

Ausfallwahrscheinlichkeit bei Anwendung des Bewerteten Längsprofils im Bauvertrag

FA 4.309

Forschungsstelle: Systemtechnik Schniering GmbH, Gladbeck

Bearbeiter: Schniering, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2020

1 Aufgabenstellung

Das Bewertete Längsprofil (WLP) (UECKERMANN, 2004) ist als ein Verfahren zur Bewertung von Längsunebenheiten in den TP Eben – Berührungslose Messungen (FGSV, 2009) beschrieben. Es wurde ein Bewertungshintergrund für netzweite Straßenzustandserfassungen für das WLP erarbeitet (MAERSCHALK, UECKERMANN, HELLER, 2011).

Die Verstärkung kurzweiliger Unebenheiten im WLP führt zu schlechten Zustandsnoten für die Längsebenheit in Auswerteabschnitten mit kurzweiligen Einzelhindernissen. Dieses Verhalten ist erwünscht, wenn die Unebenheiten durch Fahrbahnschäden erzeugt werden, wie zum Beispiel Ausbrüchen und Absackungen. Es führt jedoch ebenso zu schlechten Zustandsnoten bei Auswerteabschnitten, in denen sich baulich bedingte Einzelhindernisse befinden, wie zum Beispiel Schachtdeckel, Schieberkappen und Brückenwiderlager. Da diese nicht als Fahrbahnschäden zu betrachten sind, sollen sie auch nicht zu einer schlechten Zustandsnote für die Längsebenheit führen.

Zudem gibt es bei der Zustandserfassung auf Straßen verschiedene Situationen, bei denen die verwendeten Laserdistanzsensoren vereinzelt unerwartete oder sogar fehlerhafte Messwerte ausgeben. Dies führt zu Ausreißern in den Laserwerten, die im daraus berechneten Längsprofil wie Einzelhindernisse erscheinen können.

Mit der Einführung des WLP, welches Einzelhindernisse stark hervorhebt, ist es daher von zunehmender Bedeutung, baulich bedingte Einzelhindernisse und Ausreißer in den Laserwerten sicher zu erkennen und von der weitergehenden Auswertung auszuschließen beziehungsweise herauszufiltern.

Das Wahre Höhenlängsprofil ist die Berechnungsgrundlage für das Bewertete Längsprofil (WLP). Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Erfassung und Berechnung des Wahren Längsprofils durch eine möglichst automatische Erkennung und Eliminierung von baulich bedingten Einzelhindernissen und fehlerhaften Messwerten zu verbessern.

Für die Qualitätssicherung der ZEB soll in diesem Zusammenhang ein Prüfstand konzipiert und realisiert werden, der es erlaubt, die vier Laserdistanzsensoren eines Messsystems nach dem Mehrfachabtastungsprinzip synchronisiert, dynamisch und direkt im Verbund mit dem Messsystem zu testen und das Verhalten des Messsystems bei anspruchsvollen Messbedingungen zu

analysieren. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sollen zu einem insgesamt robusteren Verfahren zur Ermittlung des WLP führen.

2 Untersuchungsmethodik

Es wurden Untersuchungsstrecken ausgewählt, die verschiedene konstruktiv bedingte Einzelhindernisse aufweisen. Diese Strecken wurden mit einem von der Bundesanstalt für Straßenwesen zugelassenen Längsebenheits-Messsystem erfasst. Dieses wurde um einen Einzelmesswert-Datenlogger ergänzt, der es erlaubt, 1-cm-Werte zu speichern anstatt der bisher üblichen 10-cm-Werte. Es wurden insgesamt 31 Messungen auf zwölf Untersuchungsabschnitten durchgeführt. Die Messungen decken die gängigen, konstruktiv bedingten Einzelhindernisse ab und enthalten zudem Messwertaussetzer und -ausreißer aufgrund verschiedener Einflüsse. Es wurde untersucht, wie sich typische Profilformen und Messfehler auf das WLP auswirken. Auf der Basis der so gewonnen Erkenntnisse wurde ein Verfahren entwickelt, welches es erlaubt, den Einfluss von fehlerhaften Messwerten eines Längsprofilmesssystems sowie den Einfluss konstruktiv bedingter Einzelhindernisse auf das WLP zu eliminieren oder zumindest erheblich zu reduzieren.

Für die Auswertung aller Messtrecken wurde festgelegt, dass die Berechnung des Wahren Höhenlängsprofils genauso erfolgt, wie im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) von Bundesfernstraßen. Für die Berechnung des WLP und der daraus abgeleiteten Zustandsgrößen SDL, DBL wurde festgelegt, dass sie entsprechend den Vorgaben und dem Matlab-Beispiel-Source-Code in dem DIN-Entwurf DIN EN 13036-5:2017-07 durchgeführt werden. Gemäß den Vorgaben der BASt wurden als Parameter für die WLP-Berechnung verwendet: Welligkeit $w = 2,6$, minimale Wellenlänge $L_{min} = 0,5$ m, maximale Wellenlänge $L_{max} = 50$ m und Auswerteabschnittslänge = 20 m.

