

# Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen

FA 4.318

Forschungsstellen: Technische Universität Darmstadt, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. J. S. Bald)

HELLER Ingenieurgesellschaft mbH, Darmstadt

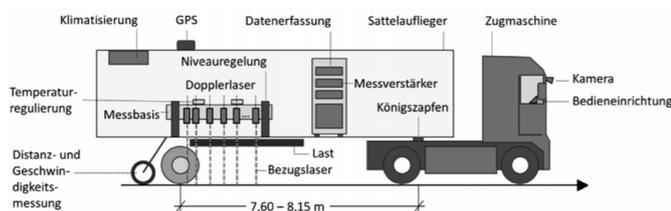
Bearbeiter: Cickovic, M. / Bald, J. S. / Middendorf, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2020

## 1 Einführung

Das Traffic Speed Deflectometer (TSD) wurde Ende des letzten Jahrhunderts in Dänemark entwickelt, mit dem Ziel, Verformungen bei hoher Geschwindigkeit zu erfassen. Dabei ist das Messsystem auf einem Lkw verbaut (inkl. aller zugehöriger Instrumentierung, s. Bild 1). So ist die Erfassung der Tragfähigkeit bei einer Geschwindigkeit von ca. 80 km/h möglich. Der Messbalken muss biege- und verwindungssteif und möglichst gleichmäßig temperiert sein, um gleiche Rahmenbedingungen bei der Korrektur der einzelnen Doppler-Laser-Daten zu gewährleisten.



**Bild 1: Prinzipskizze des Messfahrzeugs (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2015)**

Das Prinzip der Datenerfassung beim TSD beruht auf dem Doppler-Effekt, das heißt, die Wellenlänge des emittierten Lichtstrahls unterscheidet sich von der Wellenlänge des immittierten (reflektierten) Lichtstrahls. Dabei kann so die Schräggeschwindigkeit der Verformung erfasst werden. Um die reine Verformungsgeschwindigkeit zu erfassen, ist die genaue Kenntnis über die Schräglage der Doppler-Laser und die Horizontalgeschwindigkeit notwendig. Die Schräglage wird dabei mithilfe eines Referenzlasers erfasst. Hinzu kommen Beschleunigungssensoren und Gyroskope, die die Bewegungen während der Datenerfassung aufzeichnen. Die Horizontalgeschwindigkeit des Fahrzeugs wird mittels eines Hodometers erfasst und wird zur Berechnung der Vertikalgeschwindigkeit (also der Verformungsgeschwindigkeit) verwendet.

## 2 Ziel und Aufgaben

Ziel des Forschungsvorhabens war es, geeignete Ansätze zur Aus- und Bewertung von Tragfähigkeitsmessungen mit dem TSD zu finden, diese zu beschreiben und zu evaluieren.

In einem ersten Schritt wird mithilfe einer ausgedehnten, internationalen Literaturstudie der aktuelle Kenntnisstand bezüglich Tragfähigkeitsmessungen mit dem TSD zusammengetragen. Dabei wird zunächst das Messprinzip möglichst detailliert beleuchtet. Ein weiterer Fokus liegt zudem auf bisherigen Erfahrungen mit dem TSD, angefangen mit Untersuchungen zu Wiederholgenauigkeit und Vergleichbarkeit bis hin zu ersten Anwendungsfällen. Dies wird als Überleitung zur Einführung möglicher Tragfähigkeitskennwerte, die mit TSD-Messungen erfasst oder berechnet werden können, verwendet. Hierbei werden insgesamt 26 Tragfähigkeitskennwerte identifiziert, die in der internationalen Fachliteratur als Kennwerte der strukturellen Substanz von Verkehrsflächenbefestigungen verwendet werden.

Gleichzeitig wird ebenso das Post-Processing beleuchtet, vor allem die Auswirkungen von Witterungs- und Messbedingungen auf das Messergebnis. Hier ist zum einen die Messgeschwindigkeit zu nennen, die im Vergleich zu FWD-Messungen eine neue Komponente darstellt, zum anderen aber auch die vorherrschenden Temperaturen und die tatsächliche Beanspruchung. Hierzu wurden erste Korrekturansätze zusammengetragen. Ein weiterer Punkt des Post-Processings ist die Berechnung von Verformungsmulden aus den Slope-Werten des TSD. Hier existieren zwei konkurrierende Ansätze, die näher erläutert werden.

