

## Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

FA 5.173

Forschungsstellen: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau (Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg)

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik (Prof. Dr.-Ing. H. Steeb)

Bearbeiter: Radenberg, M. / Manke, R. / Steeb, H. / Jänicke, R.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Dezember 2015

### 1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Qualität und Gleichmäßigkeit der ungebundenen Schichten beeinflusst die Nutzungsdauer des gesamten Oberbaus einer Straße deutlich. Eine mangelnde Tragfähigkeit dieser Schichten und die daraus entstehenden Verformungen aufgrund von zyklischer Beanspruchung führen allmählich zu Schäden an der Straßenoberfläche. Die Tragfähigkeit ungebundener Schichten wird bisher ausschließlich punktuell durch statische oder dynamische Plattendruckversuche ermittelt und kann somit nicht als maßgebend für die gesamte untersuchte Schicht angenommen werden. Weiterhin sind die derzeit angewandten Prüfungen überwiegend zerstörend und können so keine genaue Angabe über die tatsächliche Struktur und die relevanten Materialeigenschaften für die ungebundene Schicht geben.

Das Ziel dieses Forschungsprojekts war es, Ideen für ein innovatives Messsystem zur möglichst flächendeckenden und zerstörungsfreien Erfassung der Gebrauchseigenschaften ungebundener Schichten im Straßenbau zu erarbeiten, um damit eine nachhaltige Steigerung der Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung zu erreichen.

Mit dem Prüfverfahren soll der ungebundene Aufbau möglichst detailliert, aber auch mit wenig Zeit- und Messaufwand, beschrieben und bewertet werden können.

Im Rahmen dieser Literaturstudie wurden ebenso aus anderen Fachbereichen übertragbare und technisch anpassbare Methoden mit berücksichtigt. Die Quellen und die zusammenfassenden Erkenntnisse der Literaturrecherche werden in einer weitgehend nutzbaren Datenbank gesammelt.

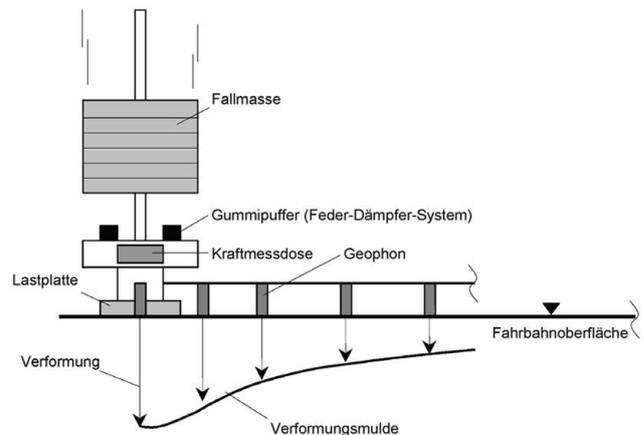
### 2 In-situ-Prüfverfahren

#### 2.1 Tragfähigkeit auf gebundener Befestigung

Zur Erfassung der Tragfähigkeit des gesamten Oberbaus finden auf gebundener Befestigung stationäre Messmethoden wie der Benkelman-Balken beziehungsweise der daraus entwickelte Lacroix-Messwagen oder das Falling Weight Deflectometer (FWD) Anwendung.

Durch Einsenkungsmessungen in der Fahrbahn aus Lasteinwirkung (Radlast beim Lacroix-Messwagen) beziehungsweise Krafteinwirkung (FWD) können über die Kombination punktueller Messungen annähernd flächendeckende Straßenprofile

bezüglich der Tragfähigkeit des Straßenoberbaus erzeugt werden. Bild 1 zeigt das Prinzip des FWD.



**Bild 1: Prinzip der Erzeugung und Messung der Deflexionsmulde [AP Trag Teil B 2.1, 2008]**

Über die gemessenen Verformungen können Informationen in Bezug auf Gesamtsteifigkeit, Tragverhalten und auch eine theoretische Restnutzungsdauer errechnet werden, sodass die Verfahren aufgrund guter Wiederholpräzision und zuverlässiger Datenerfassung ein wichtiger Bestandteil der Zustandserfassung sind. Die Messverfahren liefern zuverlässige Messdaten zu Tragfähigkeitszuständen, die über Rückrechnungen der Steifigkeiten auch in gewissem Maß Schichtanalysen zulassen.

