehrsflächenbefestigungen im gleichen Maße eine Sanierungsmaßnahme erforderlich sein.

Da im vorliegenden Projekt keine Informationen über Aufbauten und Belastungsklassen vorliegen, wird die Straßenklasse ersatz-

SCI _{SUB} [µm]	Bundesstraßen	Landesstraßen	Kreisstraßen
Beste 5 %	< 1,66	< 2,73	< 1,84
Beste 25 %	< 6,28	< 7,91	< 8,25
Median	13,32	15,16	15,90
Schlechteste 25 %	> 24,24	> 26,13	> 26,28
Schlechteste 5 %	> 44,49	> 46,34	> 46,52

Tabelle 2: Bewertung der Messdaten anhand des SCI_{SUB} getrennt je Straßenklasse

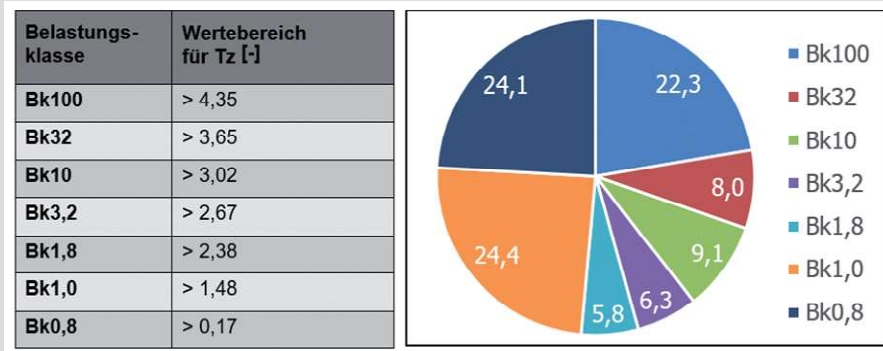


Bild 6: Ergebnisse für Tz im klassifizierten Straßennetz des Untersuchungsgebiets, Bewertung anhand Tragfähigkeitszahl; Quelle: eigene Abbildung

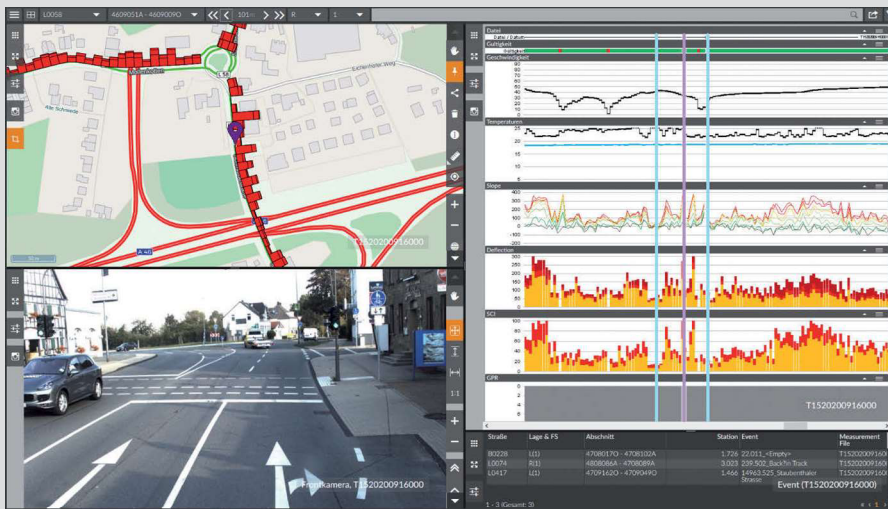


Bild 7: Darstellung der Messdaten auf der Internetplattform OnKo3 der Fa. Heller IG

Abs.	SCI200 [µm]	SCI300 [µm]	SCISUB [µm]	BCI [µm]	BDI [µm]	R0 [m]	Tz [-]
A_B	5,53	8,93	7,59	5,31	7,90	51474,12	55,23
B_B	56,40	86,82	25,25	34,72	67,39	406,70	1,44
A_L	14,73	19,88	8,22	8,22	12,88	1860,36	6,10
B_L	80,95	125,86	31,02	44,36	93,42	309,41	1,07
A_K	17,86	28,21	16,92	18,57	28,24	1351,65	4,20
B_K	73,96	111,21	26,40	36,34	75,36	339,22	1,27

