

# Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 125

**bast**

# Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

von

Martin Radenberg  
Ricarda Manke

Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Holger Steeb  
Ralf Jänicke

Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik

Ruhr-Universität Bochum  
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 125**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 05.0173/2012/ERB:**  
Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

### **Fachbetreuung**

Gudrun Golkowski

### **Herausgeber**

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### **Druck und Verlag**

Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-400-5

Bergisch Gladbach, September 2018

## Kurzfassung – Abstract

### Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Die Qualität und Gleichmäßigkeit der ungebundenen Schichten beeinflusst die Dauerhaftigkeit 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.

Das Ziel dieses Forschungsprojektes 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.

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.

Die beiden Prüfmethoden, 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 Gebrauchseigenschaften 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.

### Potential of innovative measuring systems for earthworks – literature study

The quality and uniformity of unbound layers significantly affects the durability of the entire road pavement. A lack of bearing capacity of these layers and the resulting deformations caused by cyclical load gradually lead to a damaged road surface. The bearing capacity of unbound layers is only selectively determined by static and dynamic plate-loading tests so far and therefore is not to be considered as solely determinative for the examined layer.

The aim of the research project was to develop ideas for an innovative measuring system, which extensively and non-destructively records the performance characteristics of unbound layers in order to achieve a sustainable increase in service life of a road pavement.

An interdisciplinary literature study, the evaluation and the theoretical transfer to the unbound road construction led to two technically practical measuring methods, which give exact information about the actual structure and the material characteristics of unbound layers. Thus, the overall quality of the unbound layer can be described.

Both test methods harmonic deflectometry and reflection measurement are comparatively simply performed measuring systems, where the measurements however, take place stationary, but not non-destructively. Performance characteristics can be derived nearly extensively from repeated measurements in defined intervals.

In order to achieve an extensive assessment both test methods could be theoretically linked to Ground Penetrating Radar measurements. Due to previous experiences modern Ground Penetrating Radar systems can be used for the validation of the layer thickness and for the validation of the uniformity of the properties of the examined layer (density).

## Summary

### Potential of innovative measuring systems for earthworks – literature study

## 1 Problem and Purpose

The quality and uniformity of unbound layers significantly affect the service life of the entire road pavement. A lack in bearing capacity of these layers and the resulting deformations caused by cyclical stress gradually lead to a damaged road surface. Up to now, the bearing capacity of unbound layers is only selectively determined by static and dynamic plate-loading tests and therefore it is not to be considered as decisive for the examined layer. Furthermore, the currently used tests are mainly destructive and cannot give exact information on the actual structure und the relevant material characteristics for unbound layers.

The aim of the research project was to develop ideas for an innovative measuring system, which extensively and non-destructively records the performance characteristics of unbound layers in order to achieve a sustainable increase in service life of a road pavement. With this test method the unbound structure should be described and evaluated as detailed as possible, in a minimum of time and measuring effort. Within the research project transferable and technically adjusted methods from other fields were considered. The references and the summarized knowledge of the literature research are further collected in useable databases.

## 2 In situ test methods

### 2.1 Bearing capacity on unbound layers

Stationary measuring methods like Benkelman-Balken resp. the Lacroix-Messwagen or the Falling Weight Deflectometer (FWD), which were developed from this, are used on bound layers to capture information on the bearing capacity of the entire road pavement. Due to deflection on the surface layer from load influence (wheel load from the Lacroix measuring vehicle) resp. force influence

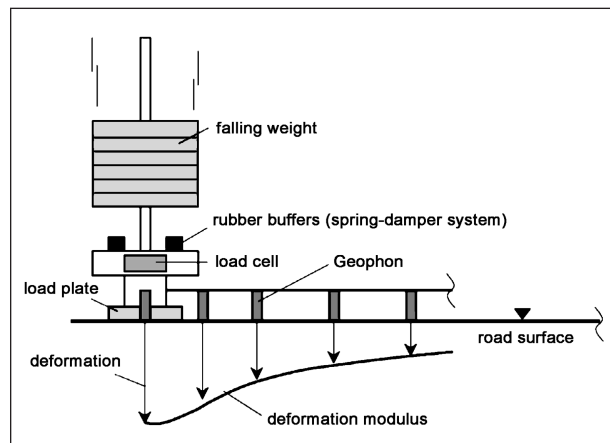


Fig. 2-1: Schematic sketch of the FWD

(FWD), comprehensive road profiles regarding the bearing capacity can be produced by combined punctual measurements. Figure 2-1 shows the schematic sketch of the FWD.

By measuring deformations information relating the overall stiffness, the load-bearing behavior and also a theoretical remaining service life can be calculated, so that the methods are important for state detection because of their repeatability and a reliable data collection. The test methods provide reliable data on load bearing capacities, which to some extent allow layer analyses using back calculation of the stiffness values.

The main problem of these methods is the punctual measurement; comprehensive road profiles can only be estimated, exact data for the whole road section cannot be provided with these test methods. Furthermore, the layer analysis is not reliable enough because there are inaccuracies in the back calculations when having more than three layers [AP Trag Teil B 2.1, 2008; GRÄTZ, B., 2009; CHAKAR, C., 2010].

For this reason continuously measuring systems just as the Curviametro are in use. With the Curviametro continuous and comprehensive bearing capacity analyses based on deformation measurement of the road surface as a result of load are possible [AP Trag Teil B 4, 2012].

Additional bearing capacity measurement methods, which enable comprehensive analyses of road sections, are found internationally. For fast-moving measuring systems the measurements take place in the right and mostly loaded wheel track using a measuring bar, at which the lasers are attached to the load center and also in defined distances from

the center. For these measurements the technique of the deflection measurement is used on the road with the help of triangulation lasers and Doppler lasers. The transformation of ground vibrations into voltage signals with geophone sensors linked to fast-moving measuring vehicles is also used. Therefore, a generation of comprehensive bearing capacity road profiles without major traffic obstruction is possible. The analysis of the bearing capacity with deflection measurements however,

does not allow an exact valuation of the individual layers or the grain structure, so that the development and the application of further techniques is necessary. To some extent these techniques are only used to detect sections which need to be improved. The laser-Doppler-technique of the TSD (Traffic Speed Deflectometer) uses the measurement of speed of deflection in contrast to the triangulate laser technique and therefore enables, besides the valuation of the road condition, the localization of sections with great damage potential [ELSEIFI, M. et al., 2012; Greenwood Engineering, 2015].

Figure 2-2 shows the current bearing capacity measuring systems on bound layers in comparison.

Bearing capacity measuring systems	On bound layers	<b>Benkelmann – Balken / Lacroix – measurements trolley</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- permanent measurement system for acquisition the stiffness and load-bearing capacity of the whole superstructure 3 km/h Lacroix – measurements trolley</li> <li>- Stabilizing agents by wheel load influence</li> <li>- determining of a theoretical remaining useful life</li> <li>- approximate extensive production of street profile are possible by combining the point measurements</li> </ul>
		<b>Falling Weight Deflectometer (FWD)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- stationary measuring system for analyzing asphalt surfaces, but also useable for unbound surfaces 0 km/h</li> <li>- deflection measurement with a Geophone through force impulse and derivation of deformation modulus and the sustainability of the whole superstructure and individual layers</li> <li>- By combining punctual measurements a comprehensive generation of street profiles is possible</li> </ul>
		<b>Curviometro</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- continuous, comprehensive measuring system 18 km/h</li> <li>- deflection measurement with a Geophone through wheel load and derivation of deformation of the superstructure</li> </ul>
		<b>Traffic Speed Deflectometer (TSD)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fast moving measuring system for a continuous and comprehensive analysis 40 to 80 km/h</li> <li>- Detection of deflection velocity with Laser-Doppler-technique</li> </ul>
		<b>Rolling Wheel Deflectometer (RWD)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fast moving measuring system for a continuous and comprehensive analysis up to 100 km/h</li> <li>- deflection measurement with triangulation laser</li> </ul>
		<b>Road Deflection Tester (RDT)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- fast moving measuring system for a continuous and comprehensive analysis up to 100 km/h</li> <li>- deflection measurement with triangulation laser</li> <li>- data collection through diagonal extension of the lasers over the entire width of the road</li> </ul>
		<b>Rolling Dynamic Deflectometer (RDD)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- measuring system for analyzing heavily loaded streets 3 to 5 km/h</li> <li>- deflection measurement with Geophones and a dynamic loading system to produce high loads.</li> </ul>
		<b>Airfield Rolling Weight Deflectometer (ARWD)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- measuring system for analyzing heavily loaded streets up to 32 km/h</li> <li>- deflection measurement with triangulation laser</li> </ul>

Fig. 2-2: Bearing capacity measuring systems on bound layers

## 2.2 Bearing capacity on unbound layers

The bearing capacity of unbound layers is mainly verified by considering the deformation modulus. The analysis is carried out using static and dynamic plate-loading tests, which determine the bearing capacity of soil by measuring the settlement after incremental loading and unloading (static plate-loading test) or after punctually loading the soil with a falling weight (dynamic plate-loading test) [DIN 18134, 2012; TP BF-StB Teil B 8.3, 2012].

The advantage obtaining precise results with a high repeatability is faced with the disadvantage that due to punctual measurements no comprehensive analyses are possible.

Additionally, the FDVK-test method (Flächen-deckende Dynamische Verdichtungskontrolle, meaning comprehensive dynamic compaction control; figure 2-3) is used, where data regarding the degree of compaction resp. the deformation

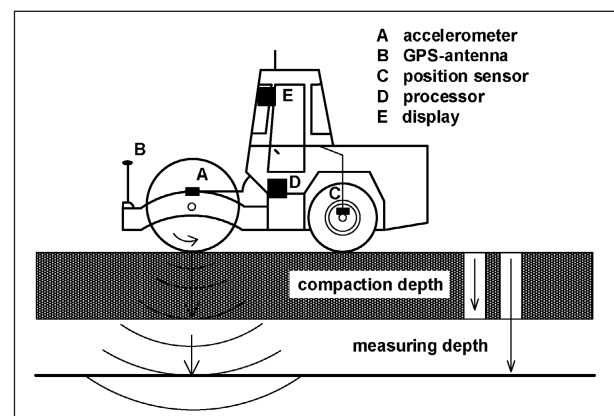


Fig. 2-3: FDVK-test

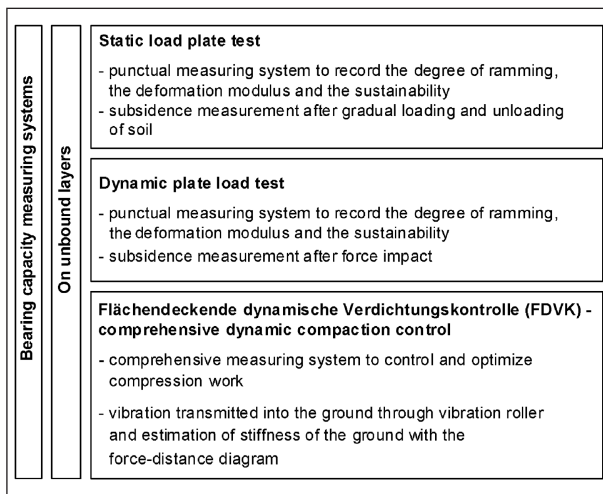


Fig. 2-4: Bearing capacity measurements systems on unbound layers

modulus is collected through vibration transmitted into the ground with a vibration roller. The fast, reliable und comprehensive application is mostly used to control and optimize compression work, but it is not conducted to detect bearing capacity conditions of already used areas [TP BF-StB Teil E 2, 1994].