Das Hauptproblem liegt bei diesen Verfahren jedoch in der punktuellen Messung; flächendeckende Straßenprofile können nur abgeschätzt werden, genaue Daten über gesamte Streckenabschnitte liegen anhand dieser Messtechniken demnach nicht vor. Zudem ist die Schichtanalyse nicht zuverlässig genug, da beispielsweise bei mehr als drei Schichten Ungenauigkeiten in den Rückrechnungen auftreten können [AP Trag Teil B 2.1, 2008], [Grätz, B., 2009], [Chakar, C., 2010].

Dazu sind bereits kontinuierlich messende Systeme wie beispielsweise das Curviametro in Anwendung. Mithilfe des Curviametro sind bei geringer Fahrgeschwindigkeit (bis zu 18 km/h) kontinuierliche flächendeckende Tragfähigkeitsanalysen anhand der Verformungsmessung der Fahrbahn infolge von Lasteinwirkung möglich [AP Trag Teil B 4, 2012].

Weitere Tragfähigkeitsmessverfahren, die flächendeckende Analysen von Straßenabschnitten ermöglichen, sind im internationalen Raum zu erkennen. Bei den schnellfahrenden Messsystemen erfolgen die Messungen über Messbalken in der rechten meist belasteten Radspur, an denen die Laser im Belastungszentrum sowie in bestimmten Abständen zum Belastungszentrum angeordnet sind. Bei den Messungen wird häufig die Technik der Deflexionsmessungen in der Fahrbahn mithilfe von Triangulations-Lasern oder Doppler-Lasern eingesetzt. Auch die Umwandlung von Bodenschwingungen in Spannungssignale über Geophon-Sensoren gekoppelt mit schnellfahrenden Messfahrzeugen wird genutzt. Somit ist die Erzeugung flächendeckender Tragfähigkeits-Straßenprofile ohne größere Verkehrsbehinderung möglich. Jedoch lässt die Analy-

se der Tragfähigkeit über Deflexionsmessungen keine exakten Bewertungen der einzelnen Schichten oder des Korngefüges zu, sodass die Entwicklung und Anwendung weiterer Techniken durchaus sinnvoll ist. Teilweise werden diese Techniken nur zum Aufspüren zu verbessernder Abschnitte genutzt. Die Laser-Doppler-Technik des TSD (Traffic Speed Deflectometer) nutzt im Gegensatz zur Triangulationslasertechnik die Erfassung der Geschwindigkeit der Deflexionsausprägung und macht somit neben der Bewertung des Straßenzustands die Lokalisierung von Abschnitten mit großem Schadenspotenzial möglich [Elseifi, M. et al., 2012], [Greenwood Engineering, 2015].

Bild 2 zeigt vergleichend die aktuellen Tragfähigkeitsmesssysteme auf gebundener Befestigung.

Tragfähigkeitsmesssysteme	auf gebundener Befestigung	<b>Benkelmann – Balken / Lacroix – Messwagen</b> - Stationäres Messsystem zur Erfassung der Steifigkeit bzw. des Tragverhaltens des gesamten Oberbaus 3 km/h beim Lacroix – Messwagen - Einsenkungsmessungen durch Radlasteinwirkung - Ermittlung einer theoretischen Restnutzungsdauer - durch Kombination der punktuellen Messungen ist eine annähernd flächendeckende Erzeugung von Straßenprofilen möglich
		<b>Falling Weight Deflectometer (FWD)</b> - Stationäres Messsystem für die Analyse auf Asphaltoberflächen, aber auch anwendbar auf ungebundener Oberfläche 0 km/h - Deflexionsmessungen mittels Geophone über Kraftimpuls und Ableitung von Verformungsmodul und die Tragfähigkeit des gesamten Oberbaus und einzelner Schichten - durch Kombination der punktuellen Messungen ist eine annähernd flächendeckende Erzeugung von Straßenprofilen möglich
		<b>Curviometro</b> - Kontinuierliches, flächendeckendes Messsystem 18 km/h - Deflexionsmessungen mittels Geophone durch Radlasteinwirkung und Ableitung von Verformung des Oberbaus
		<b>Traffic Speed Deflectometer (TSD)</b> - Schnellfahrendes Messsystem zur kontinuierlichen, flächendeckenden Analyse 40 bis 80 km/h - Erfassung der Deflexionsgeschwindigkeiten über Laser-Doppler-Technik
		<b>Rolling Wheel Deflectometer (RWD)</b> - Schnellfahrendes Messsystem zur kontinuierlichen, flächendeckenden Analyse bis zu 100 km/h - Deflexionsmessungen über Triangulationslaser
		<b>Road Deflection Tester (RDT)</b> - Schnellfahrendes Messsystem zur kontinuierlichen, flächendeckenden Analyse bis zu 100 km/h - Deflexionsmessungen über Triangulationslaser - Datenerfassung durch schräge Ausrichtung der Laser über die gesamte Breite der Fahrbahn
		<b>Rolling Dynamic Deflectometer (RDD)</b> - Messsystem zur Analyse stark belasteter Fahrbahnen 3 bis 5 km/h - Deflexionsmessungen über Geophone und dynamisches Belastungssystem zur Erzeugung starker Belastungen
		<b>Airfield Rolling Weight Deflectometer (ARWD)</b> - Messsystem zur Analyse stark belasteter Fahrbahnen bis zu 32 km/h - Deflexionsmessungen über Triangulationslaser