Konstruktiv bedingte Einzelhindernisse sollen künftig von der Bewertung ausgeschlossen werden können. Dazu gehören die verschiedenen Arten von Übergangskonstruktionen an Brückenbauwerken, wie zum Beispiel ein- und mehrzellige Fugen mit und ohne Abdeckung und Einbauten, wie zum Beispiel Schachtabdeckungen, Schieberkappen und Rinneneinläufe.

Die Auswirkung von Querfugen in Betonfahrbahnen auf die Längsebenheitsergebnisse ist ebenfalls von Interesse. Daher wurde eine Betonfahrbahn in das Kollektiv der Untersuchungsstrecken aufgenommen.

Fehlerhafte Messsignale, die zum Beispiel durch metallische Einbauten, hochgeschleuderte Steinchen oder aufgewirbeltes Laub entstehen, wurden durch einen zu entwickelnden Filter detektiert und nach Möglichkeit korrigiert.

Für die Messungen, die im Wesentlichen auf Bundesfernstraßen durchgeführt wurden, wurde das Messsystem ARGUS-KBVI ausgewählt. Für des Forschungsvorhaben wurde das Messsystem

so konfiguriert, dass es die Abstandswerte über jeweils 1 cm Messweglänge in den Rohdaten speichert (1-cm-Werte).

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Messungen und Auswertungen

Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Aufzeichnung der Abstandsdaten in 1-cm-Werten zwingend erforderlich ist, wenn konstruktiv bedingte Einzelhindernisse in den Längsprofildaten detektiert werden sollen. In den bisher aufgezeichneten 10-cm-Werten gehen durch die Mittelwertbildung zu viele hochfrequente Details verloren. Die zusätzliche Aufzeichnung von Front- und Makrokamerabildern hat sich als sehr hilfreich erwiesen, da dadurch die Ursachen für die Unebenheitsereignisse visuell überprüft werden konnten.

Die Eliminierung des Einflusses von konstruktiv bedingten Einzelhindernissen auf das WLP besteht aus drei Teilschritten:

- die Erkennung der Stellen, wo Einzelhindernisse vorliegen,
- die Bestimmung der Ausdehnung eines jeden Einzelhindernisses und
- die Eliminierung durch Ersetzen der Abstandswerte im Bereich eines jeden Einzelhindernisses.

Für die Erkennung der Stellen, an denen Einzelhindernisse vorliegen, wurde ein Filter entwickelt, der eine Mustererkennung durchführt und dabei Stellen identifiziert, die dem Querschnitt einer Fuge entsprechen. Anhand der Filterantwort wurde auch die Ausdehnung der Einzelhindernisse ermittelt, wobei mehrere dicht aufeinanderfolgende Fugen zu einem Einzelhindernis zusammengefasst werden. Im Bereich der Einzelhindernisse wurden sodann alle gemessenen 1-cm-Abstandswerte durch lineare Interpolation zwischen dem letzten Wert vor dem Einzelhindernis und dem ersten Wert nach dem Einzelhindernis ersetzt.

Ausreißer, die zum Beispiel durch Steinchen entstehen, die von Fahrzeugreifen aufgewirbelt durch die Laserstrahlen der Abstandssensoren fliegen, werden durch einen anderen mathematischen Filter detektiert. Dieser Filter berücksichtigt das derart bedingte Ausreißer immer eine Spitze nach oben in den Abstandsdaten eines Sensors darstellen, welche sich an der gleichen Stelle bei den anderen Abstandssensoren nicht wiederfindet. Mit dem Filter lassen sich bereits Ausreißer ab 1 mm Höhe sicher erkennen. Ihre Auswirkungen auf das WLP werden ebenfalls durch lineare Interpolation der 1-cm-Abstandswerte im Bereich der Ausreißer eliminiert.

Kurzzeitige Aussetzer (Drop-Outs) in den Messdaten werden ebenfalls durch lineare Interpolation der 1-cm-Werte aufgefüllt.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass sich sauber vergossene Querfugen in Beton kaum auf das WLP auswirken. Auf schadhafte Fugenfüllungen, Kantenschäden und Eckabbrüche spricht der WLP hingegen deutlich an.