Im nächsten Schritt gilt es, die bisherigen Erkenntnisse an Daten zu verifizieren. Hier werden zwei Ansätze verfolgt: Zum einen wird mithilfe des Berechnungsprogramms 3D-Move der University of Nevada eine Parameterstudie durchgeführt, bei der verschiedenste Rahmenbedingungen (Temperatur, Radlast, Elastizitätsmodul der gebundenen und ungebundenen Schichten, Dicke der gebundenen Schichten, Geschwindigkeit, Belastungsklasse) variiert werden. Der Vorteil dieses Programms ist, dass eine Berechnung von Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten möglich ist und damit auch Slope-Werte (da die Horizontalgeschwindigkeit immer bekannt ist) zur Verfügung stehen. Zum anderen wurden vonseiten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr (StMB) TSD-Messdaten zur Verfügung gestellt, die ausgewertet werden.

Die Parameterstudie zum Einfluss der Geschwindigkeit auf die Tragfähigkeitskennwerte ergibt, dass dieser im üblichen Geschwindigkeitsbereich des TSD (> 20 km/h) vernachlässigbar gering ist. Erst ab Geschwindigkeiten unterhalb von 20 km/h ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Ausprägung der Tragfähigkeitskennwerte, die durch die immer statischer werdende

Beanspruchung durch das TSD entstehen. Die Ergebnisse der 3D-Move-Parameterstudie sind zudem kongruent zu realen Messungen, die durch die BAST auf dem Gelände des Aldenhoven Testing Center (ATC) durchgeführt wurden.

Aufgrund der Schwankungen der Radlast, bedingt durch die Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, ergibt sich, dass die berechneten Tragfähigkeitskennwerte auch einer radlastinduzierten Schwankung unterliegen. Im Rahmen einer Parameterstudie zum Einfluss der Radlast auf die Ausprägung der Tragfähigkeitskennwerte konnte festgestellt werden, dass ein linearer Korrekturansatz, analog zum Korrekturansatz bei FWD-Tragfähigkeitsmessungen, im üblichen Radlastfenster, welches bei Tragfähigkeitsmessungen auftritt, zulässig ist. Deutliche Abweichungen (ober- oder unterhalb von 10 %) können durch eine lineare Korrektur nicht mehr ansprechend erfasst werden. Da einige TSD Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Erfassung der aufgebrachten Last besitzen, können kritische Stellen, das heißt Bereiche, in denen die Ziellast deutlich über- oder unterschritten wird, erfasst und gesondert betrachtet werden.

Die vorherrschende Temperatur, insbesondere die Kenntnis über die Asphaltkörpertemperatur, ist elementar, um die Tragfähigkeit der untersuchten Verkehrsflächenbefestigung beurteilen zu können. Diese Erkenntnis ist bereits aus FWD-Tragfähigkeitsmessungen bekannt und ist ebenso auf TSD-Tragfähigkeitsmessungen projizierbar. Die durchgeführte Parameterstudie in 3D-Move sowie die Analyse der realen Messdaten zeigen, dass nahezu alle Tragfähigkeitskennwerte von der Temperatur abhängig sind und daher eine Temperaturkorrektur zwingend notwendig ist. Hierzu wurden verschiedene Verfahren diskutiert und exemplarisch angewandt, um deren Auswirkung quantifizieren zu können – mithilfe der 3D-Move-Parameterstudie. Hierzu sei gesagt, dass die meisten der diskutierten Ansätze aus FWD-Tragfähigkeitsmessungen stammen und daher die Zulässigkeit einer direkten Umsetzung für TSD-Messungen zumindest überprüft werden muss. Grundsätzlich muss auch die Frage gestellt werden, auf welcher Datenebene eine Temperaturkorrektur durchgeführt werden soll. Alle Temperaturkorrekturverfahren, die bei Tragfähigkeitsmessungen angewendet werden, zielen auf eine Temperaturkorrektur der Verformungsmulde oder einzelner Tragfähigkeitskennwerte ab. Es ist zumindest zu diskutieren, ob die Anwendung der Temperaturkorrektur auf dieser Ebene zielführend ist, da auch eine widerstandsseitige Temperaturkorrektur möglich ist, das heißt Korrektur auf Ebene der Grenz- beziehungsweise Orientierungswerte.