Bild 2: Tragfähigkeitsmesssysteme auf gebundener Befestigung

## 2.2 Tragfähigkeit auf ungebundener Befestigung

Die Überprüfung der Tragfähigkeit ungebundener Schichten erfolgt überwiegend mit der Betrachtung von Verformungsmoduln. So erfolgt diese mithilfe statischer und dynamischer Plattendruckversuche, die über Setzungsmessungen infolge stufenweiser Be- und Entlastung (statischer Plattendruckversuch) oder infolge von Kraftstößen über ein Fallgewicht (dynamischer Plattendruckversuch) punktuell die Tragfähigkeit des Bodens ermitteln können [DIN 18134, 2012], [TP BF-StB Teil B 8.3, 2012].

Den Vorteilen der präzisen Ergebnisse mit hoher Wiederholgenauigkeit steht gegenüber, dass aufgrund punktueller Messungen keine flächendeckenden Analysen möglich sind.

Zusätzlich wird die FDVK-Prüfmethode (Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle) eingesetzt, bei der durch den Schwingungseintrag in den Boden über eine Vibrationswalze Daten bezüglich des Verdichtungsgrades sowie des Verformungsmoduls des Bodens erfasst werden. Die schnelle, zuverlässige und flächendeckende Anwendung wird zumeist zur Steuerung und Optimierung von Verdichtungsarbeiten genutzt, dient jedoch in dieser Form nicht zur Erfassung von Tragfähigkeitszuständen bereits genutzter Flächen [TP BF-StB Teil E 2, 1994].

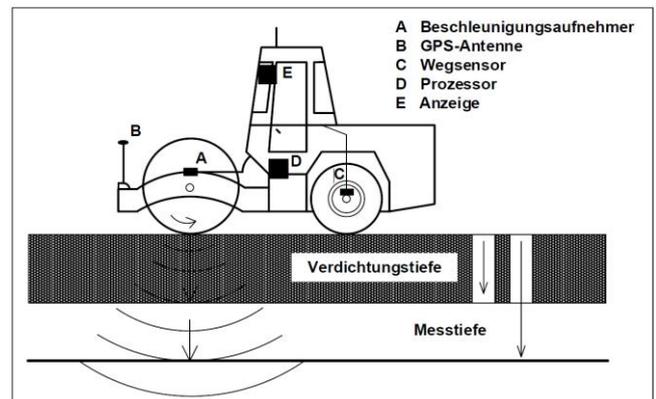


Bild 3: Walzenzug für FDVK-Messungen (Prinzipische Skizze) [Merkblatt FDVK, 1993]

Bild 4 zeigt vergleichend die aktuellen Tragfähigkeitsmesssysteme auf ungebundener Befestigung.

Tragfähigkeitsmesssysteme	auf ungebundener Befestigung	<b>Statischer Lastplattendruckversuch</b> - Punktueller Messsystem zur Erfassung von Verdichtungsgrad, Verformungsmodul und Tragfähigkeit - Setzungsmessungen durch stufenweise Be- und Entlastung
		<b>Dynamischer Plattendruckversuch</b> - Punktueller Messsystem zur Erfassung von Verdichtungsgrad, Verformungsmodul und Tragfähigkeit - Setzungsmessungen über Kraftstoß
		<b>Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)</b> - Flächendeckendes Messsystem zur Steuerung und Optimierung von Verdichtungsarbeiten - Schwingungseintrag in den Boden über Vibrationswalzen und Abschätzung der Steifigkeit des Bodens über Kraft-Weg-Diagramm

Bild 4: Tragfähigkeitsmesssysteme auf ungebundener Befestigung

### 2.3 Georadar

Das Georadar (Ground Penetrating Radar – GPR, auch Bodenscanner) ist eine geophysikalische Messmethode, mit der in situ die räumliche Ausdehnung des Schichtaufbaus im Untergrund, von Hohlräumen oder von Fremdkörpern nahe der Oberfläche abgebildet werden kann.