Tabelle 3: Tragfähigkeitswerte auf Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen; exemplarisch je ein Abschnitt mit hoher und ein Abschnitt mit niedriger Tragfähigkeit

weise für eine Einteilung der Messdaten verwendet. Je nach Verkehrsstärke und SV-Anteil entsprechen Autobahnen erfah-

rungsgemäß in etwa Bk32–Bk100, Bundesstraßen Bk10–Bk100, Landesstraßen Bk3,2–Bk32 und Kreisstraßen Bk1,8–Bk10.

Für die vorliegenden Messdaten empfiehlt sich die Bewertung der Tragfähigkeit anhand des SCI₃₀₀ und des SCI_{SUB}, denn daraus können Rückschlüsse auf den Zustand des Asphalts und der Schichten ohne Bindemittel gezogen werden. Für diese Kennwerte ergeben sich gemäß dem oben erwähnten lokalen Bewertungsschema die in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellten Grenzwerte.

Die Tabellen 1 und 2 zeigen u. a., dass die Unterteilung hinsichtlich Beanspruchung und Aufbau von zentraler Bedeutung für die Auswertung ist. So befindet man sich bei einem SCI₃₀₀ von 40 µm bei Bundesstraßen in der schlechteren Hälfte und bei Landesstraßen in der besseren Hälfte der Daten.

Zusätzlich zu den SCI-Werten sollte die Tragfähigkeitszahl Tz als Größe für die absolute Deflexion berücksichtigt werden. Tz eignet sich insbesondere deshalb für die Bewertung, da hier bereits glaubwürdige Anhaltswerte für die Anforderungen einzelner Belastungsklassen existieren (Bild 6 links, FGSV 2014). Die in Bild 6 dargestellten Ergebnisse resultieren bei der Bewertung der Tragfähigkeit mittels Tz für die gemessenen Straßenabschnitte.

Diese Auswertung der Tragfähigkeitsmessung zeigt deutlich auf, dass eine kontinuierliche empirische Überwachung der Straßenqualität vom Streckennetz möglich und eine wirtschaftlich und technisch sinnvolle Erhaltungsstrategie auf Grundlage möglichst objektiver Gesichtspunkte realisierbar ist. Außerdem können durch turnusmäßig durchgeführte Tragfähigkeitsmessungen die Entwicklung der Straßensubstanz auf Netzebene vergleichend bestimmt und darauf aufbauend Erhaltungsabschnitte, die mit gleichen Erhaltungsverfahren zu sanieren sind, festgelegt werden.

Im vorliegenden Projekt werden die Tragfähigkeitskennwerte daher für jeden Netzknotenabschnitt gemittelt und farblich je nach abgeleiteter Klasse hinterlegt. Eine rote Hinterlegung signalisiert eine niedrige, eine grüne Hinterlegung eine hohe Tragfähigkeit. Insbesondere in Verbindung mit den ZEB-Daten stellt diese Ermittlung der Tragfähigkeit ein wertvolles Werkzeug bei Entscheidungen für die Erhaltung dar. Bild 7 kann entnommen werden, wie die aufbereiteten Daten der verschiedenen Messsysteme des Pavement-Scanners auf der Internetplattform OnKo3 dargestellt werden.



Bild 8: Beispielfotos der Frontkamera auf Abschnitten A_B (links) und B_B (rechts); Quelle: eigene Fotos

6 Beispiele zur Bewertung der einzelnen Straßenklassen

Nachfolgend wird für die verschiedenen untersuchten Straßenklassen – Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen – exemplarisch jeweils ein Abschnitt mit hoher Tragfähigkeit und ein Abschnitt mit geringerer Tragfähigkeit untersucht.