Figure 2-4 shows the current bearing capacity measurements systems on unbound layers.

## 2.3 Ground Penetrating Radar

The Ground Penetrating Radar – GPR is a geophysical measuring method, with which the spatial extent of layers in the subgrade, cavities or foreign objects near the surface can be pictured.

For the performance of GPR measurements omnidirectional electromagnetic broadband signals (1 MHz – 2 GHz) with a high repetition rate are sent through the examined medium. The propagation of electromagnetic waves highly depends on the respective material characteristics. Due to contrasts in dielectricity and conductivity of the penetrated mediums, discontinuities and in highly heterogenic materials absorption, distribution or reflection of electromagnetic waves occur. On the surface spread and/or reflected signals are recorded by a receiving antenna. If the velocity of wave propagation in the examined material is known, the distance of the particular source of scattering and reflection from the surface can be precisely determined from these data by measuring the transit time [ZIEKUR, 2000; JOL, 2008].

Because of the sensitivity of the measuring method for contrasts in the electric and also in the electromagnetic material characteristics, the GPR is particularly suitable for mediums with a heterogenic or graded water saturation. Penetration depths in the meter range as well as a spatial resolution in the centimeter range are possible depending on the degree of absorption and the scattering in the examined medium.

The GPR already represents an established method e.g. for damage detection in asphalt surface layers. The function of this method is to detect voids, delaminations or scatterings by measuring the transit time of reflected signals. The method runs contactless and is suitable for a continuous two dimensional use and for a fast and comprehensive record of layer thicknesses and moisture contents because of the wide frequency range and the high impulse repetition rate. In particular, quantitative statements on mechanical properties and the density of the examined structure cannot be made with this method. Due to the high sensitivity of this method for contrasts of the hardly controllable moisture content, a transfer to a systematic examination of unbound and for that reason hydraulically permeable layers is to be seen critically. It remains to be considered whether the GPR can be used to validate the layer thicknesses resp. the uniformity of the characteristics.

## 2.4 Seismic methods

Within seismic methods (Geoseismic) a non-destructive subgrade examination is made by a mechanical stimulation in the acoustic frequency range (normally < 1 kHz). The acoustic stimulation can occur continuously (vibroiseis method) or pulsed (bell or impulse hammer). As detectors arrays of geophones are used. The Geoseismic includes three different techniques:

1. Reflection seismic (measurement of transit time of acoustic waves). P-waves are detected at the layer boundaries. For soil tests in road constructions the Split-Spread-Method is highly suitable. With this method the depth of layer boundaries as well as the wave velocity in the particular layers can easily be determined. A fast and continuous measurement is possible.
2. Refraction seismic. Transit times are also detected, the mode conversion (e.g. S-/P-waves)

however, is more complex than in the reflection seismic, cf. [SLOAN et al., 2013]. At layer boundaries, where the acoustic wave hits a denser layer, which means that there is an impedance contrast, surface waves are generated, which can be taken into account for data interpretation.

3. Surface wave seismic. The highly dispersive behavior of seismic surface waves is evaluated by Scholte-, Stoneley-, Rayleigh- and Love-Type cf. [ZYWICKI, D. J., 1999]. Not only the phase velocity, but also the penetration depth greatly depends on the frequency. Therefore, the evaluation of the shear-wave velocity in dependency of depth is provided through this measurement method. Surface wave seismic is suitable for flatly extended soil investigation.

### 3 Laboratory tests

#### 3.1 Imaging techniques

Not only the in situ measuring methods described so far, but also non-destructive, imaging measuring methods can be used in the laboratory for certain samples.

X-ray tomographies allow a resolution of approximately  $1\text{e-}6\text{m/voxel}$  when a comfortable handling and scan times in the range of a few hours are ensured, cf. [STOCK, 2008]. On the basis of three dimensional tomography data a majority of important effective characteristics of soil can be determined, such as porosity (void ratio), the average grain size or the geometric tortuosity. Furthermore, those methods offer the great advantage, that the statistical distribution for the values named above can be determined within one sample, this means pore size distribution, grain size distribution etc. Time-consuming laboratory examinations, e.g. on the basis of mercury porosimetry or laser granulometry, can be reduced or completely avoided. Furthermore, effective physical material characteristics (permeability, re-depending tortuosity, stiffness, electrical conductivity etc.) can be determined by means of numerical pore volume simulation (Digital Material Laboratory) on the basis of 3-dim tomography data.

These methods allow a in situ evaluation und characterization of pores under laboratory conditions. The sample preparation, that means the

extraction of a sample from the base course, locally destroys the road pavement. Furthermore, the condition in situ cannot remain completely preserved. This especially affects the state of stress, but also the morphologic properties of the sample. For this reason the sampling is to be proceeded with utmost caution.

The topographic methods of investigating are enormously diverse. The resolutions, which are technically conceivable (up to 50 nm in X-ray microscopes), are sufficient for base course examinations. For analyzing 3-dim CT data, the user is able to use established commercial evaluation software (e.g. Simpleware<sup>®</sup> or Avizo<sup>®</sup>). Furthermore, free (Open Source) software solutions are available (e.g. ImageJ).

Furthermore, physical experiments (e.g. triaxial test) can be combined with imaging techniques in different topography systems. Thereby, the user can connect mechanical material values like stiffness to statistical morphological data.

Performing numeric simulation on the basis of 3-dim topographic data also allows a numeric prediction of effective material characteristics – certainly an interesting method for future examinations.

#### 3.2 Sound- and ultrasound procedures

In contrast to the topography techniques mentioned above, acoustical wave velocities (e.g. P- and S-waves) resp. shear and elastic modulus (G, E) can directly be determined with sound- and ultrasound procedures (20 kHz – 10 MHz) from the experimentally determined transit time of Puls-Echo, Through-Transmission-investigations or surface waves. The selected frequency (wave length) of the signal defines the resolution of the examination. Damping and intrinsic length parameter (e.g. grain diameter) however, limit the frequency, which can be chosen for soils. Furthermore, the low sound pressure of high-frequency sonic heads limits the penetration depth into the soil sample. Therefore, a (very) low-frequency ultrasound range ( $20\text{ kHz} < f < 500\text{ kHz}$ ) is selected for soils, which are relevant for the construction technology.

The non-destructive determination of wave velocities can take place under in situ conditions in



the field or under laboratory conditions. Under laboratory conditions the problem of sampling has to be considered. The advantage of laboratory examinations however, is in the possibility that ultrasound experiences can be connected to realistic mechanical load scenarios, if a sample can be successfully prepared. In the field non-destructive surface wave analyses can be used. Furthermore, the modern sonic head technology allows a contactless (air coupled) coupling of piezoelectric sonic heads. Consequently, passes and extensive investigations are at least hypothetically possible.

## 4 Approaches on modifications of existing testing methods

For a non-destructive investigation and characterization of mechanical properties of compacted layers two promising methods are presented below. The technical requirements (actuators, measurement technique) are basically fulfilled; particularly the adjustment to the road construction requirements (grain diameters, layer thicknesses) and the methods for data interpretation have to be developed specifically to the application.

### 4.1 Harmonic deflectometry

The 'harmonic deflectometry' is a further development of the 'Falling Weight Defectometer' (FWD) and the dynamic plate-loading test. The basic idea of the investigation is that the soil is stimulated by a coupled loading plate with a defined sine wave. The stimulation occurs either through a magnetic plunger coil (Voice Coil) or alternatively through a piezoelectric actuator. Plunger coils have an amplitude up to millimeter range in a frequency range of several hundred hertz. Piezoelectric actuators however, have a maximum amplitude of

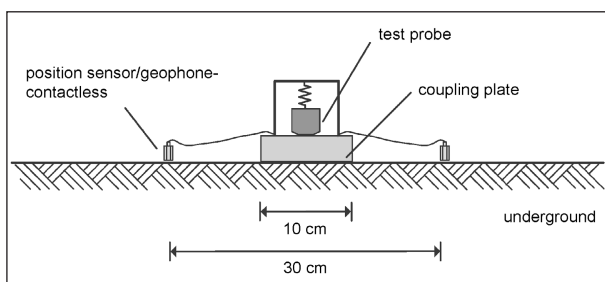


Fig. 4-1: Harmonic deflectometry

up to 100 micro meters, but they can be stimulated up to 10 kHz. Contactless position sensors (capacitive sensors or eddy current sensors) or alternatively geophones resp. acceleration sensors are attached in a defined distance to the loading-plate for further evaluation of the response signals, cf. Figure 4-1. Within the 'harmonic deflectometry' and especially in the course of data interpretation of the measured values, further investigations are necessary. For this purpose a mathematic optimization problem of the layers' structure has to be formulated und solved afterwards (inverse problem). In particular, a well-defined stimulation (monochromatic) offers an enormous potential.

### 4.2 Reflection measurement

Another dynamic measuring method is an acoustic reflection technique (puls-echo technique; Figure 4-2) in the ultrasonic range (here low-frequency range < 100 kHz). A low-frequency piezoelectric sonic head is coupled to the ground by an aluminum plate with defined material parameters. In these tests the piezoelectric broadband sonic head functions as an actuator on the one hand and on the other hand as a receiver. The wave length of the exciter signal is adapted to the inherent micro structure of the soil resp. of the layer thicknesses und is chosen long enough to avoid scattering on the grains and with it the effective signal attenuation. The wave length, however, has to be low enough to precisely resolute the expected layer thicknesses. For this, modern piezoelectric, broadband P-wave ultrasonic heads (Karl Deutsch, Wuppertal; Olympus/Panametrics) are basically suitable, but still have to be adjusted if necessary to guarantee optimal signal transmission (low impedance contrast). It is useful to realize the signal generation with a frequency generator (AWG-Arbitrary Wave Form Generator). With an AWG defined frequency

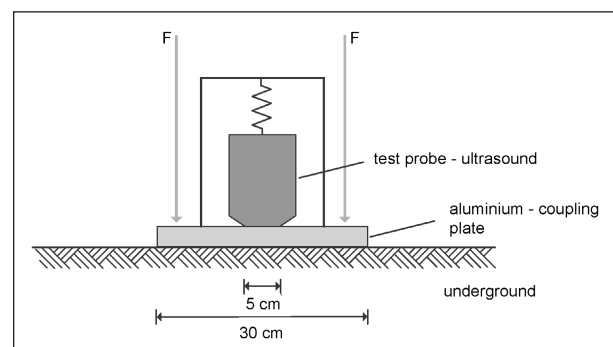


Fig. 4-2: Reflection measurement

ranges can be specifically stimulated, e.g. with modulate signals or wavelets. The generated signals (normally  $\pm 10\text{V}$ ) have to be linearly intensified ( $\pm 400\text{V}$  or perhaps higher) with an amplifier (e.g. E&I 1040L) to generate a high sound pressure. With the described setup, signals may be generated with a good signal-to-noise ratio, which afterwards can be analyzed in a Postprocessing-step (determination of averaged mechanical stiffnesses).

