

Vergleich verschiedener kontinuierlich messender Systeme zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Verkehrsflächen aus Asphalt auf Netzebene

FA 4.276

Forschungsstellen: Bergische Universität Wuppertal, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Straßenentwurf und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. H. J. Beckedahl)

Heller Ingenieurgesellschaft mbH, Darmstadt

Bearbeiter: Beckedahl, H. J. / Heller, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Februar 2018

1 Zielsetzung

Kern der systematischen Straßenerhaltung in Deutschland ist die Erfassung und Bewertung der Fahrbahnoberflächeneigenschaften (ZEB) mit schnellfahrenden Messsystemen, die allerdings keine hinreichenden Rückschlüsse auf die strukturelle Substanz zulassen. Daher wird im PMS ergänzend der "Substanzwert Bestand" aus Aufbaudaten, Angaben zum Alter der Verkehrsfläche und der Verkehrsbeanspruchung ermittelt. Da die Parameter "Substanzwert Oberfläche" und "Substanzwert Bestand" keine fundierten Hinweise auf Strukturschäden einer Konstruktion und somit auch keine Frühindikatoren für Strukturveränderungen liefern, ist eine Bewertung der vorhandenen Substanz nur eingeschränkt möglich.

Zur adäquaten Ermittlung des grundhaften Erneuerungsbedarfs ist eine Beschreibung des strukturellen Zustands tieferliegender Schichten notwendig, die aus Informationen zur Tragfähigkeit gewonnen werden können. Um derartige Informationen auf der Netzebene zur Verfügung stellen zu können, ist der Einsatz von kontinuierlich messenden schnellfahrenden Systemen notwendig, die vernachlässigbare Verkehrsbeeinträchtigung während einer Messung verursachen. Ziel des Forschungsprojekts soll die Bewertung der Kurz- und Langzeitwiederholbarkeit sowie die Untersuchung der Aussagekraft und möglicher Auswertelgorithmen zur Bewertung von Tragfähigkeitsmessungen mit schnellfahrenden Systemen für Straßenkonstruktionen mit verschiedenen Aufbauten im deutschen Straßennetz sein.

Ziel des FE-Vorhabens ist es, Erfahrungen für den netzweiten Einsatz des Traffic Speed Deflectometers (TSD) zur Bestimmung des strukturellen Zustands des klassifizierten Straßennetzes der Bundesrepublik Deutschland zu sammeln.

2 Untersuchungsmethodik

Zu Beginn des FE-Vorhabens sind die Recherchen zu den Einflussfaktoren, die die Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung betreffen, dargestellt, um darauf abgestimmt die Messstrecken und TSD-Messungen auszuwählen und zu planen. Die Streckenverfügbarkeit über die Projektlaufzeit und die Qualität der Dokumentation waren wesentliche Kriterien bei der Streckenauswahl. Vom Auftraggeber wurden die Erprobungsstrecke B 267 in Brandenburg und die Versuchsstrecke B 35 in Baden-

Württemberg vorgeschlagen und in das Untersuchungsprogramm integriert. Die Messstrecke in Bayern beinhaltet Streckenteile, die bereits 2012 mit einem TSD und anderen Messsystemen (Curviometro, FWD) gemessen wurden. Die Strecke Nordrhein-Westfalen beinhaltete BAB-, B- und L-Straßenklassen. Die Messstrecken wurden als Rundkurs mit minimierten Zeitverlusten angelegt.

Die Systematik der Strecken- und Messdatenbezeichnung beruht auf dem Ort der Messung (hier: Bundesland, BB Brandenburg, BW Baden-Württemberg, BY Bayern und NW Nordrhein-Westfalen), dem zur Verfügung stehenden Messgerät (T4), entsprechend dem TSD4 des Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) aus Polen, der laufenden Nummerierung der Messkampagne, K1 (Frühjahrskampagne), K2 (Herbstkampagne), der fortlaufend nummerierten Messung (M) und des fortlaufend nummerierten Auswerteabschnitts (A). Die laufende Nummerierung wird dabei durch die vorgenannten Buchstaben der Messkampagne, der Messung und des Auswerteabschnitts ergänzt. Zur Verdeutlichung folgt ein Beispiel:

BB.T4.K1.M3.A2: die Bezeichnung identifiziert die Messdaten der Messstrecke in Brandenburg (BB), die mit dem TSD4 (T4) während der ersten Messkampagne (K1) in der dritten Messung (M3) auf dem zweiten Abschnitt (A2) gemessen wurden.

