



Noor Ahmad

Crack detection in asphalt pavements by means of Ground Penetrating Radar (GPR)

2016

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation.

Eingereicht am: 22 Oktober 2015

Disputation am: 21 Juni 2016

Berichterstatter: Professor Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba
Professor Dr Andreas Hördt

Vorwort

Dr.-Ing. Noor Ahmad, geb. 1978 in Pakistan, Bauingenieur der Balochistan University of Engineering and Technology (Diplomstudium) und der Technischen Universität München (Aufbaustudium M.Sc. in Transportation Systems), war von 2010 bis 2013 im Rahmen eines DAAD-Stipendiums als Doktorand am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig tätig.

Das Thema dieser Arbeit ist der messtechnischen Zustandserfassung von Asphaltstraßen mit Hilfe von Bodenradar gewidmet. Die Zustandskontrolle und die Erhaltungsplanung von Straßen basiert auf Informationen zum jeweils aktuellen strukturellen Zustand und auf einer Vorhersage der zu erwartenden Zustandsentwicklung. Die Zustandserfassung erfolgt heute optisch und messtechnisch auf mehrfache Weise. Zu den aussagekräftigen messtechnischen Methoden zählen zerstörende Verfahren. Dabei werden Probestücke, meist Bohrkern, aus der Straße entnommen und an diesen mechanische Kennwerte bestimmt, die aus zeitraffenden statischen und zyklischen Laborprüfungen gewonnen werden. Die Nachteile solcher zerstörender Verfahren sind der versuchstechnisch große Aufwand, dass die Probe, die an einem Punkt oder an wenigen Punkten innerhalb der vergleichsweise riesigen Straßenfläche entnommen wurde, nicht a priori repräsentativ ist, und dass die Straße durch die Probenahme selbst geschädigt wird.

Eine mögliche Alternative sind nichtzerstörende Messverfahren. Dabei wird mittels Schall- oder Wellenphysik auf den strukturellen Zustand der Straße geschlossen. Beispiele sind fotooptische Methoden zur Rissaufnahme, das Fallgewichtsdeflektometer zur Ermittlung der Tragfähigkeit, die Thermografie zur Ermittlung von Inhomogenitäten in der Temperaturverteilung, oder das elektromagnetische Wellenverfahren ‚Bodenradar‘ zur Erfassung des Straßenaufbaus. Von Vorteil ist, dass solche nichtzerstörende Messverfahren darauf ausgelegt sind, nicht ausschließlich punktuelle, sondern auch flächendeckende Informationen zum Straßenzustand zu generieren, die vorzugsweise während der Überfahrt bei Fahrgeschwindigkeiten bis 80 km/h gewonnen werden. Die Anwendung des Bodenradars für die Straßenzustandserfassung ist bezüglich der Bestimmung von Schichtdicken und der Lagebestimmung von Stahleinlagen in Betondecken rund 30 Jahre alt und gilt als erprobt. Vergleichsweise neu ist die Anwendung des Bodenradars zur Detektion von Fehlstellen, und insbesondere von Rissen in Asphaltstraßen.

Das Prinzip von Bodenradar basiert auf elektromagnetischen Radarwellen, die sich in einem Medium ausbreiten und an benachbarten andersgearteten Medien abgelenkt werden, sodass das Zeitdiagramm der reflektierten Wellenanteile, das sog. Radargramm, ein Bild der unterschiedlichen Medien ergibt. Die Technik funktioniert grundsätzlich in vielerlei Medien, so auch in ungebundenen Schichten, Asphalt und Beton. Die ‚Andersartigkeit‘ von zwei Medien wird durch die Dielektrizitätskonstante beschrieben, welche für Luft bei 1, für Asphalte zwischen 4 und 10 liegt, für tonige Böden bei 25 bis 40 und für Wasser bei

80. Aufgrund dieser großen Unterschiede in den Dielektrizitätskonstanten ist eine Rissdetektion in Asphaltstraßen grundsätzlich denkbar, insbesondere wenn der Riss mit Wasser und/oder Schmutz gefüllt ist. Dabei werden die vom Sender emittierten elektromagnetischen Radarwellen über den zu untersuchenden Rissbereich hinwegbewegt, abgelenkt und vom Empfänger detektiert und schließlich die Beschreibung von Rissbreite und -tiefe angestrebt.

In Konferenzbeiträgen und bei internationalen Fachausstellungen wurde mehrfach von der erfolgreichen Anwendung des Bodenradars zur zielsicheren flächendeckenden Detektion von Rissen in Straßen und Flugbetriebsflächen berichtet. Es fehlten aber die notwendigen Detailinformationen zur Nachvollziehbarkeit. Es fehlte der wissenschaftliche Beweis. Aus diesem Grund wurde die vorliegende Promotion initiiert, deren Ziel es war, mit Hilfe von systematischen Untersuchungen die Forschungsfrage zu klären, ob und wenn ja unter welchen Bedingungen das Bodenradar als Routinemessverfahren zur Rissdetektion in Asphaltstraßen geeignet ist bzw. dazu weiterentwickelt werden kann. Insbesondere wurde untersucht, wie folgende Einflussfaktoren die Qualität der Rissdetektion beeinflussen: (1.) die Wahl der Hardware und die Einstellung der systembedingten Messparameter des Bodenradars, (2.) die Eigenschaften des Messobjektes, wie die Materialeigenschaften der Straße, die Temperatur, die Rissbreite und -tiefe sowie eine eventuelle Rissfüllung durch Wasser oder Schmutz, und (3.) die Wahl der Auswertesoftware und den Möglichkeiten zur Aufbereitung und Analyse der Messdaten.