### 4.3 Classification into consisting test methods

To compare consisting testing methods and also modified methods, 'harmonic deflectometry' and 'reflection measurements', they were pictured depending on the wave length ( $\lambda$ ), viz. the local resolution of the methods (Figure 4-3). On the one side there are the imaging techniques and the sound and ultrasound methods. These methods are carried out in the laboratory and cover a wavelength range of  $10^{-6}\text{ m}$  to  $10^{-1}\text{ m}$ . For comparison, the microstructure of the examined layer is in the range of  $10^{-4}\text{ m}$  and  $10^{-2}\text{ m}$ .

On the other side in situ measuring methods are listed. These include the GPR, the seismic methods,

the existing testing procedures for bearing capacity analysis (cf. chapter 2.1) and the modified methods. Figure 4-3 clearly shows, that the wavelength range shifts to  $10^{-1}\text{ m}$  to  $> 10^2\text{ m}$  compared to the laboratory methods and that the ranges of typical layer thicknesses can be captured well with the methods in situ.

## 5 Summary

The aim of the research project was to propose ideas for an innovative measuring system, which comprehensively and non-destructively records performance characteristics of unbound layers in road construction, in order to achieve a sustainable increase in service life of road pavement.

To obtain precise information on the actual structure and the relevant material characteristics for unbound layers and therefore to describe the overall quality of the unbound layer methods for non-destructive and comprehensive measurements were developed.

An interdisciplinary literature study, the evaluation and the theoretical transfer to the unbound road construction led to two technically practical measuring methods, which give exact information on the actual structure and the material

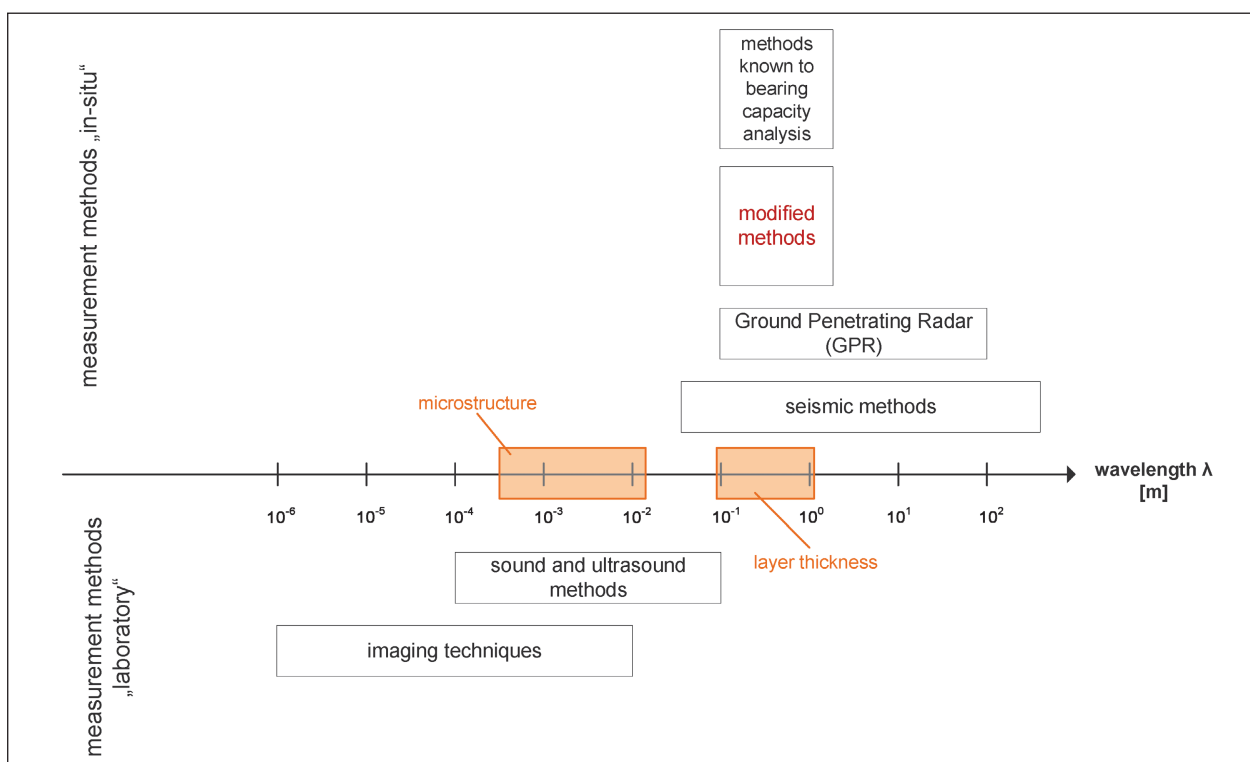


Fig. 4-3: Measurement methods depending on the wave length  $\lambda$

characteristics for unbound layer and therefore the overall quality of the unbound layer can be described. Both test methods 'harmonic deflectometry' and 'reflection measurement' are comparatively simple to perform, where the measurements, however, take place stationary, but non-destructively. Mechanical characteristics and layer thickness can be derived nearly extensively from repeated measurements in defined intervals. In order to achieve an extensive assessment both test methods could be theoretically linked to GPR measurements. Due to previous experiences modern GPR systems can be used for the validation of the layer thickness and for the validation of the uniformity of the properties of the examined layer (density).

## Literature

- AP Trag Teil B 2.1: Arbeitspapier Tragfähigkeit: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen. Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 2008
- AP Trag Teil B 4: Arbeitspapiere Tragfähigkeit: Curviametro, Gerätebeschreibung Messdurchführung, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen 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 Erhaltungsmaßnahmeanarten – Teil 1, Straße und Autobahn, S. 572-580, 9.2009
- GRÄTZ, B.: Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmeanarten – Teil 2: Straße und Autobahn. S. 664-670, 10.2009
- Greenwood Engineering: [www.greenwood.dk/tsd.php](http://www.greenwood.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 Straßenwesen 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, 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 Straßenwesen e. V., Köln, 2012
- ZIEKUR, R.: Georadar in der Bodenkunde. Geologisches Jahrbuch der BGR Hannover, Vol. E 52, 9-34, 2000

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b> . . . .	13	<b>Literatur</b> . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b> . . . . .	13	<b>Bilder</b> . . . . .	37
<b>3</b>	<b>In-situ-Prüfverfahren</b> . . . . .	13	<b>Tabellen</b> . . . . .	37
3.1	Tragfähigkeitsanalyse . . . . .	13		
3.1.1	Analyse der Tragfähigkeit auf gebundener Befestigung . . . . .	14		
3.1.2	Analyse der Tragfähigkeit auf ungebundener Befestigung . . . . .	23		
3.2	Georadar . . . . .	28		
3.2.1	Methodik . . . . .	28		
3.2.2	Bewertung . . . . .	28		
3.3	Seismische Verfahren . . . . .	28		
3.3.1	Methodik . . . . .	28		
3.3.2	Bewertung . . . . .	29		
<b>4</b>	<b>Laborprüfverfahren</b> . . . . .	29		
4.1	Bildgebende Verfahren . . . . .	29		
4.1.1	Methodik . . . . .	29		
4.1.2	Bewertung . . . . .	30		
4.2	Schall- und Ultraschallverfahren . . . . .	30		
4.2.1	Methodik . . . . .	30		
4.2.2	Bewertung . . . . .	31		
<b>5</b>	<b>Ansätze zur Modifizierung der vorhandenen Prüfverfahren</b> . . . . .	31		
5.1	Harmonische Deflektometrie . . . . .	31		
5.2	Reflexionsmessung . . . . .	31		
5.3	Einordnung zu bestehenden Prüfverfahren . . . . .	32		
<b>6</b>	<b>Aufbau der Datenbank mit Citavi®</b> . . . . .	32		
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	34		



## 1 Einleitung und Problemstellung

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. Somit hängt die Dauerhaftigkeit einer Straße erheblich von den Eigenschaften ihrer ungebundenen Schichten ab.

Bisher wird die für die Qualität und Dauerhaftigkeit eines Straßenoberbaus mit entscheidende Tragfähigkeit ungebundener Schichten ausschließlich punktuell durch statische oder dynamische Plattendruckversuche nachgewiesen. Die daraus resultierenden Ergebnisse können somit nur eine punktuelle Aussage zu den Eigenschaften des Materials und 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.

Zerstörungsfreie und möglichst flächendeckende Messungen bieten die Möglichkeit, die Aussagekraft einer solchen Prüfung erheblich zu verbessern und die ganzheitliche Qualität der ungebundenen Schicht zu beschreiben.

## 2 Zielsetzung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, unter Berücksichtigung der aus einer umfassenden nationalen und internationalen Literaturrecherche abgeleiteten Messprinzipien, eine Idee für ein innovatives Messsystem zur möglichst flächendeckenden Erfassung der Gebrauchseigenschaften ungebundener Schichten im Straßenbau zu erarbeiten.

Dabei soll der ungebundene Aufbau möglichst detailliert, aber auch mit wenig Zeit- und Messaufwand, hinsichtlich der Art der Baustoffe und des Schichtenaufbaus sowie des Verdichtungs- und Tragfähigkeitszustandes beschrieben und bewertet werden können.

Im Rahmen dieser Literaturstudie werden ebenso aus anderen Fachbereichen übertragbare und technisch anpassbare Methoden mit berücksichtigt.

Mit der theoretischen Ableitung eines innovativen Messsystems sollen demzufolge notwendige und sinnvolle Veränderungen bzw. Ergänzungen zur Praktikabilität des Messsystems auf der Baustelle vorgeschlagen werden. Das Messverfahren soll dabei mit möglichst geringem Aufwand in den ungebundenen Straßenbau adaptiert werden.

Letztendlich ist das Ziel der flächendeckenden Messung und Dokumentation der Gebrauchseigenschaften der ungebundenen Schichten die nachhaltige Steigerung der Nutzungsdauer einer Straßenbefestigung.

Die Quellen und die zusammenfassenden Erkenntnisse der Literaturrecherche werden in eine weitergehend nutzbare Datenbank gesammelt.