Aufgrund der Witterungsabhängigkeit des Messsystems TSD wurden die Messtermine grob vorgeplant und erst kurzfristig vor dem Messbeginn festgelegt. Das Messsystem kann nur auf trockener Fahrbahn zuverlässig und fehlerfrei messen, da die aufgewirbelte Gischt bei regennasser Fahrbahn die Lasermessungen beeinflussen würde.

Die erste Messkampagne (K1) konnte planmäßig auf allen vier Messstrecken (BB, BW, BY, NW) durchgeführt werden. Am ersten Tag wurde die Messstrecke in Brandenburg (BB) befahren. Hier wurden über den ganzen Tag verteilt (zwischen 8 und 19 Uhr) acht Messungen (BB.T4.K1.M1-M8) durchgeführt. Mit den stündlich aufgezeichneten Daten der Temperatursensoren in der Erprobungsstrecke und den TSD-Daten (BB.T4.K1.M1-M8.A1) können Tagesganglinien der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur im Straßenaufbau analysiert werden.

Die Messungen in Bayern (BY.T4.K1.M1-M3) wurden am zweiten und dritten Messtag durchgeführt. Hierbei wurde ein Rundkurs befahren, der die im Jahr 2012 bereits gemessenen Strecken (B 26 und B 303) enthält.

In Baden-Württemberg wurden fünf Messungen (BW.T4.K1.M1-M5) auf der Messstrecke durchgeführt. Die Messstrecke enthält die Versuchsstrecke (A 1) der BAST; hier wurden TSD-Messungen (BW.T4.K1.M1, M4-M5.A1) mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten realisiert. Die Messungen M1, M4 und M5 wurden mit ca. 80 km/h gemessen, die Messungen M2 und M3 hingegen wurden mit reduzierten Fahrgeschwindigkeiten von ca. 60 km/h und ca. 40 km/h durchgeführt. Geringere Fahrgeschwindigkeiten waren nicht geplant und hätten aufgrund des Verkehrsaufkommens ohne zusätzliche Sicherung nicht realisiert werden können.

Die Messstrecke in Nordrhein-Westfalen wurde am vierten und fünften Messtag jeweils dreimal gemessen. Die Messungen am vierten Tag (NW.T4.K1.M1-M3) fanden am Nachmittag zwischen 15 und 18 Uhr statt, die Messungen am darauffolgenden Tag wurden zwischen 8 und 11 Uhr durchgeführt.

Die Witterungsbedingungen während der ersten Messkampagne waren an allen Messstrecken ähnlich, leichte Bewölkung und zeitweise sonnig.

Die zweite Messkampagne war im September 2016 geplant, da aufgrund der saisonal unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalte in den ungebundenen Schichten und dem Untergrund hier die höchsten Steifigkeiten zu erwarten sind. Aufgrund der schlechten Witterungsbedingungen im September 2016 wurde die zweite Messkampagne immer wieder verschoben und trotz einer nicht stabilen Wetterlage schließlich Anfang Oktober durchgeführt.

Am ersten Messtag wurde die Messstrecke in Nordrhein-Westfalen bei guter Witterung gemessen. Hier wurden wie in der ersten Messkampagne sechs Messungen (NW.T4.K2.M1-M6) durchgeführt.

Aufgrund der schlechten Witterungsbedingungen in und den Wettervorhersagen für Süddeutschland, wurde entschieden, direkt in den Osten nach Brandenburg zu fahren. Jedoch herrschten hier am zweiten und dritten Messtag ebenfalls keine Witterungsbedingungen, die eine Messung ermöglicht hätten. Am vierten und fünften Messtag konnten dann noch fünf Messungen (BB.T4.K2.M1-M5) realisiert werden.

Die Messstrecken in Bayern und Baden-Württemberg konnten aufgrund der Witterungsbedingungen in der zweiten Messkampagne nicht gemessen werden.

Insgesamt wurden in zwei Messkampagnen auf vier verschiedenen Strecken in unterschiedlichen Regionen Deutschlands TSD-Daten im Umfang von 2 250 km gemessen, das entspricht ca. 225 000 Datensätzen beziehungsweise 10-m-Abschnitten.

Die Berücksichtigung der Einflussfaktoren erfolgte an verschiedenen Messstrecken beziehungsweise Messstreckenteilen. So bieten die in der Erprobungsstrecke in Brandenburg verbauten Temperatursensoren eine gute Möglichkeit, die Temperatur im Oberbau gezielt in die Bewertung und Analyse der Messdaten mit einfließen zu lassen (Temperaturtagesganglinie).