Dabei wurde eine hochbelastete Bundesstraße, die als wichtigste Verkehrsader der Stadt gilt, häufig mit dem TSD befahren, weil diese historisch gewachsene Straße für eine tiefer gehende Untersuchung gut geeignet ist. Beispielhaft zeigt ein gewählter Abschnitt A_B der Bundesstraße in Fahrtrichtung der Stationierung sehr zufriedenstellende Tragfähigkeitswerte (Tabelle 3). Der

Tz-Wert ist für Bundesstraßen überdurchschnittlich hoch und genügt problemlos den höchsten Anforderungen. Schäden sind anhand der Bilder des Pavement-Scanners nur an ein paar Stellen erkennbar, die sich jedoch nicht in den Tragfähigkeitsdaten widerspiegeln, sodass es sich vermutlich nur um Oberflächenschäden handelt. Die Tragfähigkeitskennwerte auf einem Abschnitt B_B der Bundesstraße in Stationierungsrichtung fallen dagegen schlechter aus. Die Tragfähigkeitszahl entspricht mit 1,44 nur der Anforderung an die Belastungsklasse 0,8 und damit gehört dieser Abschnitt zum schlechtesten Viertel der Werte auf den Bundesstraßen (Tabelle 3).

Als Beispiel für Landesstraßen werden zwei Abschnitte verschiedener Landesstraßen in

Fahrtrichtung gegen Stationierungsrichtung miteinander verglichen. Abschnitt A_L weist hinsichtlich der Tragfähigkeit günstige Werte auf, wohingegen der Abschnitt B_L bei allen Kenngrößen schlecht abschneidet (Tabelle 3). Bei Letzterem lassen sich sowohl ein beschädigtes Asphaltpaket als auch wenig tragfähige Schichten ohne Bindemittel bzw. ein nicht geeigneter Untergrund vermuten. Während die Tragfähigkeitszahl von Abschnitt A_L den Anforderungen an höhere Belastungsklassen genügt, muss die Tragfähigkeit von Abschnitt B_L in die Bk0,8 eingeordnet werden.

Bild 9 stellt zwei Fotos auf den Abschnitten gegenüber. Es ist ersichtlich, dass zumindest die Asphaltdecke auf Abschnitt A_L jünger ist als die des Abschnitts B_L. Die vielen

VÖLKEL-Navigator

Das herstellerunabhängige Assistenzsystem für den digitalen Straßenbau

VÖLKEL-Cloud

FDVK

LOGISTIK

PAVE

FDVK-A

Neu: VÖLKEL Compaction Sensor mit E_{VT} -Wert in MN/m^2

nachrüstbar für Ihre Maschine • unabhängig vom Walzentyp/
- Gewicht • fahrtrichtungsunabhängig • amplitudenunabhängig

VÖLKEL
MIKROELEKTRONIK

ERFOLG
EINFACH
EINBAUEN

Kraft-Weg Diagramm

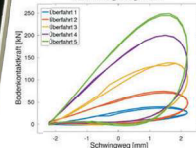




Bild 9: Straße mit gutem Ergebnis (links, Abschnitt A) und schlechtem Ergebnis (rechts, Abschnitt B) im Vergleich, Quelle: eigene Fotos