Durch die Portierung aller standardisierten Algorithmen zur Berechnung des Wahren Höhenlängsprofils und des WLP nach Python konnten alle Rechenschritte effizient und übersichtlich in einer Entwicklungsumgebung durchgeführt und dokumentiert werden. Folgende Abfolge der Rechenschritte hat sich als zielführend erwiesen:

- Ersetzen von Drop-Outs durch lineare Interpolation
- Eliminierung von konstruktiv bedingten Einzelhindernissen
- Detektion und Ersetzen von Ausreißern
- Berechnung der 10-cm-Werte aus den 1-cm-Werten der Laserabstandsdaten
- Berechnung des Wahren Höhenlängsprofils aus den 10-cm-Laserabstandsmittelwerten
- Berechnung des WLP aus dem Wahren Höhenlängsprofil
- Berechnung der WLP-Zustandsgrößen SBL und DBL aus dem WLP

Die korrekte Implementierung wurde verifiziert durch den Vergleich mit den Resultaten aus Berechnungen mit den Standard-Berechnungsmodulen der BAST.

3.2 Längsebenheitsprüfstand

Der entwickelte Längsebenheitsprüfstand (LEP) ermöglicht die synchronisierte dynamische Überprüfung der vier Abstandssensoren eines Längsprofilmesssystems. Derzeit kommen bei den für die ZEB zugelassenen Längsebenheitsmesssystemen ausschließlich Laserabstandssensoren zum Einsatz, die nach dem Prinzip der Punktriangulation arbeiten. Der LEP muss höhere Genauigkeitsanforderungen bezüglich Abstand und Synchronität erfüllen als das zu prüfende Messsystem.

Der Prüfstand besteht aus vier elektrisch ausfahrbaren Zylindern, die unter den Abstandssensoren des Längsebenheitsmesssystems positioniert werden. Die Zylinder führen synchronisiert vertikale Bewegungen aus, die von den Abstandssensoren des Messsystems als Änderungen des Messabstands registriert werden. Der vertikale Hub der Zylinder beträgt 25 mm. Die Dynamik ist ausreichend hoch, um Einzelhindernisse bei 60 km/h zu simulieren. Dies macht Beschleunigungen bis zum Hundertfachen der Erdbeschleunigung (100 g) erforderlich. Die vertikale Position des Hubzylinders wird von einem integrierten Positionencodern mit einer Auflösung von 1 µm erfasst.

Wegen der hohen Dynamikanforderungen ist eine außerordentlich präzise Synchronität der Ansteuerungen der vier Zylinder erforderlich. Eine Zeitabweichung der Steuerungen untereinander ist kleiner als 1 µs. Außerdem wird eine hohe Motorspannung von ca. 250 V benötigt, um die 100 g Beschleunigung erreichen zu können. Die Frequenz der Motorstrom-Regelschleife

beträgt 50 kHz, um die hochdynamische Bewegung bei nur 25 mm Hub sicher kontrollieren zu können.

Als Aktuatoren werden antriebstechnische Baueinheiten bezeichnet, die ein elektrisches Signal von einem Steuerungscomputer in mechanische Bewegungen umsetzen. Die Hubzylinder sind die Aktuatoren des Längsebenheitsprüfstands.

Für die Auswahl der Aktuatoren waren maximale Beschleunigung und die Möglichkeit zur hochpräzisen Lageregelung die ausschlaggebenden Kriterien. Es kommen deshalb Tauchspulen-Motoren, auch Voice Coil Actuator (VCA) genannt, mit externen Linearführungen und Positionssensoren zum Einsatz, da sie als derzeit einzige Technologie die erforderliche Dynamik und Präzision bieten. Bild 1 zeigt die Aktuatoren und die Motorsteuerungen, die speziell für diesen Anwendungsfall entwickelt wurden. Sie werden über eine übergeordnete Echtzeitsteuerung synchronisiert und mit Bahndaten versorgt.

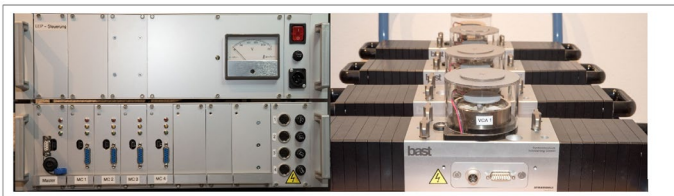


Bild 1: Längsebenheitsprüfstand Steuerung und Aktuatoren

Die Montagebasis für die VCA darf sich während eines Simulationslaufs keinesfalls bewegen, auch nicht bei extrem dynamischen Bewegungen des VCA. Das würde die Abstandsmesswerte des zu testenden Systems verfälschen. Sie ist daher seitlich mit Zusatzgewichten beschwert.

