

## Untersuchung korrelativer Zusammenhänge zwischen den Auswertergebnissen vier verschiedener Tragfähigkeitssysteme

FA 4.176

Forschungsstelle: Universität Hannover, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau

Bearbeiter: Wellner, F. / Hothan, J. / Numrich, R.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Abschluss: September 1999

### 1. Aufgabenstellung

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung werden Verfahren angewandt, welche die Messung der elastischen Einsenkung/Deflexion an der Oberfläche der Befestigung an einzelnen Messpunkten (Benkelman-Balken, Falling Weight Deflectometer (FWD), LACROIX) oder praktisch kontinuierlich (ARGUS) ermöglichen. Für die Erzeugung der Einsenkungen/Deflexionen werden Impulse oder statische/quasistatische Lasten aufgebracht. Das FWD bestimmt die maximalen elastischen Deflexionen an der Oberfläche, welche anschließend zu „Deflexionsmulden“ zusammengesetzt werden. Benkelman-Balken und LACROIX bestimmen die Einflusslinie, d. h. die Einsenkung an einem Punkt in Abhängigkeit vom Abstand zur Last. Deflexionsmulde und Einflusslinie sind jedoch aufgrund von Materialinhomogenitäten und viskoelastischer Einflüsse aus den Asphaltsschichten nicht identisch. Mit dem ARGUS kann lediglich die maximale Einsenkung in der Lastachse bestimmt werden, dieses aber praktisch kontinuierlich. Die gemessenen Einsenkungen/Deflexionen bzw. Einsenkungslinien werden anschließend verwendet, um Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit von Straßenkonstruktionen ziehen zu können.

Mit der vorliegenden Arbeit sollte die Zuverlässigkeit der genannten vier Messverfahren – ARGUS, Benkelman-Balken, FWD und LACROIX – untersucht werden. Dazu waren die Mess- und Wiederholbarkeit sowie die korrelativen Zusammenhänge der Messergebnisse der vier Verfahren zu bestimmen. Zu diesem Zweck sollten die angesprochenen Messsysteme an gleichen Strecken (Asphaltbefestigungen) unmittelbar nacheinander bei möglichst gleichen Bedingungen getestet und anschließend die Messergebnisse miteinander verglichen werden. Vor allem infolge der unterschiedlichen Art der Lasteintragung – statisch, quasistatisch oder dynamisch – waren Auswirkungen auf die Messergebnisse der Verfahren zu erwarten.

### 2. Untersuchungsmethodik

Im Einzelnen sind folgende Arbeitsschritte untersucht worden:

- Durchführung von Tragfähigkeitsmessungen mit den vier Messgeräten ARGUS, Benkelman-Balken (zwei Taststifte), FWD (zwei verschiedene Geräte) und LACROIX auf verschiedenen Versuchsstrecken.
- Konvertierung der Messergebnisse auf ein einheitliches Format.
- Darstellung der gemessenen Maximaleinsenkungen/-deflexionen der einzelnen Messgeräte.
- Ermittlung der Wiederholbarkeit der Messergebnisse der einzelnen Geräte aus den Ergebnissen von Erst- und Wiederholungsmessung.
- Bildung sog. „homogener Abschnitte“.
- Ermittlung von Korrelationen zwischen den Messgeräten.
- Rückrechnung und Vergleich der Schicht-E-Moduln anhand der von den einzelnen Messgeräten gemessenen Einsenkungen/Deflexionen.

### 3. Untersuchungsergebnisse

Zur besseren Vergleichbarkeit der durchgeführten Messungen wurden alle Ergebnisse auf eine Regelradlast von 50 kN linear umgerechnet. Eine Temperaturkorrektur fand nicht statt, da im Rahmen dieses Projektes das Ziel war, „zeitgleich“ durchgeführte Tragfähigkeitsmessungen miteinander zu vergleichen, d. h. die Bewertung der absoluten Größe der von den verschiedenen Geräten gemessenen Einsenkungen/Deflexionen stand im Hintergrund.