Zur Durchführung von Georadar-Messungen werden von einer Antenne omnidirektional elektromagnetische Breitbandsignale (1 MHz – 2 GHz) mit hoher Wiederholungsrate durch das zu untersuchende Medium gesendet. Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen hängt dabei stark von den jeweiligen Materialeigenschaften ab. Durch Kontraste in der Dielektrizität und der Leitfähigkeit der durchstrahlten Medien kommt es an Diskontinuitäten und in stark heterogenen Materialien zur Absorption, Streuung oder Reflexion der elektromagnetischen Wellen. An der Oberfläche werden die gestreuten und/oder reflektierten Signale von einer Empfangsantenne aufgezeichnet. Ist die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Untersuchungsmaterial bekannt, kann aus diesen Daten mittels Laufzeitmessungen der Abstand der jeweiligen Streu- oder Reflexionsquelle von der Oberfläche präzise bestimmt werden [Ziekur, 2000; Jol, 2008].

Aufgrund der Empfindlichkeit des Messverfahrens für Kontraste in den elektrischen sowie den magnetischen Materialeigenschaften eignet sich das Georadar besonders für Medien mit einer heterogenen oder gradierten Wassersättigung. Je nach Grad der Absorption und der Streuung im untersuchten Medium sind Eindringtiefen im Meterbereich sowie eine räumliche Auflösung im Zentimeterbereich möglich.

Das Georadar stellt bereits heute ein etabliertes Verfahren unter anderem zur Schadensdetektion in Asphaltdeckschichten dar. Hier besteht die Aufgabe des Verfahrens darin, durch die Laufzeitmessung reflektierter Signale Hohlräume, Delaminationen oder Störungen im Schichtenaufbau zu detektieren. Das Verfahren arbeitet berührungslos und eignet sich aufgrund des verwendeten hohen Frequenzbereichs und der hohen Impulswiederholungsrate zu einer kontinuierlichen zweidimensionalen Anwendung und zur schnellen sowie flächenmäßigen Erfassung von Schichtdicken und Feuchtegehalten. Insbesondere zu den mechanischen Eigenschaften sowie der Dichte des untersuchten Aufbaus können mit diesem Verfahren keine quantitativen Aussagen getroffen werden. Eine Übertragung auf die systematische Untersuchung ungebundener und somit hydraulisch permeabler Schichten ist aufgrund der hohen Sensitivität des Verfahrens für Kontraste des schwer steuerbaren Feuchtegehalts kritisch zu sehen. Es bleibt zu prüfen, ob das Georadar zur Überprüfung der Schichtdicken beziehungsweise der Gleichmäßigkeit der Eigenschaften eingesetzt werden kann.

### 2.4 Seismische Verfahren

Im Rahmen seismischer Verfahren (Geoseismik) erfolgt eine zerstörungsfreie Untergrundprüfung durch mechanische Anregung im akustischen Frequenzbereich (in der Regel < 1 kHz). Die akustische Anregung kann kontinuierlich erfolgen (Vibro-seis-Verfahren) oder gepulst (Schlag- beziehungsweise Impulshammer). Als Detektoren werden Arrays von Geophonen eingesetzt. Die Geoseismik umfasst drei unterschiedliche

Techniken: 1) Reflexionsseismik (Laufzeitmessung von akustischen Wellen). Erfasst werden Longitudinalwellen (P-Wellen), die an Schichtgrenzen detektiert werden. Für die Baugrundprüfung im Straßenbau eignet sich besonders die Split-Spread-Methode. Mit dieser Methode lassen sich sehr einfach die Tiefe der Schichtgrenzen sowie die Wellengeschwindigkeiten in den jeweiligen Schichten bestimmen. Eine schnelle und kontinuierliche Messung ist möglich. 2) Refraktionsseismik. Erfasst werden ebenfalls Laufzeiten, die Modenkonzersion, zum Beispiel Scher- und Longitudinalwellen (S-/P-Wellen), ist jedoch komplexer als bei der Reflexionsseismik (vgl. Sloan et al., 2013). An Schichtgrenzen, an denen die akustische Welle auf eine dichtere Folgeschicht, mit einem damit verbundenen Impedanzkontrast, trifft, werden darüber hinaus Oberflächenwellen erzeugt, die für die Dateninterpretation mit herangezogen werden können. 3) Oberflächenwellenseismik. Ausgewertet wird das stark dispersive Verhalten seismischer Oberflächenwellen vom Scholte-, Stoneley-, Rayleigh- und Love-Typ (vgl. Zywicki, D. J., 1999). Neben der Phasengeschwindigkeit hängt auch die Eindringtiefe stark von der Frequenz ab. Damit ist mit dieser Messmethode auch die Auswertung der Scherwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Tiefe gegeben. Oberflächenwellenseismik eignet sich zur flächig ausgedehnten Baugrunduntersuchung.