## 3 In-situ-Prüfverfahren

### 3.1 Tragfähigkeitsanalyse

Die Tragfähigkeit ist ein entscheidendes Kriterium für die Qualität und die Dauerhaftigkeit einer Straßenbefestigung. Folglich ist eine aussagekräftige und zuverlässige Bewertung mithilfe verschiedener Messtechniken von großer Bedeutung.

Die Tragfähigkeit von Straßenbefestigungen wird durch eine Vielzahl verschiedener Faktoren beeinflusst. Die Einflussfaktoren unterteilen sich entsprechend Bild 3-1 in innere (konstruktive Gegebenheiten und struktureller Zustand) sowie äußere Einwirkungen (Verkehrsbelastung und Klima). Demzufolge müssen die unterschiedlichen Messungen hinsichtlich der äußeren Einwirkungen stets auf ein einheitliches Niveau gebracht werden [CHAKAR, C., 2010].

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

Der Nachteil dieser Messsysteme ist jedoch, dass aufgrund der punktuellen Messungen nur Schätzungen für den Zustand der gesamten Straße erfolgen können. Dazu sind bereits kontinuierlich mes-

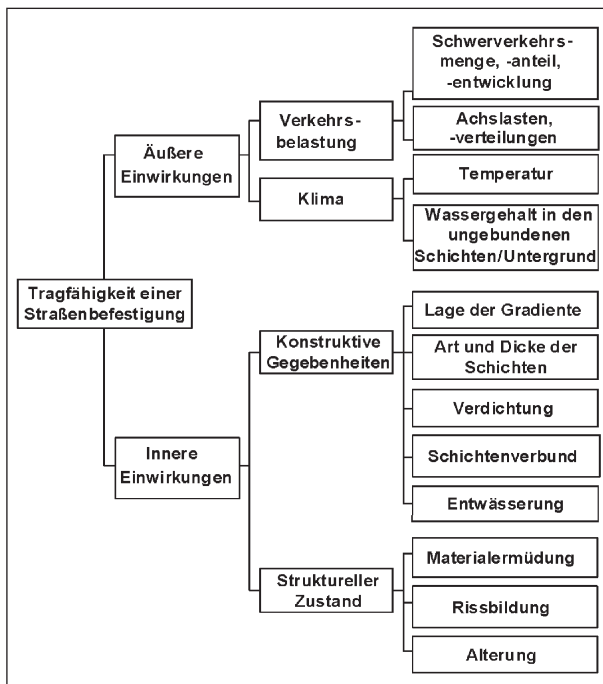


Bild 3-1: Einflüsse auf die Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung [CHAKAR, C., 2010] gemäß [WISTUBA, M. et al., 2004]

sende Systeme wie beispielsweise das Curviometro in Anwendung.

Die Analyse ungebundener Schichten erfolgt 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. 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.

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Messverfahren zur Tragfähigkeitsanalyse genauer betrachtet.

Für das Kapitel 3.1 wurde im Wesentlichen als Bezugsquelle auf die Masterarbeit „Identifikation von zerstörungsfreien Messverfahren und ihre Möglichkeiten zur Anwendbarkeit im Straßenbau“ [PILLING, M., 2015] zurückgegriffen.

### 3.1.1 Analyse der Tragfähigkeit auf gebundener Befestigung

Bei der Analyse der Tragfähigkeit auf gebundener Befestigung wird nach [AP Trag Teil A, 2013] die Verformung oder daraus abgeleitete Größen als Zustandsindikatoren für die Bewertung der Tragfähigkeit ermittelt. Dabei wird abhängig vom Messverfahren zwischen quasistatischer oder dynamischer Belastung unterschieden:

- „Quasistatische Messverfahren benutzen Belastungen mit einem Zeitverlauf, bei dem Trägheitskräfte der Messsysteme und der Verkehrsflächenbefestigungen vernachlässigbar klein sind.

Der zu prüfende Punkt der Oberfläche der Verkehrsflächenbefestigung wird in diesem Fall durch einen Lkw-Zwillingsreifen mit einer bestimmten Last beansprucht. Als Zustandsindikatoren werden die maximale Verformung und die Einflusslinie bestimmt. Die Indikatoren lassen sich bei der Be- und/oder Entlastung des Messpunktes ermitteln.

- Dynamische Messverfahren dagegen benutzen kurzzeitige Belastungen mit einem Zeitverlauf, bei dem Trägheitskräfte der Messsysteme und der Verkehrsflächenbefestigungen berücksichtigt werden müssen.

Der zu prüfende Punkt der Oberfläche der Verkehrsflächenbefestigung wird durch einen Kraftstoß oder durch eine rollende Last beansprucht. Als Zustandsindikatoren werden die maximale Verformung und die Verformungskurve bestimmt“ [AP Trag Teil A, 2013].

### Benkelman-Balken/Lacroix-Messwagen

Der Benkelman-Balken zählt zu den stationären (quasistatischen) Messmethoden zur Ermittlung der Tragfähigkeit des gesamten Oberbaus und dient demnach zur Überprüfung eines gleichmäßigen Verformungszustandes und somit der Sicherstellung einer dauerhaften Tragfähigkeit der Straße.

Mit dem Benkelman-Balken werden Einsenkungen auf einer Asphaltoberfläche gemessen, die aus einer Belastung mit einem Lkw (zweiachsig mit zwillingsbereifter Hinterachse) mit einer Regelradlast von 5 t (50 kN) resultieren. Aus diesen Einsenkungen kann eine Gesamtsteifigkeit bzw. ein Gesamttragverhalten des Straßenoberbaus ermittelt werden.

Die Vertikalbewegungen der Straßenoberfläche infolge der Belastung werden über den Tastarm des Benkelman-Balkens aufgenommen und auf eine Messuhr übertragen. Der Unterschied zwischen belastetem und vollständig entlastetem Messwert wird als maximale Einsenkung bezeichnet. Über die Abhängigkeit zwischen Einsenkung und Steifigkeitsmodul kann auf das Steifigkeitsverhalten des Straßenaufbaus geschlossen werden. Dabei wird das Steifigkeitsmodul umso kleiner, je größer die maximale Einsenkung ist.

Durch Messung in empfohlenen Abständen von höchstens 25 m kann eine Lasteinflusslinie bestimmt werden und so ein ansatzweise flächendeckendes Tragverhalten einer Straße abgeleitet werden. Dabei wird die maximale Einsenkung als Längsprofil dargestellt, sodass homogene Abschnitte mit ähnlichem Einsenkungsverhalten gebildet und Schwachstellen der Straßenbefestigung erkannt werden können [AP Trag Teil B 1, 2014; AP Trag Teil C 1, 2014; GRÄTZ, B., SUß, G.; 1984].

Bild 3-2 zeigt das Prinzip des Benkelman-Balkens.

Eine Weiterentwicklung des Benkelman-Balkens stellt der Lacroix-Messwagen dar, indem über zwei angebrachte Benkelman-Balken gleichzeitig Einsenkungsmessungen gemessen werden.

Zwischen Vorder- und Hinterachse ist ein Messschlitten angebracht, der mit zwei Tastarmen ausgestattet ist. Mit kontinuierlicher Verschiebung der Messbalken bewegt sich das Messfahrzeug im Schritttempo (3 bis 5 km/h) voran. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit handelt es sich um ein quasistatisches Verfahren.

Es werden alle 5,5 m in beiden Radspuren Messwerte entnommen, sodass pro Kilometer Fahrstreifen ca. 360 Einzelmesswerte zu verzeichnen sind. Demnach können annähernd flächendeckende Streckenprofile über gesamte Streckenabschnitte ermittelt werden.

Der Tragfähigkeitszustand kann über die Auswertung der dynamischen Muldenmessung bewertet werden. Weiterhin kann Rückschluss auf eventuellen Verstärkungsbedarf und eine theoretisch restliche Nutzungsdauer der Straße über Rückrechnung der Steifigkeitsmodule bestimmt werden.

Bei Kenntnis des Schichtenaufbaus der Straße können über die Mulden-Messwerte in Verbindung mit der bekannten Geschwindigkeit und dem

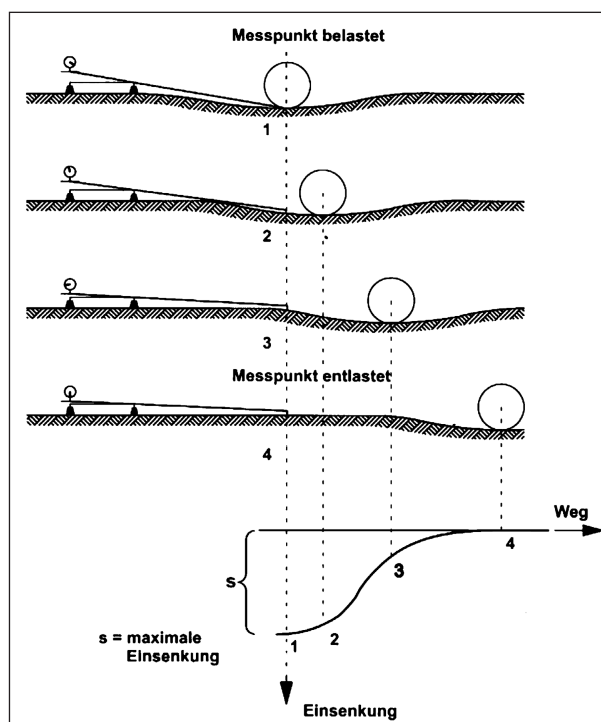


Bild 3-2: Prinzip des Benkelman-Balkens [AP Trag Teil A, 2013]

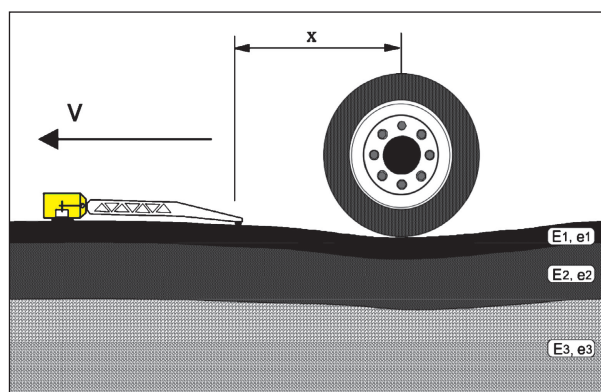


Bild 3-3: Muldenmessung mit dem Lacroix-Deflektographen [SACR, 2008]

Abstand zwischen Radlast und Tastarm Rückrechnungen auf die E-Module aller Schichten erfolgen (Bild 3-3) [SACR, 2008].

### Curviometro

Das Messverfahren Curviometro ist ein kontinuierlich messendes System, mit dem flächendeckende Messungen zur Tragfähigkeitsanalyse des Oberbaus durchgeführt werden.