Im ersten Schritt wurden die Maximaleinsenkungen/-deflexionen der einzelnen Messgeräte gegenübergestellt, wobei auffällt, dass zum Einen die Form der Einsenkungs-/Deflexionsbänder einen sehr unterschiedlichen Verlauf aufweist und zum Anderen, dass auch die Größenordnung der gemessenen Einsenkungen/Deflexionen zwischen den einzelnen Geräten sehr stark differiert.

Um die Zuverlässigkeit der verschiedenen Tragfähigkeitsmessverfahren beurteilen zu können, führen die Messgeräte zweimal unmittelbar hintereinander einen Messabschnitt ab. In Abhängigkeit von den gewählten Abschnittslängen lag der zeitliche Abstand zwischen Erst- und Wiederholungsmessung bei höchstens 1 bis 2 Stunden. Die Einsenkungen/Deflexionen aus erster

und zweiter Messung wurden für alle Messgeräte gegenübergestellt und miteinander verglichen. Ziel war es, herauszufinden, wie groß die Abweichungen zwischen zwei Messungen auf demselben Messabschnitt sind. Dazu wurde für die gemessenen Einsenkungen/Deflexionen eine lineare Regression durchgeführt und über die Methode der kleinsten Quadrate das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ermittelt. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass die beiden FWD auf allen Messabschnitten sehr gut korrelieren. Die erreichten Bestimmtheitsmaße liegen zwischen 0,7131 und 0,9959. Die anderen drei Verfahren weisen im Allgemeinen keine gute Wiederholbarkeit der Messergebnisse auf ( $R^2$  unter 5 % auf einigen Abschnitten). Ein Zusammenhang zwischen Wiederholbarkeit und Fahrbahnaufbau konnte nicht festgestellt werden.

Um Extremwerte – hervorgerufen durch mögliche Messfehler – bei den Maximaleinsenkungen bzw. Maximaldeflexionen herauszufiltern, wurden für alle Systeme und Messabschnitte getrennt sog. „homogene Abschnitte“ gebildet. Dabei gehörte ein Messwert noch zu einem homogenen Abschnitt, wenn er eine bestimmte Abweichung (hier 15 %) nach oben oder unten gegenüber dem Mittelwert der vorherigen Messwerte dieses homogenen Abschnittes nicht überschritt. War dies nicht der Fall, so begann ein neuer homogener Abschnitt. Der Grund für dieses Vorgehen war die Überlegung, die Wiederholbarkeit der Messergebnisse durch das gezielte Herausfiltern von extrem hohen bzw. niedrigen Werten zu erhöhen. Dies gelang jedoch nur für einige wenige Messabschnitte. In den übrigen Abschnitten wurde das Bestimmtheitsmaß kleiner (bis zu 30 %).

Um die Korrelationen weiter zu verbessern, wurden anschließend aus den Messreihen diejenigen Werte, die nicht zur Grundgesamtheit passten, als Ausreißer deklariert und verworfen. Anhand der restlichen Messwerte wurde die Wiederholbarkeit der Messergebnisse für alle Geräte daraufhin neu berechnet. Da es sich bei allen gemessenen Einsenkungen bzw. Deflexionen jedoch nicht um zufällige, voneinander unabhängige Werte handelt, konnten dazu die gängigen Ausreißertests (nach DAVID-HARTLEY-PEARSON bzw. nach DIXON) nicht benutzt werden. Stattdessen hätte ein zweidimensionaler Ausreißertest (erster gegen zweiten Durchgang) angewendet werden müssen. Dieser setzt jedoch eine zweidimensionale Normalverteilung für die betrachteten Datensätze voraus. Eine Überprüfung auf eine derartige Verteilung ergab nur für die beiden FWD ein positives Ergebnis, die Daten der anderen Messgeräte unterlagen keiner definierten statistischen Verteilung, so dass Ausreißer schließlich nach rein visuellen Gesichtspunkten eliminiert werden mussten. Die sich daran anschließende Neuberechnung der Wiederholbarkeit der Ergebnisse der Messgeräte ergab zwar für diejenigen Abschnitte, auf denen Ausreißer verworfen wurden, eine geringfügige Verbesserung der Bestimmtheitsmaße, dennoch lagen diese auch weiterhin in nicht befriedigenden Größenordnungen.