## 3 Laborprüfverfahren

### 3.1 Bildgebende Verfahren

Neben den bis hier beschriebenen In-situ-Messverfahren können zerstörungsfreie, bildgebende Messmethoden auch für einzelne Proben im Labor herangezogen werden.

Röntgentomografieverfahren erlauben dabei Auflösungen bis ca. 1e-6m/Voxel bei komfortabler Bedienung und Scanzeiten im Bereich von einigen Stunden (vgl. Stock, 2008). Auf Basis der dreidimensionalen Tomografiedaten kann eine Vielzahl von wichtigen effektiven Eigenschaften von Böden ermittelt werden, wie zum Beispiel die Porosität (Porenzahl), die mittlere Korngröße oder die geometrische Tortuosität. Darüber hinaus bieten diese Methoden aber auch den großen Vorteil, dass man für die oben genannten Größen die statistische Verteilung innerhalb der Probe ermitteln kann, das heißt Porengrößenverteilungen, Korngrößenverteilungen etc. Aufwendige Laboruntersuchungen, zum Beispiel auf Basis von Quecksilberporosimetrie oder Lasergranulometrie, können reduziert oder gar ganz vermieden werden. Des Weiteren lassen sich auf Basis der 3-dimensionalen Tomografiedaten effektive physikalische Materialeigenschaften (Permeabilität, Re-abhängige Tortuosität, Steifigkeiten, elektrische Leitfähigkeiten etc.) mittels numerischer Porenraumsimulationen ("Digital Material Laboratory") ermitteln.

Die Verfahren erlauben eine feldliche Auswertung und Charakterisierung von Proben unter Laborbedingungen. Die Probenpräparation, das heißt die Gewinnung der Probe aus einer Tragschicht, zerstört dabei lokal den Straßenaufbau. Darüber hinaus kann der "in situ"-Zustand nie vollständig erhalten bleiben. Das betrifft insbesondere den Spannungszustand, aber natürlich auch morphologische Größen der Probe. Deswegen ist vor allem bei der Probenentnahme mit äußerster Vorsicht vorzugehen.

Die tomografischen Charakterisierungsmöglichkeiten sind enorm vielfältig. Die aus technischer Sicht möglichen Auflösungen (bis ca. 50 nm in Röntgenmikroskopen) sind für Tragschichtuntersuchungen sicherlich ausreichend. Der Nutzer kann bei der Auswertung der 3-dim-CT-Daten auf etablierte kommerzielle Auswertesoftware (zum Beispiel Simpleware<sup>®</sup> oder Avizo<sup>®</sup>) zurückgreifen. Darüber hinaus sind auch freie ("Open Source") Softwarelösungen verfügbar (zum Beispiel ImageJ).

Darüber hinaus sind in verschiedenen Tomografiesystemen auch physikalische Experimente (zum Beispiel Triaxialversuche) mit bildgebenden Methoden kombinierbar. Damit kann der Nutzer mechanische Materialparameter wie "Steifigkeiten" mit statistischen morphologischen Daten verbinden.

Auf Basis der 3-dim-Tomografiedaten numerische Simulationen durchzuführen, erlaubt ebenfalls eine numerische Prognose von effektiven Materialeigenschaften – sicherlich eine interessante Methode für zukünftige Untersuchungen.

### 3.2 Schall- und Ultraschallverfahren

Im Gegensatz zu den oben genannten Tomografieverfahren können mit schall- beziehungsweise ultraschallbasierten (20 kHz – 10 MHz) Verfahren aus den experimentell erhaltenen Laufzeiten von "Puls-Echo", "Through-Transmission"-Untersuchungen oder Oberflächenwellen, akustische Wellengeschwindigkeiten (zum Beispiel P- und S-Wellen) beziehungsweise Scher- und Elastizitätsmodul (G,E) direkt bestimmt werden. Die gewählte Frequenz (Wellenlänge) des Signals bestimmt dabei die Auflösung der Untersuchung. Dämpfung und intrinsische Längenparameter (zum Beispiel Korndurchmesser) limitieren allerdings dabei die Frequenz, die für Böden gewählt werden kann. Darüber hinaus beschränkt der niedrigere Schalldruck hochfrequenter Schallköpfe die Eindringtiefe in die Bodenprobe. Für Böden, die in der Bautechnik relevant sind, wird deswegen der (sehr) tieffrequente Ultraschallbereich (20 kHz < f < 500 kHz) häufig gewählt.