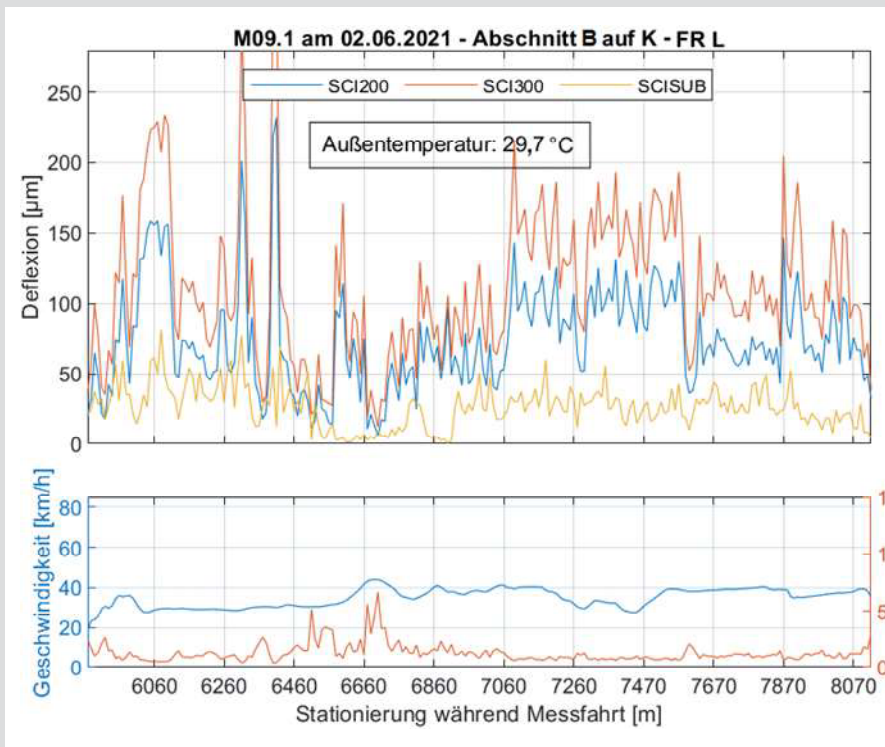


Bild 10: Tragfähigkeitskennwerte SCI, Tz und Messgeschwindigkeit auf Abschnitt B_K, Quelle: eigene Abbildung

erkennbaren Aufgrabungen und Flickstellen sowie die deutliche Spurrinnenbildung auf Abschnitt B_L bestätigen die ermittelte geringere Tragfähigkeit dieses Abschnitts.

Als Beispiel für Kreisstraßen werden zwei Abschnitte verschiedener Kreisstraßen in verschiedene Fahrtrichtungen miteinander verglichen. Der gewählte Abschnitt A_K verfügt über sehr zufriedenstellende Tragfähigkeitswerte (Tabelle 3). Mit einer Tragfähigkeitszahl von 4,2 genügt der Abschnitt hohen Ansprüchen an die Tragfähigkeit. Der Abschnitt B_K verfügt dagegen über eine sehr niedrige Tragfähigkeit. Mit einer Tragfähigkeitszahl von 1,27 genügt der Ab-

schnitt lediglich den Anforderungen an die Belastungsklasse 0,8. Auch die übrigen Tragfähigkeitswerte unterstreichen die niedrige Qualität dieses Abschnitts (Bild 10).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Für das Pilotprojekt mit der Stadt Wuppertal wurden im Zeitraum eines Jahres Tragfähigkeitsdaten von insgesamt über 700 km Ortsdurchfahrten (Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen) erfasst und ausgewertet. Die vorgestellten Tragfähigkeitskennwerte geben einen aussagekräftigen

Überblick über die Tragfähigkeit des Straßenaufbaus und lassen eine Schätzung der Tiefe möglicher Schädigungen oder Schwachstellen zu.

Der Empfehlung des Arbeitspapiers zur Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen folgend werden aus der Häufigkeitsverteilung der vorliegenden Tragfähigkeitskenngrößen aller Datensätze Klassengrenzen (5-%-, 25-%-, 50-%-, 75-%- und 95-%-Quantile) je Straßenklasse gebildet.

Die Messstrecken wurden bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, Temperaturen und über die Dauer eines Jahres befahren. Es zeigt sich, dass ab Geschwindigkeiten von 15 km/h plausible und gültige Kennwerte resultieren. Dynamische Achslasten werden mittels Normierungsfaktor berücksichtigt. Es kann zudem festgestellt werden, dass auch nach dem Fortschreiten mehrerer Jahreszeiten und bei verschiedenen Temperaturen eine hohe Wiederholgenauigkeit der Messungen besteht.

Exemplarisch wird im vorliegenden Bericht jeweils ein Beispiel einer guten und einer schlechten Tragfähigkeit für Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen gegeben. Es ist festzuhalten, dass insbesondere Stellen mit hohen SCI_{SUB}-Werten, also einer niedrigeren Tragfähigkeit der ungebundenen Schichten oder des Untergrunds, durch oberflächliche Betrachtung meist nicht auszumachen sind. Bereiche mit einer niedrigen Tragfähigkeit der gebundenen Schichten fallen öfter – jedoch bei Weitem nicht immer – durch oberflächliche Schäden auf. Dagegen verfügen Bereiche mit vielfältigen und ausgeprägten oberflächlichen Schadensbildern oft über eine zufriedenstellende Tragfähigkeit. Aus diesen Beobachtungen lässt