Eine Prinzipskizze des Curviometro kann Bild 3-4 entnommen werden. Das Belastungsfahrzeug (Lkw mit durch Gewicht verstellbarer Achslast zwischen 8 t und 13 t) verfügt über einen verlänger-



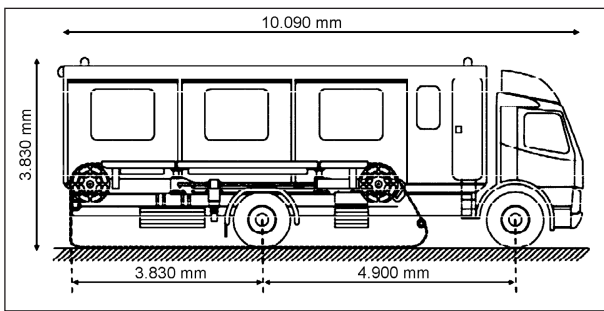


Bild 3-4: Prinzipskizze des Curviametro-Messfahrzeugs [AP Trag Teil B 4, 2012]

ten hinteren Ausleger, zwischen dessen Rädern eine 15 m lange Trägerkette über Zahnräder geführt wird. Die Kette dient der Übertragung der elektrischen Signale zur Datenverarbeitungseinrichtung, die aus der Umwandlung der Bodenschwingungen mittels Geophonen hervorgehen. An dieser Kette befinden sich im Abstand von 5 m drei Geophone, die die Reaktion der Straßenoberfläche (Deflektionen) auf die Belastung aufnehmen.

Die Trägerkette wird synchron zur Fahrzeuggeschwindigkeit (konstante Fortbewegung mit 18 km/h) angetrieben, sodass während der Überfahrt in sehr kurzen Abständen die Deflektionen aufgenommen werden können, aus denen sich die kontinuierliche Verformung des Oberbaus ableiten lässt [AP Trag Teil B 4, 2012].

Ein Messzyklus beinhaltet einen Umlauf der gesamten Trägerkette. Da alle 5 m Geophone angeordnet sind, kann ein Messzyklus in drei Messeinheiten unterteilt werden, wobei die Messwertaufnahme jeweils 1 m vor der Hinterachse beginnt und 3 m hinter der Hinterachse endet. Jedes Geophon erfasst für eine Messeinheit (ca. 4 m Messstrecke) 100 Messwerte, sodass für einen Messzyklus 300 Messwerte aufgezeichnet werden.

Bild 3-5 zeigt die Auswertung der erfassten Messdaten in Form einer Verformungs-Zeit-Kurve für einen Messpunkt (Messlänge 4 m). Diese kann durch Ableitung und einfache Integration ermittelt werden. Neben der maximalen Verformung kann ein Krümmungsradius der zeitabhängigen Verformungsmulde zum Zeitpunkt der größten Verformung berechnet werden. Zur Visualisierung der Daten, können durch das Aneinanderfügen mehrerer Messpunkte verschiedene Straßenabschnitte z. B. in Form homogener Zonen dargestellt werden.

Der Einsatz des Curviametro-Messsystems ist mit einigen Einschränkungen verbunden. Die Nutzung



Bild 3-5: oben: Verformungs-Zeit-Kurve (grün) und Reaktion des Geophons (rot); unten: Beispiel für die Visualisierung der Daten [AP Trag Teil B 4, 2012]

reduziert sich ausschließlich auf Asphaltstraßen, zudem können bei Kurvenradien unter 40 m sowie bei Regen bzw. feuchter und nasser Fahrbahn keine Messungen durchgeführt werden. Weiterhin ist ein Einsatz auf Straßen mit größeren Längsunebenheiten, Schlaglöchern oder Einzelhindernissen nicht gegeben, sodass vor dem Einsatz bereits aktuelle Daten über den Zustand der Fahrbahnoberfläche vorliegen müssen. Eine Zustandserfassung- und Bewertung der Fahrbahnoberfläche muss demnach zunächst erfolgen [AP Trag Teil B 4, 2012].

**Falling Weight Deflectometer (FWD)**

Das Falling Weight Deflectometer (FWD) ist eine weitere Möglichkeit zur Tragfähigkeitsanalyse von Straßenbefestigungen. Die Messungen mit dem FWD erfolgen bisher meist auf der Asphalt- oder Betonoberflächen, können aber grundsätzlich auch auf der Oberfläche ungebundener Schichten durchgeführt werden.

Das Messverfahren wird als dynamisch angesehen, die Messungen finden jedoch stationär statt, da die Messgeschwindigkeit ca. 1 bis 2 min je Messpunkt beträgt. Es wird demnach kein vollständiges Stra-

ßenprofil eines gesamten Abschnittes erzeugt, die Ermittlung eines flächendeckenden Profils erfolgt ähnlich wie beim Benkelman-Balken durch Kombination der punktuellen Messungen (Messpunkt-abstände meist zwischen 10 m und 100 m) [CHAKAR, C., 2010; BAST, 2015].

Das Prinzip des FWD nimmt die Messung eines Kraftstoßes im Lastzentrum in Verbindung mit dem Auftreten einer Deflektionsmulde, der Berechnung von Tragfähigkeitskennzahlen und der Rückrechnung von Schichtsteifigkeiten zur Grundlage. Es wird mit einem Fallgewicht ein Kraftimpuls (maximal bis 15 t) auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht, der für den Messpunkt eine Radüberrollung simuliert.

Um Kenntnisse über die Schichtzustände zu gewinnen, werden mittels Geophonen (elektromechanische Wandler, die Bodenschwingungen in analoge Spannungssignale umwandeln) die vertikalen Verformungen (Deflektionen) der Straßenoberfläche sowohl im Lastzentrum als auch in festgelegten Abständen zum Lastzentrum gemessen (maximal acht weitere Geophone) [AP Trag Teil B 2.1, 2008].

In Bild 3-6 ist das Prinzip des FWD dargestellt.

Für die Auswertung werden Messgrößen wie der zeitliche Kraftverlauf, Maximalkraft, Impulsdauer, Stationierung und Deflektionen an allen Geophonen aufgezeichnet. Ähnlich wie bei anderen Messtechniken müssen auch hier die äußeren Umstände wie Luft- und Oberflächentemperatur berücksichtigt werden, um einheitliche Messwerte in Verbindung zu anderen Straßenabschnitten zu erhalten [CHAKAR, C., 2010; BAST, 2015].

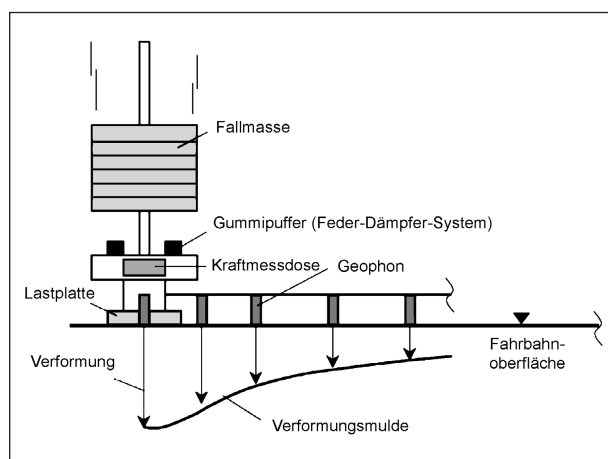


Bild 3-6: Prinzip der Erzeugung und Messung der Deflektionsmulde [AP Trag Teil B 2.1, 2008]

Nach dem Verfahren von [GRÄTZ, B., 2009] werden aus den aufgenommenen Deflektionen Verformungsmoduln abgeleitet. Ausgehend davon, dass unter dem Lastzentrum eine Deflektionsmulde entsteht, können so über die Messwerte der Geophone Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit der einzelnen Schichten, bis hin zum Planum, gezogen werden [AP Trag Teil B 2.1, 2008].

Die Ermittlung der Steifigkeitswerte der einzelnen Schichten erfolgt über eine Rückrechnung auf Basis der gemessenen Deflektionen, Temperaturen und Streckeninformationen. Die Rückrechnung wird dabei meist mit der Grundlage eines 3-Schichten-Modells mithilfe von Softwaresystemen durchgeführt. Die meisten Programme liefern jedoch nur aussagekräftige Ergebnisse, solange die Anzahl der Schichten auf drei begrenzt ist. Rückrechnungen mit Mehrschichtmodellen über drei Schichten können mehrdeutige Lösungen erzeugen [CHAKAR, C., 2010].

Tabelle 3-1 stellt die beschriebenen Messverfahren zusammenfassend gegenüber.

### Weitere kontinuierlich messende Verfahren

Weitere Tragfähigkeitsmessverfahren – hauptsächlich für die Anwendung auf befestigten Fahrbahnen – sind im internationalen Raum zu erkennen.

Die verschiedenen Messsysteme, die zumeist kontinuierliche Messungen über schnellfahrende Fahrzeuge möglich machen, nutzen überwiegend Einsenkungsmessung in der Fahrbahn über Lasertechnik oder Geophontechnik infolge von Lasteinwirkung.

Zuverlässige und aussagekräftige Zustandsanalysen erzeugen vor allem die Triangulations-Lasertechniken des Rolling Wheel Deflectometer (RWD) und Road Deflection Tester (RDT) sowie die Laser-Doppler-Technik des Traffic Speed Deflectometers (TSD). Diese Techniken verbinden die Einsenkungsmessungen mit schnellfahrenden Messfahrzeugen, sodass in kurzer Zeit große Straßenabschnitte analysiert werden können und weisen demnach deutliche Vorteile gegenüber punktuellen Messverfahren wie dem Benkelman-Balken auf.

### Rolling Wheel Deflectometer (RWD)

Bild 3-7 zeigt die Darstellung des Messbalkens beim RWD. Es sind vier Triangulations-Laser an einem starren Balken zwischen den Reifen befestigt,

	Benkelman-Balken	Deflectograph/Lacroix	Curviametro	Falling Weight Deflectometer
Lastsystem	Zwillingsbereifung	Zwillingsbereifung	Zwillingsbereifung	kreisförmige Lastplatte
Art des Messverfahrens	quasistatisch	quasistatisch	quasistatisch	dynamisch
Messung der Einsenkung bzw. Verformung	Einflusslinie	Einflusslinie	Einflusslinie	Verformungskurve/-mulde
Standardbelastung	Standardradlast 5 t	Standarddachlast 10 t	Standarddachlast 10 t	Standardkraftstoß 50 kN
Messstrecke [bei 8 h/Tag]	abhängig von der Messpunktdichte oder der Messgeschwindigkeit des Gerätes			
	bis zu 7,5 km (150 Messpunkte bei einem Messpunkt- abstand von 50 m)	bis zu 30 km (5.000 Messpunkte bei einem Messpunkt- abstand von 6 m) in beiden Rollspuren	bis zu 100 km (20.000 Messpunkte bei einem Messpunkt- abstand von 5 m)	bis zu 10 km (200 Messpunkte bei einem Messpunkt- abstand von 50 m)
Einsatzbereich	vorzugsweise auf Konstruktionen der Belastungsklasse Bk3,2 bis Bk0,3  vorzugsweise auf Verkehrsflächen- befestigungen mit Asphalt- und Pflasterdecke	vorzugsweise auf Konstruktionen der Belastungsklasse Bk10 bis Bk0,3  auf Verkehrsflächen- befestigungen mit Asphaltdecke	alle Belastungsklassen  auf Verkehrsflächen- befestigungen mit Asphaltdecke	alle Belastungsklassen  auf Verkehrsflächen- befestigungen mit Asphalt-, Beton- und Pflasterdecke

Tab. 3-1: Vergleich der verschiedenen Messsysteme [AP Trag Teil A, 2013]



Bild 3-7: Darstellung des Messbalkens beim RWD [GROßMANN, A., 2009]

anhand derer die Tragfähigkeitsmessungen durchgeführt werden [GROßMANN, A., 2009].