Die zerstörungsfreie Ermittlung von Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten kann unter "In-situ"-Bedingungen im Feld, vorzugsweise aber unter Laborbedingungen stattfinden. Unter Laborbedingungen muss allerdings wieder die Problematik der Probenentnahme berücksichtigt werden. Der Vorteil von Laboruntersuchungen liegt allerdings, bei erfolgreicher Probenpräparation, in der Möglichkeit, Ultraschallexperimente mit realistischen mechanischen Belastungsszenarien zu koppeln. Im Feld können zerstörungsfreie Oberflächenwellenanalysen verwendet werden. Die moderne Schallkopftechnik erlaubt darüber hinaus eine berührungslose ("luftgekoppelte") Ankopplung der piezoelektrischen Schallköpfe. Somit sind wenigstens hypothetisch auch Überfahrten und damit großflächige Untersuchungen möglich.

## 4 Ansätze zur Modifizierung der vorhandenen Prüfverfahren

Für die zerstörungsfreie Untersuchung und Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der verdichteten Schichten werden im Folgenden zwei erfolgversprechende Methoden vorgeschlagen. Bei beiden Methoden sind die technischen Voraussetzungen (Aktuatoren, Messtechnik) grundsätzlich

vorhanden; die Anpassung an die Herausforderungen im Straßenbau (Korndurchmesser, Schichtdicken) und die Methoden zur Dateninterpretation sind allerdings noch anwendungsspezifisch zu entwickeln.

### 4.1 Harmonische Deflektometrie

Die "Harmonische Deflektometrie" ist eine Weiterentwicklung des Falling Weight Deflectometers (FWD) und des Dynamischen Plattendruckversuchs. Grundidee der Weiterentwicklung ist, dass der Boden über eine angekoppelte Lastplatte mit einer definierten harmonischen Sinusschwingung angeregt wird. Die Anregung kann entweder durch eine magnetische Tauchspule ("Voice Coil") oder alternativ über piezoelektrische Aktuatoren erfolgen. Tauchspulen arbeiten bei einer Amplitude bis in den Millimeterbereich in einem Frequenzbereich von bis zu einigen Hundert Hertz. Piezoelektrische Aktuatoren dagegen haben eine maximale Amplitude bis ca. 100 Mikrometer, können aber bis zu 10 kHz angeregt werden. Berührungslose Wegaufnehmer (kapazitive Aufnehmer oder Wirbelstromaufnehmer) oder alternativ Geophone beziehungsweise Beschleunigungsaufnehmer sind zur weiteren Auswertung der Antwortsignale in einem definierten Abstand zur Lastmitte angebracht, vgl. Bild 5. Im Rahmen der harmonischen Deflektometrie sind, vor allem auch im Rahmen der Dateninterpretation der Messgrößen, weitere Entwicklungen notwendig. Dazu ist ein mathematisches Optimierungsproblem des Schichtaufbaus zu formulieren und anschließend zu lösen ("inverses Problem"). Insbesondere die sehr gut definierte Anregung (monochromatisch) bietet hierfür aber ein enormes Potenzial.

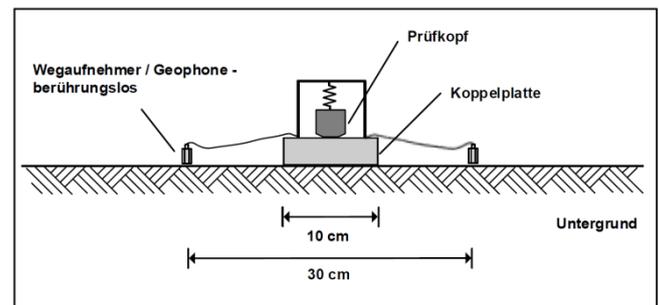
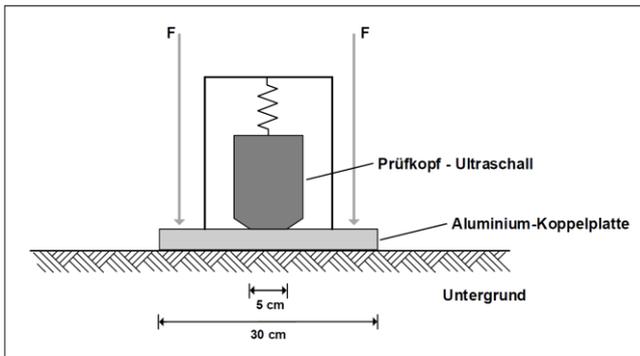