Aufgrund der geringen Länge der Messstrecke in Baden-Württemberg konnten hier innerhalb kürzester Zeit Wiederholungsmessungen durchgeführt werden und damit Einflüsse aus Temperaturänderungen im Oberbau minimiert werden und damit unterschiedliche TSD-Messgeschwindigkeiten untersucht werden. Zur Berücksichtigung saisonaler Einflüsse auf die Tragfähigkeit wurden Messkampagnen im Frühjahr und im Herbst angesetzt.

Die Analyse der Messdaten erfolgte in einem allgemeinen statistischen Teil und einem die Einflussfaktoren bewertenden Teil. In dem statistischen Teil wurden Methoden zur Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision auf die TSD-Daten angewendet. Die Analyse der Messdaten hinsichtlich der recherchierten Einflussfaktoren wird anhand des Vergleichs geeigneter Tragfähigkeitskenngrößen erfolgen. Durch die gezielte Auswahl von Messungen beziehungsweise Messreihen (zum Bei-

spiel Tagesganglinie) oder das gezielte Eliminieren von möglichen Einflussfaktoren sollen die Einflüsse auf die Messergebnisse separat dargestellt werden.

Zur allgemeinen statistischen Bewertung der Daten wurden bekannte Verfahren angewendet. Ziel der statistischen Bewertung der Daten ist eine Aussage über die Präzision des Verfahrens. Ausreißeranalysen sind den Auswertungen vorangestellt.

Mit der Bestimmung der Präzision sollen Streuungen in den Messwerten identifiziert werden, die auf unvermeidliche Zufallsabweichungen zurückzuführen sind. Zur Ermittlung der Präzision eines Messverfahrens werden üblicherweise mehrere Messungen beziehungsweise Ringversuche (an denen mehrere Laboratorien teilnehmen) durchgeführt.

Für dieses Forschungsvorhaben wurde grundsätzlich versucht, eine entsprechende Vergleichbarkeit der Messungen herzustellen. Hinsichtlich des Faktors Personal (hier: Fahrer) ist sichergestellt, dass die Einflüsse soweit wie möglich minimiert wurden. Für alle Messungen (Frühjahr und Herbst) ist derselbe Fahrer eingesetzt worden.

Sowohl bei der Frühjahrskampagne als auch bei der Herbstkampagne wurde das polnische TSD (TSD4) eingesetzt. Abweichungen ergeben sich allerdings durch die erforderlichen Kalibrierungen vor den Messkampagnen. Bauliche oder technische Änderungen sind nicht durchgeführt worden.

Ein wesentlicher Faktor sind die Umgebungsbedingungen, die nicht steuerbar sind. Bei den Messungen werden kontinuierlich die Lufttemperatur und die Fahrbahnoberflächentemperatur aufgezeichnet. Der Temperaturgradient im gebundenen Oberbau kann nicht erfasst werden und wird bei einer netzweiten Erfassung auch nicht erfassbar sein. Hierfür stehen allerdings rechnerische Näherungslösungen zur Verfügung, mit deren Hilfe der Temperaturgradient abgeschätzt werden kann (zum Beispiel BELLS-Formel).

Der Zeitabstand zwischen den Wiederholungsmessungen wurde möglichst kurzgehalten (zum Beispiel Messungen in Illingen) oder bewusst gewählt beziehungsweise angepasst (zum Beispiel Tagesganglinie, Messkampagne). Jedoch ergibt sich der zeitliche Abstand im Allgemeinen aus der Länge der Messstrecke beziehungsweise der jeweils betrachteten Messkampagne. An dieser Stelle liegt im Wesentlichen das Problem, dass selbst bei "synchronisierten Daten" (die Position betreffend) nicht zu 100 % sichergestellt werden kann, dass zur Berechnung der 10-m-Mittelwerte (10 mMW) exakt derselbe Straßenabschnitt einfließt. Daher sind bei der Betrachtung der 10 mMW Streuungen zu erwarten.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen Fahrer, Messgerät, Umgebungsbedingungen und Zeitabstand ist anzunehmen, dass für die Messungen mit dem TSD auf Grundlage dieser Daten keine Wiederholpräzision, sondern bestenfalls eine Vergleichspräzision bestimmt werden kann.

3 Untersuchungsergebnisse

Die Analyse des Temperatureinflusses hat gezeigt, dass auf dem Abschnitt BB.A1 zwischen der Messung mit der geringsten Oberflächentemperatur und der Messung mit der höchsten Oberflächentemperatur ein deutlicher Unterschied bei den D0-

Werten feststellbar ist. Allerdings zeigt sich dieser Effekt auf anderen Abschnitten nicht oder nicht so deutlich.