Die Triangulations-Laser, die in Abständen von 8 ft (entspricht ca. 2,44 m) installiert sind, messen die durch die Masse des Fahrzeugs verursachten Deflektionen (Einsenkungen) in der Fahrspur, anhand derer Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit der Fahrbahn gezogen werden können. Es werden gleichzeitig an den verschiedenen Positionen der Laser Daten erfasst, sodass die Einsenkungen der Fahrbahnoberfläche direkt unter der Belastung bzw. unter dem Reifen in Verbindung mit den weniger

starken Ausprägungen einige Meter von der Belastung entfernt gesetzt werden können.

Somit werden durch die Triangulations-Laser Straßenprofile der durch die Belastung verursachten Einsenkungen des Bodens erzeugt. Die Triangulations-Laser arbeiten ähnlich wie bei schnellfahrenden Messfahrzeugen zur Fahrbahnoberflächenanalyse mithilfe optischer Abstandsmessung durch genaue Winkelmessungen innerhalb von Dreiecken, sodass die Berechnungen über trigonometrische Funktionen erfolgen. Die Laser sind so eingestellt, dass unabhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs in Intervallen von 0,6 Inches (entspricht ca. 1,5 cm) Messwerte erfasst werden. Somit sind über große Streckenabschnitte detaillierte Analysen möglich. Die unterschiedlich starke Ausprägung sowie die Gleichmäßigkeit bzw. Variabilität der Einsenkungen ermöglicht schließlich die Bewertung verschiedener Straßenabschnitte. Die Auswertung der erfassten Daten erfolgt sofort mithilfe von Computern, die im Messfahrzeug vorhanden sind. Aufgrund der variablen Geschwindigkeit bis zu ca. 100 km/h kann die Datenerfassung problemlos ohne Behinderung des Verkehrs erfolgen, sodass in einigen Tagen ganze Highways analysiert werden können. Täglich ist die Erfassung von 160 km bis 320 km möglich. Das Bild 3-8 zeigt die

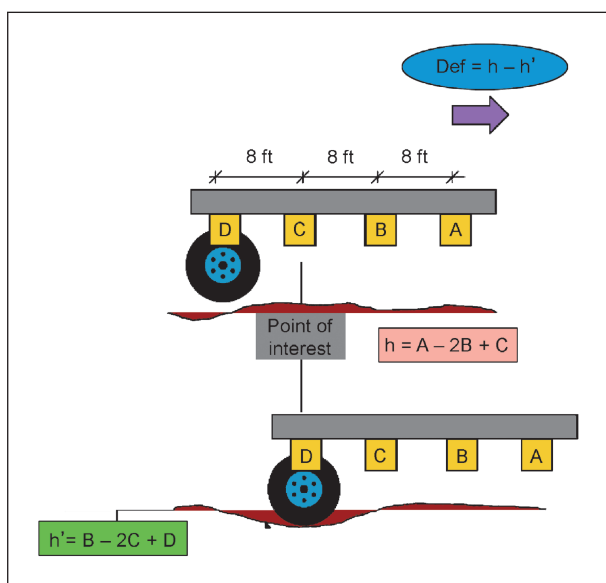


Bild 3-8: Darstellung der Messmethode und Anordnung der Laser beim RWD [ELSEIFI, M. et al., 2012]

Anordnung der vier Triangulations-Laser (A-D), anhand derer das Verformungs-Straßenprofil erzeugt wird [FHWA, 2015; ELSEIFI, M. et al., 2012].

Allerdings ist die Tragfähigkeitserfassung noch ausbaufähig, Schichtanalysen der gesamten Straßen können nicht erfolgen, sodass das RWD eher zum Aufspüren auszubessernder Abschnitte genutzt wird. Aufgrund der Installation des Messbalkens in der rechten Radspur werden nur von dieser Spur Daten erfasst, welche zwar zumeist durch die hohe Belastung als Schwachpunkt der Fahrbahn angesehen wird, jedoch dient diese Messtechnik demnach nicht der Analyse der gesamten Breite einer Fahrspur. So wird das Rolling Wheel Deflectometer (RWD) häufig in Kombination mit dem Falling Weight Deflectometer genutzt, anhand dessen nach dem Aufspüren von Schwachpunkten des Straßenabschnitts durch das RWD eine weitere Tragfähigkeitsanalyse erfolgt [FHWA, 2015].

### Road Deflection Tester (RDT)

Das 1991 in Schweden entwickelte Messsystem Road Deflection Tester ist zum Zeitpunkt der Entwicklung eines der ersten kontinuierlich messenden, schnellfahrenden Messfahrzeuge. Bei einer Geschwindigkeit bis zu knapp 100 km/h nutzt das Messsystem ähnlich wie das Rolling Wheel Deflectometer die Technik der Erfassung von Deflektionen der Fahrbahn mittels Lasersensoren. Der entscheidende Vorteil hierbei ist jedoch die Anzahl und Ausrichtung der Laser. Wie in Bild 3-9 zu erkennen ist, sind zwei Reihen mit jeweils zehn Lasersensoren

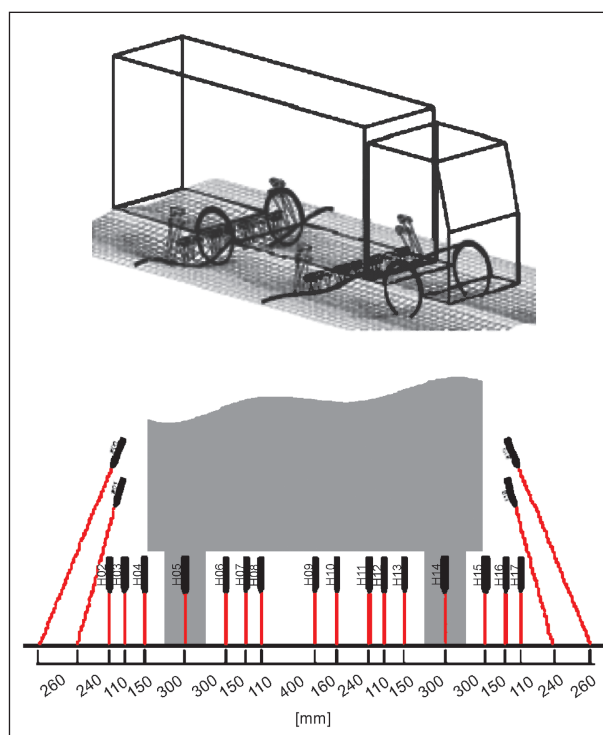


Bild 3-9: Anordnung der Lasersensoren beim RDT [ELSEIFI, M. et al., 2012]

am Fahrzeug installiert. Die erste Reihe befindet sich 2,5 m hinter der Vorderachse, die zweite Laserreihe ist 4 m hinter der Hinterachse positioniert. Durch die teils schräge Ausrichtung der Laser ist somit die Erfassung der gesamten Breite einer Fahrspur möglich. Außerdem können sowohl im direkten Belastungsbereich der Fahrbahn als auch außerhalb des Belastungszentrums Messdaten erfasst werden. Somit steht der Auswertung ein exaktes Verformungsprofil der Fahrbahn zur Verfügung, infolge dessen auch Rückrechnungen zur Schichtanalyse der Fahrbahn erfolgen können. Die Frequenz der Messwertaufzeichnung liegt ähnlich dem RWD bei ca. 1,5 cm [ELSEIFI, M. et al., 2012].

### Traffic Speed Deflectometer (TSD)/High Speed Deflectograph (HSD)

Das in Dänemark entwickelte Traffic Speed Deflectometer (TSD), ursprünglich konstruiert als High Speed Deflectograph (HSD), zählt ebenso zu den kontinuierlich messenden, schnellfahrenden Messsystemen [ELSEIFI, M. et al., 2012].

Bei Geschwindigkeiten von 40 km/h bis zu 80 km/h können Messdaten erfasst werden, wobei auch hier infolge von Lasersensoren Einsenkungen in der Fahrbahn gemessen werden. Es wird jedoch im Gegensatz zur Triangulations-Lasermessung

anderer Messfahrzeuge die Laser-Doppler-Technik genutzt, welche als optisches Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitskomponenten beschrieben werden kann. Statt der absoluten Einsenkungsmessung der Fahrbahn wird somit die Geschwindigkeit der Deflektionsausprägung erfasst. Es können damit exaktere Lokalisierungen der Schwachstellen von Straßenabschnitten erfolgen; besonders die Lokalisierung von Abschnitten mit größerem Schadenspotenzial, also von Abschnitten, in denen sich Schäden schneller entwickeln, ist möglich [Greenwood Engineering, 2015].

Bild 3-10 dient der Verdeutlichung der Laseranordnung im Messfahrzeug. Die Laser sind an einem Balken im Anhänger des Messfahrzeugs installiert, sodass bei einer Achslast von 10 t die Deflektionsgeschwindigkeiten in der rechten Fahrspur gemessen werden. Ein Laser ist im direkten Belastungszentrum angeordnet, die anderen in festgelegten Abständen zum Belastungszentrum. Bild 3-10 zeigt die Anordnung der Laser und das Prinzip des High Speed Deflectograph in der früheren Version mit vier Laser-Doppler-Sensoren. Die stetige Weiterentwicklung des Messsystems lässt mittlerweile eine Ausstattung der Messfahrzeuge mit zehn Laser-Doppler-Sensoren zu. Der weltweite Export des Traffic Speed Deflectometers in Länder wie Australien, Neuseeland, China oder Südafrika kennzeichnet die Bedeutung und Zuverlässigkeit dieser Messtechnik [Greenwood Engineering, 2015], [BALTZER et al., 2010].