Bild 5: Harmonische Deflektometrie

### 4.2 Reflexionsmessungen

Ein weiteres dynamisches Messverfahren stellen akustische Reflexionsuntersuchungen (Puls-Echo-Verfahren) im Ultraschallbereich dar (hier tieffrequenter Ultraschallbereich < 100 kHz). Über eine Aluminiumplatte mit definierten Materialparametern wird ein tieffrequenter piezoelektrischer Schallkopf an den Boden angekoppelt. Der piezoelektrische Breitband-Schallkopf agiert in diesen Versuchen einerseits als Aktuator und andererseits auch als Empfänger. Die Wellenlänge des Erregersignals wird dabei an die inhärente Mikrostruktur des Bodens beziehungsweise der Schichtdicken angepasst und so groß gewählt, dass Streuung, und damit effektive Signaldämpfung, an den einzelnen Körnern vermieden wird. Andererseits muss die Wellenlänge klein genug gewählt werden, um die zu erwartenden Schichtdicken präzise auflösen zu können. Moderne piezoelektrische, breitbandige P-Wellen-Ultraschallköpfe

(Karl Deutsch, Wuppertal; Olympus/Panametrics) sind dafür grundsätzlich geeignet, müssen aber gegebenenfalls noch angepasst werden, um eine optimale Signalübertragung (niedriger Impedanzkontrast) zu gewährleisten. Es bietet sich an, dass die Signalerzeugung über einen Frequenzgenerator (AWG – Arbitrary Wave Form Generator) realisiert wird. Mit einem AWG lassen sich definierte Frequenzbereiche, zum Beispiel mit modulierten Signalen oder Wavelets, gezielt anregen. Die erzeugten Signale (in der Regel  $\pm 10$  V) müssen dann mittels eines Leistungsverstärkers (zum Beispiel E&I 1040L) linear verstärkt werden ( $\pm 400$  V oder evtl. größer), um einen genügend hohen Schalldruck zu erzeugen. Mit dem beschriebenen Setup lassen sich Signale mit einem guten Signal-Rausch-Verhältnis erzeugen, die anschließend in einem "Postprocessing"-Schritt ausgewertet werden können (Bestimmung der über die Schichtdicke gemittelten mechanischen Steifigkeiten).

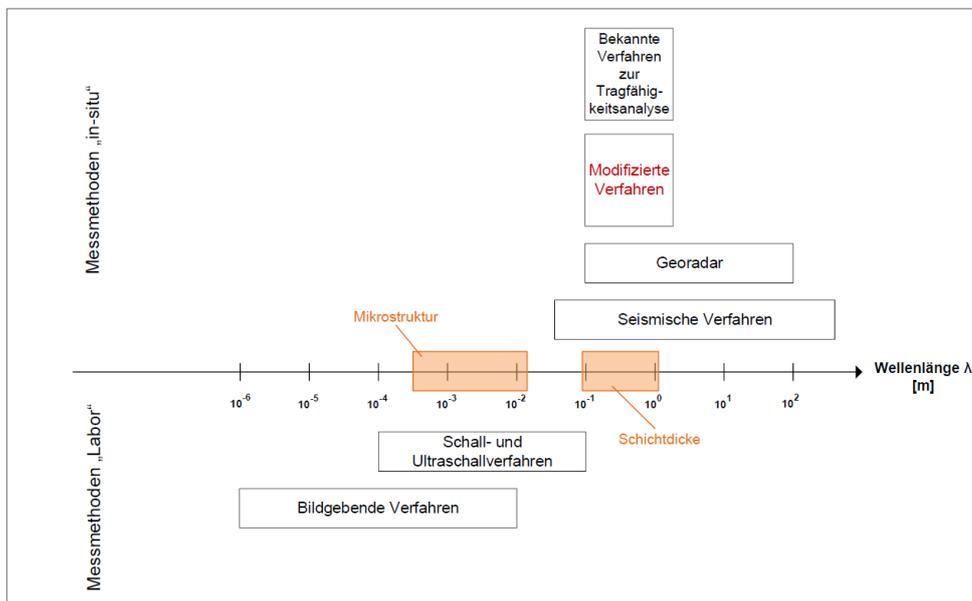


**Bild 6: Reflexionsmessung**

### 4.3 Einordnung zu bestehenden Prüfverfahren

Um sowohl die bestehenden Messmethoden als auch die modifizierten Verfahren, "Harmonische Deflektometrie" und Reflexionsmessung, vergleichend einzuordnen, wurden diese in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$ , das heißt der Ortsauflösung der Verfahren, dargestellt (Bild 7). Auf der einen Seite stehen die bildgebenden und die Schall- und Ultraschallverfahren. Diese Verfahren werden im Labor durchgeführt und decken einen Wellenlängenbereich von ungefähr  $10^{-6}$  bis  $10^{-1}$  m ab. Die Mikrostruktur der zu prüfenden Schicht liegt vergleichend dazu im Bereich zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-2}$  m.