Die Arbeit von Dr.-Ing. Ahmad im Rahmen seiner Promotion bestand im Wesentlichen aus drei Teilen: Der erste Teil war gewidmet einer umfassenden Recherche und Dokumentation unterschiedlicher Systeme für Bodenradarmessungen sowie einer Marktanalyse. Diese Arbeiten mündeten in der Spezifikation jenes Messsystems, welches durch das ISBS beschafft wurde und ab Sommer 2011 zur Verfügung stand. Im zweiten Teil führte Herr Ahmad umfangreiche Test- und Messreihen zur Rissdetektion im Labor und auf der Straße durch. Der dritte Teil war schließlich der Aufbereitung und Interpretation der Messdaten gewidmet und der Beantwortung der Forschungsfrage.

Als wichtige Teilergebnisse der Arbeit können für das hier eingesetzte Bodenradar-System und die gewählte Messmethodik festgehalten werden: (1.) Eine Erfassung von Netzkissen war nicht möglich. (2.) Weil Einzelrisse in Straßen überwiegend vertikal zur Oberfläche verlaufen, ist die Detektion mittels einfacher Antennen mit vertikalem oder schrägem Messwinkel nicht zielsicher möglich. Die Verwendung einer Dipolantenne bzw. mehrerer Antennen gleichzeitig verbessert die Erfassung. (3.) Einzelrisse konnten mittels der bodengekoppelten Dipol-Antenne mit mindestens 2 mm Messabstand, im Frequenzbereich von 2 GHz und mit Hilfe der in der Arbeit beschriebenen Auswertemethode „time delay technique“ detektiert werden. (4.) In den Radargrammen zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen breiten und schmalen, sowie kurzen und langen Vertikalrissen. (5.) Eine Verfüllung des Risses mit Schmutz und/oder Wasser war für die Erkennung vorteilhaft, weil sich die Dielektrizitätskonstanten von Füllstoffen deutlich von jenen für

Asphalt unterscheiden. (6.) Die Qualität der Rissdetektion ist abhängig von der Messtemperatur. Es wird empfohlen, Messungen nicht unter 15 °C durchzuführen. (7.) Es wurden Risse mit Abmessungen im Millimeterbereich, mindestens 2 mm breit und 5 mm tief, nur zufällig detektiert. Eine zielsichere Rissdetektion war erst ab Rissgeometrien im Zentimeterbereich möglich, sodass auf der Grundlage dieser Arbeit der Einsatz dieses Systems und dieser Messmethodik für die routinemäßige Zustandserfassung nicht empfohlen wird.

Die vorliegende Arbeit wurde von Herrn Dr.-Ing. Noor Ahmad im Frühjahr 2016 an der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der TU Braunschweig zur Promotion eingereicht und als Promotionsschrift angenommen.

Braunschweig, im Dezember 2016

Michael P. Wistuba

Abstract

This research investigates the possibilities of using Ground Penetrating Radar (GPR) as crack investigation tool for asphalt pavements. The investigation includes crack detection and crack analysis. The crack investigation comprises crack depth and width measurement. Although GPR is being used as a pavement characterisation tool, its use as a crack detection tool has not been verified and systematically documented. In this regard, some parameters affecting GPR use were selected from literature and were verified. These parameters include GPR system attributes, material properties, crack characteristics and data processing techniques. To investigate the GPR hardware related characteristics, six up to date systems were used in laboratory and in field. The selected systems included 250 MHz to 3 GHz frequency antennas with impulse and continuous electromagnetic wave generation techniques. Artificial as well as natural cracks were investigated by the GPR systems to bring forward the optimum system requirements for crack analysis. To investigate the asphalt and crack filling material characteristics, different asphalt mix specimens were prepared from various laboratories in Germany. A range of different width and depth cracks were designed in the asphalt specimens to be tested for crack analysis. Air, sand, bitumen and water were used as crack filling materials to investigate their influence on GPR outcomes. The effect of temperature on material properties was also investigated. Moreover, the relation between crack and electromagnetic wave propagation path was investigated regarding crack detection survey.

The selected software related parameters were based on known techniques used for data processing such as wave processing and image processing. This also included investigations on 2-D and 3-D data processing techniques and f-k filtering and electromagnetic wave velocity analysis. The outcomes of this study were verified in laboratory and on pavements. The pavement survey results were verified by taking core samples. Investigations made in this research may broaden the use of GPR for crack detection in asphalt pavements.