Die Simulationsgeschwindigkeit und die am zu testenden Messsystem eingestellte Messgeschwindigkeit sollten um nicht mehr als 0,1 % voneinander abweichen, damit die Ergebnisse durch die Geschwindigkeitsdifferenz nicht zu sehr beeinträchtigt werden.

Als Bedieneinheit kommt ein Laptop zum Einsatz, über den der Benutzer die Simulationsprofile vorgeben, den Prüfstand steuern und die Messdaten auswerten kann.

4 Folgerungen für die Praxis

Auf der Basis des Erfahrungshintergrunds, der im Rahmen der Arbeit mit den 1-cm-Werten gewonnen wurde, wird empfohlen bei Längsebenheitsmessungen die Speicherung der 1-cm-Werte und deren Übergabe an die Auftraggeber zum zukünftigen Standard zu machen. Ein entsprechendes Datenformat kann in Anlehnung an die bereits existierenden Formate definiert werden. Die Datenmenge bleibt im Verhältnis zu den ohnehin erhobenen Videodaten gering und stellt bei den heutigen Speichertechnologien kein Problem dar. Den Messgeräte-Betreibern sollte eine Übergangsfrist von ein bis zwei Jahren eingeräumt werden, um ihre Datenerfassungs- und Auswertesysteme anpassen zu

können. Denkbar wäre eine Einführung zunächst bei den Abnahmemessungen und in einem zweiten Schritt bei der netzweiten ZEB.

Vor der Kombination des symmetrischen mit dem asymmetrischen Profil zum Wahren Höhenlängsprofil wird bei dem standardisierten Algorithmus das asymmetrische Profil durch einen rekursiven Hochpassfilter geschickt. Dieser Filterdurchlauf ist im Grunde überflüssig, da die Anbindung des symmetrischen an das asymmetrische Profil die Hochpassfilterung überflüssig macht. Durch die Anwendung des rekursiven Filters wird eine Phasenverschiebung erzeugt, die das Wahre Höhenlängsprofil geringfügig verfälscht. Auf die Anwendung des Filters sollte daher künftig verzichtet werden.

Der in der Arbeit gewonnene Erfahrungshintergrund basiert bisher allein auf den Messergebnissen eines Messsystems. Es ist zu prüfen, ob andere Messsysteme an Übergangskonstruktionen und Einbauten vergleichbare Messdaten aufzeichnen. Dies wird von den verwendeten Abstandssensoren und deren Konfiguration abhängen.

Bei Verwendung der 1-cm-Abstandswerte kommt der präzisen Synchronisation der Abstandssensoren eine erhöhte Bedeutung zu, sowie deren Fähigkeit höhere Frequenzen ausreichend genau zu erfassen. Mithilfe des im Rahmen der Arbeit entwickelten Längsebenheitsprüfstands sollten künftig dynamische Prüfungen von Längsebenheitsmesssystemen möglich sein, bei denen Bandbreite und Jitter der Abstandssensoren ermittelt werden können.

Für die automatische Erkennung konstruktiv bedingter Einzelhindernisse wurden in der Arbeit ausschließlich die Längsebenheitsdaten herangezogen. Mit den Längsprofildaten allein wird sich jedoch keine 100-prozentige treffsichere automatische Unterscheidung zwischen konstruktiv bedingten Einzelhindernissen und Oberflächenschäden realisieren lassen. Eine ergänzende automatische Auswertung der Videoaufnahmen hingegen könnte die Erkennungsrate voraussichtlich weiter verbessern, da sich die konstruktiv bedingten Einzelhindernisse im zweidimensionalen Bild, auch aufgrund ihrer metallischen Oberfläche, wesentlich klarer von der übrigen Straßenoberfläche unterscheiden lassen, als das in den eindimensionalen Längsebenheitsdaten der Fall ist.

Die Speicherung der 1 cm-Abstandsdaten würde es zukünftig erlauben, ergänzend zu dem Wahren Höhenlängsprofil, welches eine Ortsauflösung von 10 cm besitzt, ein Höhenlängsprofil mit einer Ortsauflösung von 1 cm zu berechnen. Dazu könnten die 1-cm-Abstandswerte in ähnlicher Weise mit dem Wahren Höhenlängsprofil verknüpft werden, wie das asymmetrische Profil mit dem symmetrischen Profil zum Wahren Höhenlängsprofil kombiniert wird.

5 Literatur

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – FGSV (2009): Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung (TP Eben), Teil: Berührungslose Messungen.
- MAERSCHALK, UECKERMANN, HELLER (2011): "Längsebenheitsauswerteverfahren Bewertetes Längsprofil", Berichte der BASt, Heft S73
- UECKERMANN, A. (2004): Ein geometrisch basiertes Verfahren zur Lokalisierung und Bewertung einzelner, periodischer und regelloser Unebenheiten im Straßenprofil