Auf der anderen Seite werden die In-situ-Messverfahren durchgeführt. Dazu zählen das Georadar, die seismischen Verfahren, die bekannten Verfahren zur Tragfähigkeitsanalyse (vgl. Kapitel 2.1) und die modifizierten Verfahren. Anhand Bild 7 ist deutlich zu erkennen, dass sich der Wellenlängenbereich gegenüber den Labormethoden auf  $10^{-1}$  bis  $> 10^2$  m verschiebt und sich mit den In-situ-Verfahren die Bereiche von typischen Schichtdicken gut erfassen lassen.



**Bild 7: Messmethoden in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$**

## 5 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Forschungsprojekts war es, Ideen für ein innovatives Messsystem zur möglichst flächendeckenden und zerstörungsfreien Erfassung der Gebrauchseigenschaften ungebundener Schichten im Straßenbau zu erarbeiten, um damit eine nachhaltige Steigerung der Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung zu erreichen.

Um genaue Angaben über die tatsächliche Struktur und die relevanten Materialeigenschaften für die ungebundene Schicht zu erlangen und somit die ganzheitliche Qualität der ungebundenen Schicht zu beschreiben, wurden Methoden zur zerstörungsfreien und möglichst flächendeckenden Messung erarbeitet.

Eine interdisziplinäre Literaturrecherche, die Auswertung und die theoretische Übertragung auf den ungebundenen Straßenbau führten zu zwei technisch sinnvollen Messmethoden, mit denen genaue Angaben über die tatsächliche Struktur und die relevanten Materialeigenschaften für die ungebundene Schicht erlangt und somit die ganzheitliche Qualität der ungebundenen Schicht beschrieben werden können. Beide Prüfmethode, "Harmonische Deflektometrie" und "Reflexionsmessung", sind vergleichsweise einfach durchzuführende dynamische Messverfahren, bei denen die Messungen an sich jedoch stationär aber zerstörungsfrei stattfinden. Durch wiederholte Messungen in definierten Abständen können die mechanischen Eigenschaften und die Schichtdicken ansatzweise flächendeckend abgeleitet werden.

Um eine annähernd flächendeckende Aussage zu bekommen, ließen sich beide Messmethoden theoretisch mit Georadarmessungen verknüpfen. Nach bisherigen Erfahrungen können moderne Georadarsysteme zur Überprüfung der Schichtdicken und bedingt zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Eigenschaften der zu prüfenden Schicht (Dichte) angewendet werden.

## 6 Literatur

- AP Trag Teil B 2.1: Arbeitspapier Tragfähigkeit: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2008
- AP Trag Teil B 4: Arbeitspapiere Tragfähigkeit: Curviametro, Gerätebeschreibung Messdurchführung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2012
- Chakar, C.: Methode zur Klassifizierung von Tragfähigkeitsmessergebnissen des Falling Weight Deflectometers bei Asphaltbefestigungen. Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Band 59, Karlsruhe, 2010
- DIN 18134: Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2012
- Elseifi, M., Abdel-Khalek, A. M., Dasari, K.: Implementation of Rolling Wheel Deflectometer (RWD) in PMS and Pavement Preservation, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, 2012
- Grätz, B.: Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmearten – Teil 1, Straße und Autobahn, S. 572-580, 9.2009
- Grätz, B.: Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmearten – Teil 2, Straße und Autobahn, S. 664-670, 10.2009
- Greenwood Engineering: [www.green-wood.dk/tsd.php](http://www.green-wood.dk/tsd.php), Traffic Speed Deflectometer, 2015
- Jol, H.: Ground penetrating radar theory and applications, Elsevier, 2008
- Merkblatt FDVK: Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 1993
- Sloan, S. D., Nolan, J. J., Broadfoot, S. W., McKenna, J. R., Metheny, O. M.: Using near-surface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves to detect shallow tunnels: A feasibility study, Journal of Applied Geophysics, 99, S. 60-65, 2013
- Stock, S.: MicroComputed Tomography: Methodology and Applications, CRC Press, 2008
- TP BF-StB Teil B 8.3: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewicht, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2012
- Ziekur, R.: Georadar in der Bodenkunde. Geologisches Jahrbuch der BGR Hannover, Vol. E 52, 9-34, 2000