Um die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen besser bewerten zu können, wurden Korrelationen zwischen den verschiedenen Messgeräten gesucht. Das Ziel bestand darin, Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Tragfähigkeitsmesssystemen zu finden, um künftig Ergebnisse eines der hier eingesetzten Geräte direkt auf die eines anderen umrechnen zu können. Zur Ermittlung von Zusammenhängen wurden die Messergebnisse der verschiedenen Geräte den Ergebnissen der anderen Geräte für jede Messfahrt einzeln gegenübergestellt. Dabei wurde der Verlauf der gegenübergestellten Werte zunächst durch eine lineare Regression beschrieben. Als Größe zur Beurteilung der Güte der Korrelation diente wiederum das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Anschließend wurden zur Verbesserung der Bestimmtheitsmaße Polynome ersten bis fünften Grades gebildet. Der Zusammenhang zwischen den beiden Falling Weight Deflectometern ist erwartungsgemäß am größten, da es sich bei gleichem Messprinzip lediglich um zwei verschiedene Hersteller handelt. Die anderen Messgeräte (ARGUS; Benkelman-Balken und LA-CROIX) korrelieren mit der FWD nur in geringem Maße. Bis auf

wenige Ausnahmen liegen alle Bestimmtheitsmaße unter 50 %. Auf einigen Untersuchungsstrecken lassen sich zwar für einzelne Geräte Bestimmtheitsmaße  $R^2$  bis zu 70 % erreichen, es ist dabei jedoch keinerlei Systematik zu erkennen, d.h. ein Zusammenhang zwischen Fahrbahnaufbau (Schichtdicken) und Bestimmtheitsmaß besteht nicht. Auch lässt sich keine Tendenz erkennen, welches Messgerät die besten Übereinstimmungen zum FWD liefert. Die erreichten Bestimmtheitsmaße liegen in Bereichen, die einen systematischen Zusammenhang zwischen den Messgeräten unwahrscheinlich erscheinen lassen.

Es wurden zusätzlich zu den in diesem Projekt vorgesehenen Tragfähigkeitsmessungen Vergleichsmessungen zwischen dem ARGUS-Einsenkungsmessgerät und dem FWD der Universität Hannover durchgeführt. Der Messpunktstand des FWD wurde für diesen Vergleich auf 1 m reduziert, um die gleiche Messpunktdichte zu erreichen wie der ARGUS. Es wurden drei Abschnitte mit einer Länge von jeweils 35 m gemessen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden sowohl die FWD als auch die ARGUS-Ergebnisse linear auf 50 kN umgerechnet. Der ARGUS fuhr die Strecken insgesamt viermal hintereinander mit verschiedenen Geschwindigkeiten (10 km/h, 20 km/h, 40 km/h und 60 km/h) ab.

Es war im Vorfeld zu vermuten, dass die Messergebnisse von ARGUS und FWD aufgrund ihres Messprinzips Unterschiede aufweisen werden. Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Messgeräte liegen jedoch in Größenordnungen, die keine systematische Korrelation zulassen. Neben der Tatsache, dass die Korrelationen zwischen beiden Geräten insgesamt relativ schlecht ausfallen, fällt weiterhin auf, dass die besten Korrelationen zwischen ARGUS und FWD auf allen drei Untersuchungsabschnitten bei drei unterschiedlichen ARGUS-Messgeschwindigkeiten erreicht werden. Es ist also nicht einmal ein Trend erkennbar, für welchen Geschwindigkeitsbereich die beiden Messverfahren am Besten korrelieren.

#### 4. Folgerungen für die Praxis

Für zukünftige Untersuchungen sollten folgende Vorschläge berücksichtigt werden, die sich aus den Untersuchungsergebnissen der vorliegenden Arbeit ergeben haben:

##### 4.1 Messinstrumentierung im Straßenkörper

Einsenkungs-/Deflexionsmesswerte bestehen zum Einen aus der tatsächlichen Deformation der Fahrbahnoberfläche unter einer definierten Belastung und zum Anderen aus störenden Randeinflüssen, wie z. B. Schiefstellung der Messbasis. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, Instrumente zur Dehnungs- und Einsenkungsmessung im Straßenkörper anzuordnen, um die Validierung der Messwerte der Tragfähigkeitsmessgeräte durchführen zu können.