Anhand der unterschiedlichen Dimensionierung auf der Versuchsstrecke in BW sind deutliche Unterschiede zwischen Bauklassen erkennbar. Auch die Erprobungsstrecke in BB zeigt für ihre unterschiedlichen Bauabschnitte deutliche Unterschiede.

Durch die Messungen mit unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten in BW konnte ein Einfluss auf die D0-Werte der Messungen mit 80 km/h und der Messung mit 40 km/h festgestellt werden. Da allerdings nur eine Messung mit 40 km/h durchgeführt wurde, ist die statistische Aussagekraft des Vergleichs sehr dürrftig.

Trotz der zwei Messkampagnen, die zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt wurden, konnten keine Abhängigkeiten von der Jahreszeit nachgewiesen werden. Dies könnte möglicherweise an fehlenden Unterschieden des Feuchtigkeitsgehalts unterhalb der Asphaltsschichten liegen, verursacht durch die Witterungsbedingungen vor den Messungen.

Trotz der Größe der Datensätze lassen sich aus den hier vorliegenden Messwerten keine statistischen Aussagen zu Wiederhol-, Vergleichs- oder Zwischenpräzisionen ableiten. Dies liegt neben den oben dargestellten Einflüssen möglicherweise auch an den fehlenden Auswertemöglichkeiten innerhalb der 10-m-Mittelwerte, da diese von der Hersteller-Software automatisch berechnet werden. Zudem ist fraglich, ob die angewendeten Verfahren sich für die Messergebnisse des TSD eignen.

Zunächst sei angemerkt, dass die TSD-Daten in ihren absoluten Größen nicht mit den FWD-Daten übereinstimmen. Dennoch lässt sich ein Vergleich zwischen TSD-Daten und FWD-Daten anstellen, da die Niveauunterschiede zu gleichartigen Aussagen führen. TSD-Daten und FWD-Daten unterscheiden sich um einen Faktor X. Dort, wo also mit dem FWD homogene Abschnitte mit geringer, mittlerer oder hoher Tragfähigkeit festgestellt werden, sind auch mit dem TSD Abschnitte mit geringer, mittlerer oder hoher Tragfähigkeit feststellbar. Es sind somit qualitativ dieselben Aussagen aufgrund der TSD-Daten (D0) wie mit den FWD-Daten (D0) möglich. Um Erklärungen für die quantitativen Unterschiede zu erhalten, werden weitere gezielte Messungen und intensive Auswertungen erforderlich.

4 Folgerungen für die Praxis

Vom TSD werden zahlreiche Daten erhoben, die als Rohdaten vorliegen und mittels Software des Herstellers in ein xls- oder txt-Format exportiert werden können. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Daten zur Analyse in das xls-Format konvertiert und mit einer Tabellenkalkulationssoftware analysiert. Die Hersteller-Software berechnet verschiedene Tragfähigkeitskennwerte (unter anderem D0-Werte), die für die weitere Analyse herangezogen werden.

Hierzu sei gesagt, dass bei der ersten Sichtung des Datenbestands nach der Frühjahrmessung festgestellt wurde, dass sehr häufig keine D0-Werte berechnet wurden. Diese D0-Werte resultieren aus der Messung negativer Deflexionsgeschwindigkeiten, die dann wiederum zur Berechnung von negativen Slope-Werten führen. Werden zwei oder mehr negative Slope-Werte berechnet, versagt das Modell zur Berechnung der De-

flexionsmulde und es werden keine Tragfähigkeitskennwerte ausgegeben.

Die Kalibrierung, die Wartung und die Sicherstellung der einwandfreien Funktionalität des TSD wurden durch das IBDiM sichergestellt. Damit liegt die gesamte Qualitätssicherung außerhalb des Wirkungsradius der BUW, daher kann die Qualitätssicherung nicht in die Bewertung der Daten mit einfließen.

Es wurden Untersuchungen durchgeführt, die Temperaturschwankungen am Messbalken mit der Auftretenswahrscheinlichkeit von negativen Deflexionsgeschwindigkeiten in Verbindung bringen. Des Weiteren wurden die Datensätze hinsichtlich des Auftretens von negativen Deflexionsgeschwindigkeiten im Zusammenhang mit anderen Messparametern (zum Beispiel Fahrgeschwindigkeiten, Beschleunigung- und Bremsvorgängen, Kurvenfahrten, Temperaturen, Streckencharakteristika) untersucht.

Dabei konnte nicht eindeutig festgestellt werden, dass bestimmte Messparameter zu negativen Deflexionsgeschwindigkeiten führen.