Da das TSD, im Gegensatz zum FWD, nicht Verformungswerte als originäre Ausgabewerte besitzt, sondern Verformungsgeschwindigkeiten beziehungsweise Slope-Werte, gilt es auch die Berechnung der Verformungswerte zu ergründen. Die Berechnung der Verformungswerte ist deswegen von Relevanz, da viele der Tragfähigkeitskenngrößen auf Verformungswerten basieren. Derzeit existieren zwei Verformungsmuldenberechnungsverfahren, die kritisch untersucht werden: das Area-under-the-Curve-Verfahren (AUTC) und das Verfahren nach PEDERSEN

(2013), welches vom TSD-Hersteller Greenwood A/S angewendet wird. Das AUTC-Verfahren basiert auf einer rückwärtigen Integration des Slope-Verlaufs unter Berücksichtigung einiger Rahmenbedingungen (zum Beispiel Taittaming, also Zähmung des lastfernen Teils des Slope-Verlaufs). Das Verfahren nach PEDERSEN (2013) funktioniert nach dem Prinzip eines Curve Fittings des Slope-Verlaufs (hier wird eine zusammengesetzte Funktion als Schablone verwendet, die parametrisiert werden muss). Die Simulationen in 3D-Move werden hierzu verwendet, um diese beiden Verfahren miteinander zu vergleichen. Hierzu sei gesagt, dass in 3D-Move auch die Ausgabe von Verformungsgeschwindigkeiten möglich ist, sodass diese zur Berechnung von Slope-Werten verwendet werden können und damit als Ausgangspunkt zur Berechnung der Verformungen dienen. Das AUTC-Verfahren wird in Scilab selbst nachgebildet, während für das Verfahren nach PEDERSEN (2013) die Daten von Greenwood A/S berechnet werden. Die berechneten Verformungen können anschließend mit den "realen" Verformungen aus 3D-Move verglichen werden. Der Vergleich ergibt, dass das Taittaming des AUTC-Verfahrens vor allem bei vergleichsweise steifen Verkehrsflächenbefestigungen fälschlicherweise einsetzt und damit die Verformungsmulde falsch wiedergibt. Ansonsten liefert dieser Ansatz gute Übereinstimmungen. Das Verfahren nach PEDERSEN (2013) liefert insgesamt sehr gute Übereinstimmungen mit den "realen" Verformungsmulden aus 3D-Move. Die guten Übereinstimmungen zeigen sich ebenfalls auf Ebene der Tragfähigkeitskennwerte.

Die Parameterstudie in 3D-Move wird zudem verwendet, um eine Sensitivitätsanalyse auf Ebene der Tragfähigkeitskennwerte durchzuführen. Dabei geht es darum, herauszufinden, welcher Kennwert sich aufgrund einer Variation eines bestimmten Ausgangsparameters am meisten verändert hinsichtlich der quantitativen Ausprägung. Das Ergebnis dieser Analyse ist, dass vor allem die Tragfähigkeitskennwerte der SCI-Familie (Oberflächenkrümmungsindizes  $SCI_{200}$ ,  $SCI_{300}$  und  $SCI_{SUB}$ ) und der Steifigkeitsrückrechnungsmethode (Schichtmodul der ungebundenen Schichten  $M_0$ , elastische Länge  $l_{elastisch}$  und charakteristische Steifigkeit der lastverteilenden Schicht  $M,h^3$ ) sehr hohe Sensitivitäten hinsichtlich der zugehörigen, variierten Parameter aufweisen. So weisen die Kennwerte  $SCI_{200}$ ,  $SCI_{300}$ ,  $l_{elastisch}$  und  $M,h^3$  hohe Sensitivitäten bezüglich Variationen der Steifigkeit der gebundenen Schichten auf, während die Kennwerte  $SCI_{SUB}$  und  $M_0$  bei Veränderungen der Steifigkeit der ungebundenen Schichten sehr stark reagieren. Positiv ist zudem, dass sich die angesprochenen Sensitivitäten nur für die angesprochenen Schichten einstellen, das heißt, der  $SCI_{300}$  reagiert nicht beziehungsweise kaum auf Veränderungen der Steifigkeit der ungebundenen Schichten.

### 3 Ergebnisse und Folgerungen für die Praxis

Neben einer Parameterstudie werden auch reale Messdatensätze ausgewertet. Dabei standen insgesamt 14 Datensätze der Königsforster Runde (bereitgestellt durch die BAST), ein Datensatz der ZEB-Dauermessstrecke auf der BAB A 5 (bereitgestellt

durch die BAST) und zwei Datensätze von Staatsstraßen in Bayern (bereitgestellt durch das StMB) zur Verfügung. Die Datensätze der Königsforster Runde werden verwendet, um die Wiederholgenauigkeit, die Abhängigkeit von der Temperatur und die Abhängigkeit von der Straßenkategorie beziehungsweise Aufbau zu untersuchen. Der Datensatz der Messungen auf der BAB A 5 wird für den Vergleich mit ZEB-Daten verwendet. Gleiches gilt auch für die beiden Messstrecken, die durch das StMB bereitgestellt wurden. Hier geht es zudem noch um die Anwendung auf Verkehrsflächenbefestigungen mit niedriger Tragfähigkeit.