Die Deflektionsgeschwindigkeiten können in Verbindung mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu einem Krümmungsindex (SCI = Structural Curvature Index) umgerechnet werden. Zur Analyse der Fahrbahn dient der SCI300, der sich aus der Differenz zwischen maximaler Deflektion  $d(0)$  im Belas-

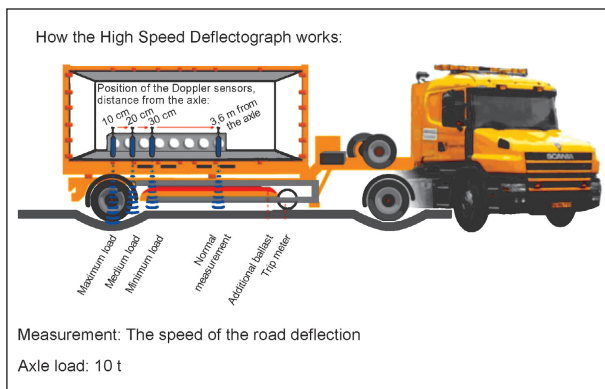


Bild 3-10: Prinzip des High Speed Deflectograph (hier: Version mit vier Laser-Doppler-Sensoren) [ELSEIFI, M. et al., 2012; BALTZER et al., 2010]

tungszentrum und der Deflektion 30 cm vom Belastungszentrum entfernt  $d(300)$  zusammensetzt. Aus der gemessenen Deflektionsgeschwindigkeit können die Deflektionsneigung in den verschiedenen Messpunkten sowie die absolute Deflektion abgeleitet werden (siehe Bild 3-11) [Greenwood Engineering, 2015].

Bild 3-12 zeigt eine beispielhafte Auswertung anhand des SCI300 bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten.

Die absolute Deflektionsgeschwindigkeit ist zwar von der Geschwindigkeit des Messfahrzeugs abhängig, jedoch sind die Unterschiede nur minimal. Demnach ist das Lokalisieren von Schwach-

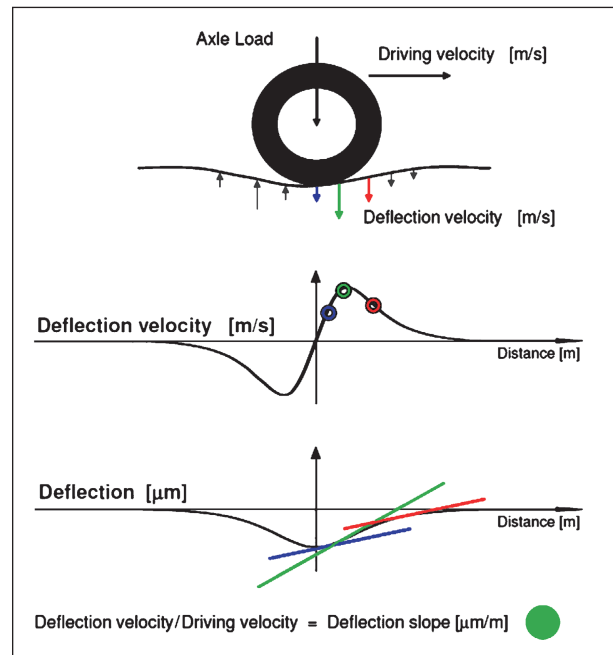


Bild 3-11: Deflektionsmessung mithilfe der Laser-Doppler-Technik [Greenwood Engineering, 2015]

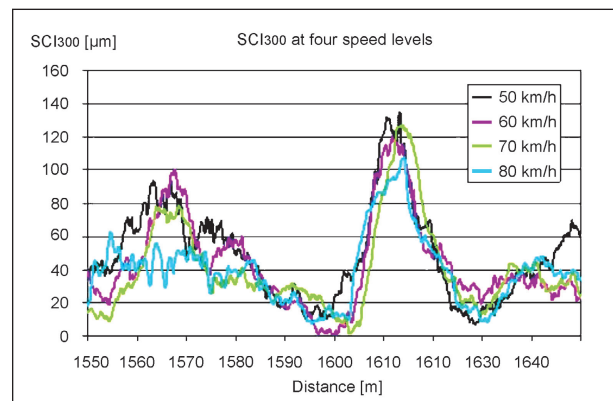


Bild 3-12: Auswertung des SCI300 bei vier verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten

stellen im Straßenabschnitt unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit möglich. Bild 3-13 zeigt vergleichsweise zwei Messungen des gleichen Straßenabschnitts bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten, die sich in den absoluten Ausprägungen unterscheiden. Der Kurvenverlauf und die Spitzen der erfassten Messdaten sind sich dennoch sehr ähnlich und machen somit die Lokalisierung von Stellen mit großem Schadenspotenzial möglich. Auch die zuvor dargestellte Auswertung der Messdaten anhand des SCI300 zeigt, dass die absoluten Werte bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten nur geringfügig abweichen, die Kurvenverläufe jedoch übereinstimmen, sodass die Bewertung der Straßenabschnitte identische Ergebnisse liefert [RASMUSSEN, S. et al., 2002].

Die Vergleichbarkeit und Präzision des High Speed Deflectographs bzw. Traffic Speed Deflectometers zeigt Bild 3-14. Dabei wurde ein bestimmter Straßenabschnitt sowohl mit dem Falling Weight Deflectometer (obere Kurve) als auch mit dem High Speed Deflectograph bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (untere Kurven) analysiert. In der Darstellung der Messdaten (FWD anhand der absoluten Einsenkung; HSD anhand der Deflektionsge-

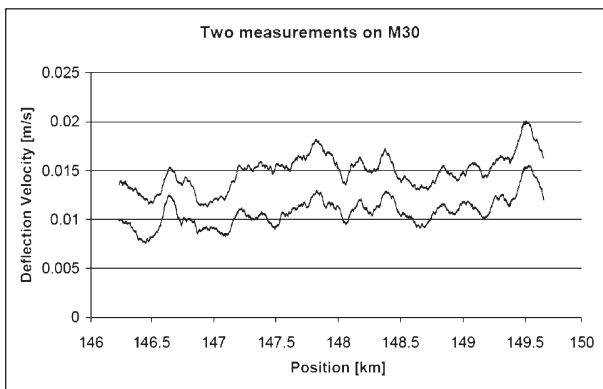


Bild 3-13: Messwertanalyse bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten [RASMUSSEN, S. et al., 2002]

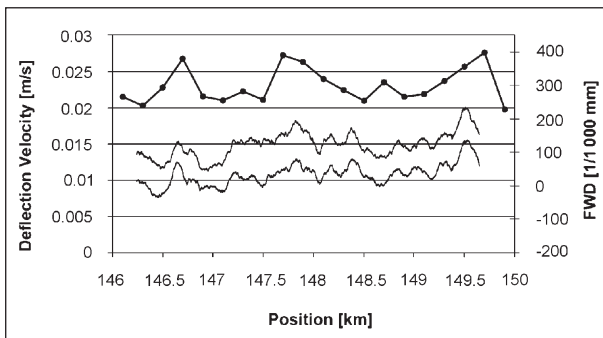


Bild 3-14: Vergleich der Messdaten von HSD und FWD [RASMUSSEN, S. et al., 2002]

windigkeit) ist ein vergleichbarer Verlauf der Messwerte der beiden Verfahren zu erkennen, wobei der Verlauf der Messwerte des HSD aufgrund der größeren Messwerterfassung detaillierter ist. Somit wird deutlich, dass durch den Einsatz des High Speed Deflectographs bzw. Traffic Speed Deflectometers Bewertungen der Fahrbahn möglich sind, die besonders zum Aufspüren gefährdeter Straßenabschnitte nützlich sind [RASMUSSEN, S. et al., 2002].

Des Weiteren sind zwei Techniken betrachtet worden, die hauptsächlich für die Analyse stark belasteter Fahrbahnen wie Fluglandebahnen entwickelt wurden. Auch hierbei erfolgt die Datenerfassung über Einsenkungsmessungen durch Lasteinwirkung mithilfe von Triangulationslasern (Airfield Rolling Weight Deflectometer, ARWD) oder Geophonanordnungen (Rolling Dynamic Deflectometer, RDD).

#### Rolling Dynamic Deflectometer (RDD)

Ein weiteres in den USA entwickeltes Messsystem ist das Rolling Dynamic Deflectometer, welches aufgrund eines installierten dynamischen Belastungssystems fähig ist, starke Belastungen, die das Gewicht des Messfahrzeugs übersteigen, zu erzeugen. Somit ist der Einsatz dieses Messfahrzeugs gut geeignet für stark belastete Fahrbahnen wie beispielsweise auf Flughäfen. Entwickelt wurde das System in den 1990er Jahren in Kooperation von US Air Force und der University of Texas [ELSEIFI, M. et al., 2012; BAY, J. A. et al., 1998].

Das Rolling Dynamic Deflectometer ist aufgrund der sehr geringen Geschwindigkeit von ca. 3 km/h bis 5 km/h nicht dafür geeignet längere Strecken zu erfassen und eignet sich somit schlecht für die Analyse eines großen Streckennetzes. Die Vorzüge dieses Messsystems liegen in der starken Belastungsfähigkeit des dynamischen Belastungssystems. Zur Erfassung der aufgrund der Belastung verursachten Einsenkungen in der Fahrbahn sind vier rollende Geophon-Sensoren im direkten Kontakt zur Fahrbahnoberfläche im Messfahrzeug installiert [SCULLION, T., 2006].

Eine hydraulische Pumpe, welche die Energie aus einem Diesel-Motor bezieht, treibt das dynamische Belastungssystem an. Zudem ist ein statisches Belastungssystem vorhanden, sodass kombiniert statische und dynamische Kräfte auf die Fahrbahn einwirken und Einsenkungen erzeugen können.

Über zwei Belastungswalzen wird die Kraft in den Boden übertragen [BAY, J. A. et al., 1998].

Auf der technischen Grundlage des RDD ist ein weiteres Messsystem (Total Pavement Acceptance Device – TPAD) in der Entwicklung, das bei einer Geschwindigkeit von 8 km/h bis 16 km/h mehrere zerstörungsfreie Messtechniken vereint, um flächendeckend den Gesamtzustand der Straße zu erfassen. So wird die Kombination von Tragfähigkeitsanalysen mittels Einsenkungsmessungen und Schichtanalysen über das Georadar genutzt. Diese zwei Techniken werden zusätzlich mit Videokameras und Satellitennavigationssystem gekoppelt. Bild 3-15 zeigt das Messsystem [STOKOE et al., 2013].