Trotz der Größe der Datensätze lassen sich aus den hier vorliegenden Messwerten keine statistischen Aussagen zu Wiederhol-, Vergleichs- oder Zwischenpräzisionen ableiten. Dies liegt neben den oben dargestellten Einflüssen möglicherweise auch an den fehlenden Auswertemöglichkeiten innerhalb der 10-m-Mittelwerte, da diese von der Hersteller-Software automatisch berechnet werden. Zudem ist fraglich ob die angewendeten Verfahren sich für die Messergebnisse des TSD eignen.

Die in diesem FE-Vorhaben erfassten Messdaten bieten eine gute Grundlage für weitere Auswertungen. Dennoch ist die Erfassung von weiteren Daten unabdingbar. Zur weiteren Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Messergebnisse des TSD (unter anderem Temperatur, dynamische Achslastschwankung, Fahrgeschwindigkeit) müssen weitere Daten erhoben werden.

Hierzu sollte nochmal gezielt nach verschiedenen Strecken oder Streckenabschnitten gesucht werden, die sich charakteristisch unterscheiden (zum Beispiel Bauklasse, Lage) und für einen TSD-Betreiber einfach und schnell zu erreichen sind. Die Strecken sollten innerhalb von kurzen Abständen wieder befahrbar sein (zum Beispiel kurze Rundkurse), damit die Temperaturänderung im Oberbau auch bei ansteigender Temperatur möglichst in geringen Intervallen messtechnisch erfasst werden kann.

Zudem wäre eine Instrumentierung der Strecke mit Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren wünschenswert, damit die Einflüsse aus der Temperatur im Oberbau und des Feuchtigkeitsgehalts im Untergrund nachvollziehbar dokumentiert werden können. Vorbild hierfür kann die Erprobungsstrecke in Brandenburg sein.

Zurzeit existieren keine Grenzwerte für Abweichungen von einer Regelachs- beziehungsweise Regelradlast für TSD-Messungen, ganz im Gegensatz zum Benkelman-Balken (Be-Ba) mit einer zulässigen Abweichung von $\pm 10\%$ in Bezug auf die Regelachslast (10 000 kg). Aus den TSD-Daten lässt sich eine mittlere Achslast von 10 346,5 kg errechnen, die Spannweite zwischen minimaler Achslast $M_{Achse, \min}$ (8 930,2 kg) und

maximaler Achslast $M_{\text{Achse,max}}$ (12 151,1 kg) beträgt 3 220,9 kg und überschreitet damit die Abweichungen für die Be-Ba-Achslast erheblich. Allerdings erfüllen 99,9 % der TSD-Achslast-Messwerte die zulässigen Be-Ba-Abweichungen von $\pm 1\,000$ kg.

Die Achslast eignet sich allerdings nicht als Bezugsgröße für die Tragfähigkeitsmessung mit dem TSD, da die Belastung an der Messstelle im Wesentlichen durch die rechte Radlast hervorgerufen wird. Hierzu muss eine nähere Betrachtung der rechten Radlast, als die maßgebende Belastung, erfolgen.

Die Spannweite der Radlastschwankungen beträgt 2 551,2 kg. Allerdings liegen 99,6 % der gemessenen Werte für die rechte Radlast im Bereich von ± 500 kg und 95,7 % in einem Bereich von ± 250 kg um den Mittelwert. Wie auch bei anderen Messverfahren (zum Beispiel Benkelman-Balken, FWD, Lacroix) stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit einer Umrechnung beziehungsweise Normierung auf eine bestimmte Regellast. Weitere Untersuchungen sind vorzunehmen, um den Einfluss der dynamischen Radlasten darzustellen und die Notwendigkeit einer Normierung zu verifizieren oder zu falsifizieren.

Die D0-Werte der Frühjahrs- und Herbstmessungen weichen nicht signifikant voneinander ab. Da aufgrund ähnlicher Temperaturen während der Frühjahrs- und Herbstmessung Einflüsse auf die D0-Werte nahezu ausgeschlossen sind, kann daraus abgeleitet werden, dass sich auch die Feuchtigkeitsgehalte im Untergrund und den ToB während beider Messkampagnen nicht signifikant unterscheiden haben. Auf dem Messstreckenabschnitt BB.A1 ist kein nennenswerter saisonaler Einfluss feststellbar.

Messungen bei 40 km/h weisen im Allgemeinen höhere Deflexionen auf als bei Geschwindigkeiten von 60 km/h und mehr.

Auf beiden Messstrecken konnten deutliche quantitative aber nur marginale qualitative Unterschiede zwischen den Messverfahren FWD und TSD festgestellt werden. Diese Unterschiede resultieren möglicherweise aus der Fahrgeschwindigkeit des TSD, sind aber im Rahmen dieses FE-Vorhabens nicht näher untersucht worden.