Die Analyse der Messdaten der Königsforster Runde ergibt, dass vor allem die Tragfähigkeitskennwerte der SCI-Familie zuverlässig und deutlich Tragfähigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Straßenkategorien und damit Aufbauten der einzelnen Abschnitte detektieren (unter anderem BAB, verschiedene Landstraßen) und auch auf die vorherrschenden Temperaturen und damit veränderte Tragfähigkeitsverhältnisse der gebundenen Schichten reagieren können. Bei den Kennwerten der Steifigkeitsrückrechnungsmethode besteht das Problem, dass für deren Berechnung nur jeweils zwei bis drei Verformungswerte verwendet werden können und dies eine zu geringe Datenmenge ist, um die notwendige Regressionsfunktion zuverlässig bestimmen zu können. Daher ist eine große Streuung zu erkennen. Es wurde in einem nächsten Schritt versucht, den Funktionsansatz auf Ebene der Slope-Werte anzuwenden, jedoch stellt sich auch hier das Problem der zu geringen Datenmenge je Einzelwert ein. Mit einer erhöhten Anzahl an Doppler-Lasern im lastfernen Bereich könnte der Ansatz jedoch zuverlässigere Werte liefern. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Qualität der Daten in hohem Maße von der Temperaturkonstanz innerhalb des Messbalkens abhängig ist. So zeigen einige Messkampagnen merkwürdige Verläufe auf Ebene der Tragfähigkeitskennwerte, die nicht mit Umgebungseinflüssen erklärt werden können. Ein Blick auf die Messbalkentemperaturdifferenzen zeigt jedoch, dass diese während der betroffenen Messkampagnen vergleichsweise hoch waren (bis zu 1 K) und davon auszugehen ist, dass sich eine thermisch induzierte Krümmung des Messbalkens eingestellt hat, die die Messdatenerfassung beeinflusst hat. Davon ist abzuleiten, dass im Rahmen der Messdurchführung und des Post-Processings ein großes Augenmerk auf den Temperaturzustand des Messbalkens zu legen ist und sich keinerlei Temperaturdifferenzen hier einstellen dürfen.

Für die netzweite Analyse von Tragfähigkeitskennwerten ist es zudem relevant, zu wissen, in welchem Maße die Kennwerte aggregiert werden können und welche Aussagekraft noch vorhanden ist. Dazu sei gesagt, dass die Rohdaten üblicherweise als 10-m-Einzelwerte vorliegen, das heißt, es findet bereits vorab eine Mittelung auf 10-m-Werte statt. Eine weitere Mittelung auf beispielsweise 100-m-Abschnittswerte führt zwar zu einer weiteren Homogenisierung der Daten, jedoch gehen dadurch Detailinformationen und die Kenntnis über lokale Unstetigkeiten in der Tragfähigkeit verloren. Bei der Bildung homogener Abschnitte besteht zudem die Frage, welcher Tragfähigkeitskennwert zur

Bildung herangezogen werden sollte. Hierzu ist festzustellen, dass diese Frage davon abhängig ist, welche Tragfähigkeit (also welche Schicht) zu einem homogenen Abschnitt zusammengefasst werden soll. Wenn es also um die Tragfähigkeit der gebundenen Schichten geht, dann wäre die Wahl des beispielsweise  $SCI_{300}$  möglich, während die Frage nach der Tragfähigkeit der ungebundenen Schichten am ehesten durch beispielsweise den  $SCI_{SUB}$  beantwortet wird. Es ist also vielmehr die Kombination von Kennwerten, die eine Übersicht über das Gesamttragverhalten der Verkehrsflächenbefestigung erst zulässt.

Zuletzt werden die Tragfähigkeitskennwerte mit Zustandsgrößen der ZEB verglichen. Die Vergleiche werden für die ZEB-Daueremessstrecke auf der BAB A 5 und für zwei Staatsstraßen in Bayern durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass keinerlei Korrelation o.ä. zwischen Zustandsgrößen und Tragfähigkeitskennwerten vorliegt – der Schluss von Zustandsgrößen der ZEB auf die Tragfähigkeit der untersuchten Verkehrsflächenbefestigung scheint daher unzulässig.