##### 4.2 Definierte klimatische Verhältnisse

Die eingesetzten Messsysteme werden in Abhängigkeit von der Belastungszeit verschieden stark und mit unterschiedlicher Wirkung von den klimatischen Verhältnissen beeinflusst. Je kürzer eine Belastung auf eine Straße wirkt, desto weniger empfindlich reagiert sie auf die vorherrschende Temperatur. Die Größe dieser Abhängigkeit ist bisher jedoch noch nicht hinreichend genau bekannt. Andererseits bewirkt eine Wassersättigung des Untergrundes bei sehr kurzer Belastungszeit, dass die Einsenkung/Deflexion infolge der Einspannung des Wassers sehr klein ist.

Verlängert sich die Belastungszeit, kann das Wasser aus den Poren verdrängt werden, die Einsenkung/Deflexion wird größer bestimmt. Diese beschriebenen Effekte (Temperatur, Wasser) überlagern sich bei den in die Untersuchung einbezogenen Messverfahren in entscheidender Weise, so dass teilweise sich widersprechende Werte gemessen werden können.

Für einen besseren Vergleich von Tragfähigkeitsmessungen sind daher fest definierte klimatische Verhältnisse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wassergehalt des Straßenkörpers bzw. des Untergrundes) anzustreben. Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn man diese Größen innerhalb bestimmter Größenordnungen gezielt variieren kann. Derartige Untersuchungen können nur in einem entsprechend ausgerüsteten Versuchsstand durchgeführt werden.

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen fanden zwar für einen Messabschnitt jeweils innerhalb weniger Stunden statt, dennoch lagen durch Temperaturschwankungen, wechselnde Verschattungen und unterschiedliche Feuchtigkeitszustände der Fahrbahnoberfläche keine konstanten Bedingungen vor. Auch konnten keine Aussagen über den jeweils vorherrschenden Wassergehalt im Straßenaufbau bzw. im Untergrund getroffen werden.

#### 4.3. Gerätespezifische Untersuchungen

Generell haben die Untersuchungen gezeigt, dass die einzelnen Geräte Messpunkte bzw. Bereiche, in denen die Einsenkungs-/Deflexionswerte augenscheinlich deutlich über denen des restlichen Abschnittes lagen, auf den Untersuchungsabschnitten meistens alle übereinstimmend lokalisieren konnten. Dennoch lassen sich aus den Ergebnissen dieses Projektes zu den einzelnen Messsystemen folgende Rückschlüsse ziehen:

##### ARGUS

Die Messungen mit dem ARGUS-Messsystem mit verschiedenen Geschwindigkeiten erbrachten nicht nur unterschiedliche Größenordnungen der Messwerte auf ein und demselben Abschnitt, sondern auch unterschiedliche, teilweise gegenläufige Verläufe der Einsenkungsmessbänder in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit. Wenn die unterschiedlichen Größenordnungen anhand der differierenden Belastungszeiten bei verschiedenen Geschwindigkeiten ggf. erklärbar sind, deuten die teilweise gegenläufigen Messwertbänder eher auf dynamische Probleme hin (evtl. Resonanzen am Messfahrzeug, wahrscheinlich in Abhängigkeit von der Ebenheit der Fahrbahn). Bei zukünftigen Untersuchungen zum ARGUS sollten deshalb gleichlaufend Ebenheitsmessungen stattfinden, um ggf. Einsatzgrenzen bezüglich der Geschwindigkeit der Messfahrten feststellen zu können.