Acknowledgements

I would like to express my greatest gratitude and appreciation to my supervisor Professor Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba and to my co-supervisor Professor Dr.-Ing. Holger Lorenzl (Fachhochschule, Lübeck) respectively, for their valuable guidance, support, and assistance throughout the length of my research work. Without their encouragement and guidance, its completion would not have been possible. Special thanks to Professor Dr. Andreas Hördt (Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, TU Braunschweig) for his valuable guidance.

Sincere thanks to Institut für Straßenwesen TU Braunschweig (ISBS) team for their cooperation and help in conduction of this research. Also thanks for all the fun we have had in the last four years.

I would also like to show appreciation to the financial support of the German Academic Exchange Service (DAAD).

Special thanks go to my parents; I can feel how difficult this whole time was for them in my absence. Lots of love to my wife and children, who stood with me in all the difficult times. I dedicate this thesis to my wife Rehmat and my sweet children Javeria, Hafsa and Talha.

M.Sc. (TUM) Noor AHMAD

Soltau, 20th November, 2016

Contents

Vorwort	I
Abstract	IV
Acknowledgements	V
Contents	VII
1 Introduction	1
1.1 Background information	1
1.2 Objective	2
1.3 Thesis structure	3
2 State-of-the-art.....	5
2.1 Introduction	5
2.2 GPR principles	5
2.2.1 GPR basic components	7
2.2.2 EM wave reflection.....	8
2.2.3 Asphalt pavements and their dielectric constant calculation	9
2.2.4 Probing depth calculation	14
2.3 EM waves characteristics	16
2.3.1 Wavelength	16
2.3.2 Frequency.....	16
2.3.3 Bandwidth.....	17
2.4 GPR hardware system	18
2.4.1 GPR transmitter	20
2.4.2 GPR receiver/antenna	23
2.5 GPR surveying	24
2.5.1 GPR limitations.....	26
2.5.2 EM waves survey angles.....	27
2.5.3 The GPR data.....	28
2.6 Data processing	29
2.6.1 Dewow filtering	30
2.6.2 Background removal.....	31
2.6.3 Time zero correction	32
2.6.4 Time gain	32
2.6.5 Data migration	33
2.7 Literature review	35
2.8 Summary and background of this thesis	44
3 Test program.....	47
3.1 Introduction	47
3.2 The GPR systems used.....	47
3.2.1 Groundvue 3	47
3.2.2 SIR-20.....	48
3.2.3 MALA HF (High Frequency).....	49

3.2.4	GeoScope Array system (3d-radar, Norway).....	49
3.2.5	Detector DUO (IDS)	49
3.2.6	Aladdin (IDS).....	50
3.3	Software.....	51
3.3.1	3dr-Examinar.....	51
3.3.2	GRED-3D.....	51
3.3.3	ReflexW	52
3.3.4	GPR-SLICE.....	52
3.4	Laboratory study.....	52
3.4.1	Asphalt specimens preparation.....	52
a.	Asphalt specimens of type A.....	53
b.	Asphalt specimens of type B.....	59
c.	Asphalt specimens of type C.....	60
3.4.2	Asphalt EM properties	61
3.5	Test sites description	64
3.5.1	Site “A” (Beethovenstraße).....	64
3.5.2	Site “B” (Bültenweg)	66
3.5.3	Site “C” (Holzweg)	66
3.5.4	Site “D” (Gutswiese).....	69
3.6	Aladdin survey procedure.....	71
3.6.1	2-D survey	71
3.6.2	3-D survey	71
3.7	Summary.....	72
4	Crack evaluation through GPR	74
4.1	Introduction	74
4.2	Effects of crack type and material properties	74
4.2.1	Crack geometry	74
4.2.2	The effect of crack type (bottom-up cracking).....	83
4.2.3	Effect of crack fill	91
4.2.4	Effect of temperature.....	95
4.3	Effect of GPR system	98
4.3.1	The influence of GPR transmission technique.....	98
4.3.2	The influence of GPR central frequency.....	101
4.4	Effect of surveying	107
4.4.1	The number of samples per scan	107
4.4.2	Effect of survey angle	115
4.5	Effect of processing techniques.....	122
4.5.1	The f-k filtering	122
4.5.2	The reflected EM wave’s travel time calculation.....	127
4.6	Summary.....	130
5	Conclusions.....	132
5.1	General.....	132

5.2	The crack geometry	132
5.3	The GPR system properties.....	133
5.4	The GPR surveying effects	133
5.5	The processing technique effects	134
5.6	Material electromagnetic properties.....	134
5.7	The crack cause investigation	135
5.8	Practical implications	135
6	References	136
	Appendix: Support loss investigation through GPR.....	141
I.	Introduction	141
II.	Layer's thickness variation investigation.....	141
II.I.	Site C (Holzweg).....	141
II.II.	Site D (Gutswiese)	145
III.	Sub-grade settlement investigation	148
III.I.	Site C (Holzweg).....	148
III.II.	Site D (Gutswiese)	150
IV.	Miscellaneous crack causes investigation.....	152
V.	Summary	153