sich schlussfolgern, welche große Bedeutung einer gemeinsamen Untersuchung von Oberflächeneigenschaften und Tragfähigkeit bei der Zustandsermittlung von Straßen zukommt. Nur bei einer direkten Beurteilung der strukturellen Substanz durch die Ermittlung der Tragfähigkeit kann die jeweils bautechnisch und wirtschaftlich sinnvollste Erhaltungsmaßnahme gefunden und somit ein erfolgreiches Erhaltungsmanagement betrieben werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mithilfe der Tragfähigkeit visuell nicht feststellbare Schwachstellen in der Verkehrsflächenbefestigung identifiziert und bei frühzeitiger Einleitung der entsprechenden Maßnahmen die strukturellen Straßenzustände zielgerichtet verbessert werden können.

Literaturverzeichnis

Beckedahl, H. J.; Koppers, S.; Schrödter, T.; Balck, H.; Skakuj, M.: Vergleich verschiedener kontinuierlich messender Systeme zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Verkehrsflächen aus Asphalt auf Netzebene: FE_04-0276-2013-EGB. Schlussbericht. 2019. – Schlussbericht

Čičković, M.; Bald, J. S.; Middendorf, M.:

Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen: FE 04.0318/2018/MRB (2020)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.: Arbeitspapier Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen: Teil C 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung – Asphaltbauweise. 2014 (FGSV W2 – Wissensdokumente FGSV 433 C 2.1)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.: Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen: Teil C 5: Traffic Speed Deflectometer (TSD): Auswertung und Bewertung – Asphaltbauweise. 2020 (FGSV W2 – Wissensdokumente FGSV 433 C 5). FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.: Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 – Erhaltungsplanung – Reihe S: Substanzwert (Bestand). 2019. FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.: Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen: E EMI 2012. Ausgabe 2012. Köln, 2012 (FGSV R2 – Regelwerke FGSV 487). FGSV Verlag, Köln

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen: ZTV ZEB-StB. Ausgabe 2006, korrigierter und geänderter Nachdruck 2018.

Köln: FGSV Verlag GmbH, 2018 (FGSV 489). FGSV Verlag, Köln

Krarrup, J.: TSD Basics, and latest software update. Prag, 2016

Lukanen, E. O.; Stubstad, R.; Briggs, R.: Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement. 2000

Mollenhauer, K.: Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche: Dissertation (2008). URL <https://d-nb.info/990703789/34> – Überprüfungsdatum 11.1.2022

Rasmussen, S.; Aagaard, L.; Baltzer, S.; Krarrup, J.: A comparison of two years of network level measurements with the Traffic Speed Deflectometer. 2008

Schäfer, F.: Asphaltbeanspruchung aus Beschleunigungsvorgängen: Dissertation. URL <http://docplayer.org/207628925-Asphaltbeanspruchung-aus-beschleunigungsvorgaengen.html>. – Aktualisierungsdatum: 11.1.2022 – Überprüfungsdatum 11.1.2022

U. S. Department of Transportation – Federal Highway Administration: Pavement Structural Evaluation at the Network Level: Final Report: Pavement Structural Evaluation at the Network Level: Final Report. 2016

Wix, R.; Murnane, C.; Moffatt, M.: Experience Gained Investigating, Acquiring and Operating the First Traffic Speed Deflectometer in Australia. 2016



**ZWEI
SCHRITTE
VORAUSS**



Gemeinsam zwei Schritte voraus - mit innovativen Produkten zur ökologischen Bauweise.

Für mehr Nachhaltigkeit im Bau ist es unser Anspruch, heute bereits an morgen zu denken. Aus diesem Grund forschen wir intensiv an Lösungen für den Verkehrswegebau mit innovativen Portlandkomposit- und Hochfenzementen. Erste Ergebnisse zeigen sich bereits heute in umfangreichen CO₂-Einsparungen.

Weitere Informationen zu unseren Nachhaltigkeitsfortschritten finden Sie auf www.schwenk.de.



SCHWENK Zement GmbH & Co. KG
Hindenburgring 15 | 89077 Ulm | www.schwenk.de