Weiterhin ermittelt der ARGUS keine Einsenkung an der Fahrbahnoberfläche unter einer definierten Last, d.h. die Eigenschaft einer Befestigung. Infolge der Interaktion Fahrzeug – Fahrbahn wird keine konstante Belastung aufgebracht. Die Nick- und Wankbewegungen, die durch die Auswertung der Messdaten eliminiert werden, bewirken an den einzelnen Messpunkten unterschiedliche Achslasten. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist es nicht möglich, den gemessenen Einsenkungen die zugehörige Last zuzuordnen. Die Gerätebetreiber sind jedoch derzeit dabei, eine Möglichkeit zu finden, um die dynamischen Achslastanteile quantifizieren zu können.

Die Tatsache, dass der ARGUS den Anfangspunkt einer Messstrecke nicht genau trifft, ist jedoch nicht als Nachteil anzusehen, da lediglich im Rahmen dieses Projektes ein direkter Ver-

gleich zwischen verschiedenen Messgeräten vorgesehen war. Bei routinemäßigen Messungen wird von allen Tragfähigkeitsmessverfahren eine derart präzise Zuordnung der Messpunkte zur Streckenkilometerierung o.ä. Fixpunkten (Genauigkeit < 1,0 m) meist nicht verlangt.

##### FWD

Die Untersuchungen mit dem FWD haben gezeigt, dass zumindest in der Lastachse reproduzierbare Werte gemessen werden können. Dem gegenüber erscheinen die Messungen der Vertikalverformungen an der Oberfläche neben der Lasteintragsstelle problematischer, wie die Auswertungen aus den Verformungsmulden der rückgerechneten E-Moduli belegen. Es ist deshalb für zukünftige Untersuchungen zu empfehlen, insbesondere der Auswerteproblematik des FWD – von den Grundlagen her (dynamische Lasteintragsung, Auswertung der erzeugten Wellen bzw. Wellengeschwindigkeiten) – Aufmerksamkeit zu schenken. Insgesamt weisen die im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Messergebnisse wegen der hohen Reproduzierbarkeit das Messsystem als gut aus.

##### LACROIX

Nachteilig beim LACROIX scheint die relativ kurze Messbasis des Messgestelles (ca. 1,4 m) zu sein. Die fast durchweg geringeren Einsenkungswerte gegenüber den mit dem Benkelman-Balken und teilweise auch mit dem FWD gemessenen Werten deuten darauf hin, dass das Messgestell in der vom Fahrzeug erzeugten Mulde steht. Die geringere Wiederholbarkeit der Messergebnisse des LACROIX gegenüber denen des FWD ist hier wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Messpunkte zwischen der ersten Fahrt und der Wiederholungsfahrt nicht genau übereinstimmten, was dem Gerät jedoch nicht als Nachteil angerechnet werden darf.

##### Benkelman-Balken

Der deutliche Nachteil dieses Gerätes besteht in der langen Belastungszeit selbst bei zügigem Arbeiten. Hierdurch werden in jedem Falle die größten Einsenkungen bestimmt, und auf Asphaltsschichten ist eine starke Temperaturabhängigkeit der Messergebnisse zu verzeichnen. Die bereits bekannte Beschränkung dieses Messverfahrens auf die Jahreszeit mit möglichst niedrigen Temperaturen über dem Gefrierpunkt (Frühjahr, Herbst) kann nur bestätigt werden.

Die meisten der angesprochenen Vorschläge für die weiterführende Forschung lassen sich berücksichtigen, wenn die Untersuchungsstrecken in einen Versuchsstand verlegt würden. Störende Randeinflüsse wären ausgeschaltet und gezielt einstellbare, über die Messung konstante Bedingungen wären gegeben, um einen Vergleich der Ergebnisse auf mechanischer Grundlage durchzuführen. Bei diesen Untersuchungen sollten zunächst unter Berücksichtigung der jeweiligen Bedingungen alle Einflüsse gerätespezifisch systematisch betrachtet und bewertet werden. Anschließend sollten sich daran der Vergleich der verschiedenen Tragfähigkeitsmesssysteme anhand der gewonnenen Erkenntnisse sowie Aussagen über die Zuverlässigkeit der einzelnen Verfahren. Für jedes Gerät ist außerdem ein gesonderter Bewertungshintergrund erforderlich. □