### Airfield Rolling Weight Deflectometer (ARWD)

Ein dem Rolling Wheel Deflectometer ähnliches Messsystem stellt das Airfield Rolling Weight Deflectometer dar. Es wurde auf Basis des Benkelman-Balkens für die Analyse von Fahrbahnen auf Flugplätzen entwickelt. Das System nutzt wie auch das Rolling Wheel Deflectometer die Deflektionsmessung mithilfe von Triangulations-Lasern und ist demnach dem System des RWD ähnlich. Es können allerdings nur Geschwindigkeiten bis zu ca. 32 km/h erreicht werden. Zudem ist das ARWD nicht mit einer Technik ausgestattet, die unabhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs in bestimmten Intervallen von wenigen Zentimetern Messdaten erfasst; vielmehr wird nach der Erfassung eines Messpunkts der nächste Messpunkt angezielt. Wie beim RWD sind vier Triangulations-Laser an einem Messbalken befestigt (Abstände zwischen den Lasern betragen 9 ft – entspricht ca. 2,74 m), die über Abstandsmessungen die unterschiedlich starke Ausprägung von Einsen-

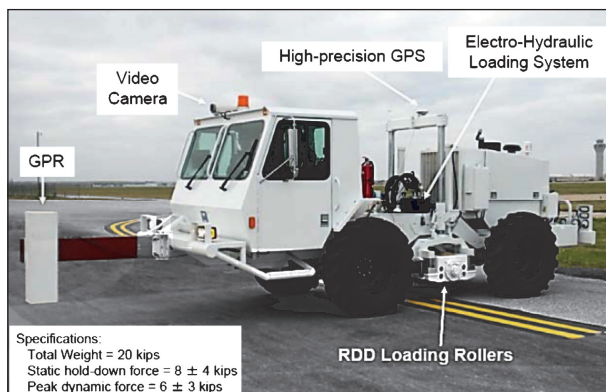


Bild 3-15: Total Pavement Acceptance Device TPAD [STOKOE et al., 2013]

kungen der Fahrbahn durch die Belastung erfassen. Die Frequenz der Datenerfassung beträgt demnach 2,74 m und ist damit im Vergleich zum RWD, bei dem die Frequenz der Datenerfassung 1,5 cm beträgt, weniger genau. Das ARWD weist aufgrund der geringeren möglichen Geschwindigkeit sowie der schlechteren Frequenz der Messdatenerfassung deutliche Nachteile gegenüber dem RWD auf, somit kann das RWD als das wichtigere Messfahrzeug angesehen werden [ELSEIFI, M. et al., 2012].

### Bewertung

Durch Einsenkungsmessungen in der Fahrbahn aus Lasteinwirkung (Radlast beim Lacroix-Messwagen) bzw. Krafteinwirkung (FWD) können über die Kombination punktueller Messungen annähernd flächendeckende Straßenprofile bezüglich der Tragfähigkeit des Straßenoberbaus erzeugt werden.

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 in der punktuellen Messung; flächendeckende Straßenprofile können nur abgeschätzt werden, genaue Daten über gesamte Streckenabschnitte liegen anhand dieser Messtechniken nicht vor. Zudem ist die Schichtanalyse nicht zuverlässig genug, da beispielsweise bei mehr als drei Schichten Ungenauigkeiten in den Rückrechnungen auftreten können.

Ein weiteres Messfahrzeug für die Analyse gebundener Schichten stellt das Curviametro dar. Mithilfe des Curviametro sind bei geringer Fahrgeschwindigkeit (bis zu 18 km/h) kontinuierliche flächendeckende Tragfähigkeitsanalysen anhand der Verformungsmessung der Fahrbahn infolge von Lasteinwirkung möglich.

Weitere Tragfähigkeitsmessverfahren, die flächendeckende Analysen von Straßenabschnitten ermög-

lichen, sind im internationalen Raum zu erkennen – hauptsächlich für die Anwendung auf befestigten Fahrbahnen.

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 Deflek-

tionsmessungen 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 Analyse der Tragfähigkeit über Deflektionsmessungen keine exakten Bewertungen der einzelnen Schichten oder des Korngefüges zu, sodass die Entwicklung und Anwendung weiterer Techniken beispielsweise zur Schichtdickenanalyse durchaus sinnvoll ist.

Teilweise werden diese Techniken nur zum Aufspüren zu verbessernder Abschnitte genutzt, sodass weitere Untersuchungen kritischer Bereiche mit dem FWD erfolgen können. Die Laser-Doppler-Technik des TSD nutzt im Gegensatz zur Triangulationslasertechnik die Erfassung der Geschwindigkeit der Deflektionsausprägung und macht somit neben der Bewertung des Straßenzustands die Lokalisierung von Abschnitten mit großem Schadenspotenzial möglich.

Bild 3-16 zeigt vergleichend die aktuellen Tragfähigkeitsmesssysteme auf gebundener Befestigung.

Tragfähigkeitsmesssysteme auf gebundener Befestigung	<p><b>Benkelmann – Balken / Lacroix – Messwagen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stationäres Messsystem zur Erfassung der Steifigkeit bzw. des Tragverhaltens des gesamten Oberbaus 3 km/h beim Lacroix – Messwagen</li> <li>- Einsenkungsmessungen durch Radlasteinwirkung</li> <li>- Ermittlung einer theoretischen Restnutzungsdauer</li> <li>- durch Kombination der punktuellen Messungen ist eine annähernd flächendeckende Erzeugung von Straßenprofilen möglich</li> </ul>
	<p><b>Falling Weight Deflectometer (FWD)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stationäres Messsystem für die Analyse auf Asphaltoberflächen, aber auch anwendbar auf ungebundener Oberfläche 0 km/h</li> <li>- Deflektionsmessungen mittels Geophone über Kraftimpuls und Ableitung von Verformungsmoduln und die Tragfähigkeit des gesamten Oberbaus und einzelner Schichten</li> <li>- durch Kombination der punktuellen Messungen ist eine annähernd flächendeckende Erzeugung von Straßenprofilen möglich</li> </ul>
	<p><b>Curviometro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kontinuierliches, flächendeckendes Messsystem 18 km/h</li> <li>- Deflektionsmessungen mittels Geophone durch Radlasteinwirkung und Ableitung von Verformung des Oberbaus</li> </ul>
	<p><b>Traffic Speed Deflectometer (TSD)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schnellfahrendes Messsystem zur kontinuierlichen, flächendeckenden Analyse 40 bis 80 km/h</li> <li>- Erfassung der Deflektionsgeschwindigkeiten über Laser-Doppler-Technik</li> </ul>
	<p><b>Rolling Wheel Deflectometer (RWD)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schnellfahrendes Messsystem zur kontinuierlichen, flächendeckenden Analyse bis zu 100 km/h</li> <li>- Deflektionsmessungen über Triangulationslaser</li> </ul>
	<p><b>Road Deflection Tester (RDT)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Schnellfahrendes Messsystem zur kontinuierlichen, flächendeckenden Analyse bis zu 100 km/h</li> <li>- Deflektionsmessungen über Triangulationslaser</li> <li>- Datenerfassung durch schräge Ausrichtung der Laser über die gesamte Breite der Fahrbahn</li> </ul>
	<p><b>Rolling Dynamic Deflectometer (RDD)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Messsystem zur Analyse stark belasteter Fahrbahnen 3 bis 5 km/h</li> <li>- Deflektionsmessungen über Geophone und dynamisches Belastungssystem zur Erzeugung starker Belastungen</li> </ul>
	<p><b>Airfield Rolling Weight Deflectometer (ARWD)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Messsystem zur Analyse stark belasteter Fahrbahnen bis zu 32 km/h</li> <li>- Deflektionsmessungen über Triangulationslaser</li> </ul>

Bild 3-16: Tragfähigkeitsmesssysteme auf gebundener Befestigung

### 3.1.2 Analyse der Tragfähigkeit auf ungebundener Befestigung

Die bisher betrachteten Messsysteme sind für den Einsatz auf gebundenen Straßenbefestigungen ausgelegt. Die Überprüfung der Tragfähigkeit ungebundener Schichten erfolgt überwiegend mit der Betrachtung von Verformungsmoduln. So wird die Tragfähigkeit hauptsächlich punktuell mittels statischem oder dynamischem Plattendruckversuch analysiert. Für ungebundene Schichten steht zudem die flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung (FDVK) zur Verfügung, da die Plattendruckversuche nur punktuell genutzt werden können und einen sehr geringen Anteil einer Gesamtfläche dokumentieren.

#### Plattendruckversuche

Der statische Lastplattendruckversuch [DIN 18134, 2012] dient als Feldversuch der Kontrolle der Einbaudichte sowie der Bestimmung der Verformbarkeit und Tragfähigkeit des Bodens.



Bei dem statischen Lastplattendruckversuch wird mittels einer Druckeinrichtung wiederholt eine stufenweise Be- bzw. Entlastung auf den Boden ausgeübt und die Druck-Setzungs-Linie bestimmt.

Für den Lasteintrag ist ein Gegengewicht wie ein beladener Lkw oder ein vergleichbar schweres Fahrzeug erforderlich, welches den Einsatz bei beengten Verhältnissen erschwert. Zudem muss die zu prüfende Fläche horizontal eben sein.

Aus der Druck-Setzungs-Linie werden mit Hilfe eines numerischen Verfahrens die Verformungsmodul  $E_{v1}$  für die Erstbelastung und  $E_{v2}$  für die Zweitbelastung ermittelt.

In Abhängigkeit von der Bodengruppe kann aus dem Verhältnis  $E_{v1}/E_{v2}$  bzw. aus  $E_{v2}$  weiterhin der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  abgeschätzt werden und für den Boden eine Einstufung der Eignung vorgenommen werden (Tabelle 3-2).

Aufgrund der sehr detaillierten Normung gilt der statische Lastplattendruckversuch als der präziseste im Erdbau mit der höchsten Wiederholgenauigkeit. Bei kommunalen Straßen wird ebenso wie beim dynamische Plattendruckversuch allerdings eine Prüfung je 1.000 m<sup>2</sup> gefordert (mindestens aber je 100 m), sodass nur geringfügig Aussagen über den gesamten Abschnitt einer Straße getroffen werden können. Die aus der Prüfung resultierenden Erkenntnisse können also nicht auf die gesamte Schicht übertragen werden [Merkblatt Plattendruckversuch, 2006].

Der dynamische Plattendruckversuch stellt ein dem statischen Plattendruckversuch ähnliches Prüfverfahren dar.

Boden- gruppe	Statischer Verformungs- modul $E_{v2}$ in MN/m <sup>2</sup>	Verdichtungs- grad $D_{Pr}$ in %	$E_{v2}/E_{v1}$
GW, GI	≥ 100	≥ 100	≤ 2,3*
	≥ 80	≥ 98	≤ 2,5*
GE, SE, SI, SW	≥ 80	≥ 100	≤ 2,3*
	≥ 70	≥ 98	≤ 2,5*

\* Wenn der  $E_{v1}$ -Wert bereits 60 % des angegebenen  $E_{v2}$ -Wertes erreicht, sind auch höhere Verhältnisse  $E_{v2}/E_{v1}$  zulässig

Tab. 3-2: Richtwerte für die Zuordnung vom statischen Verformungsmodul  $E_{v2}$  zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden nach [ZTV E-StB, 2009]

Dabei wird der Boden über eine kreisförmige, als starr anzunehmende Lastplatte mit einem Fallgewicht stoßartig belastet (Bild 3-17).

Aus der dabei bewirkten Spannung unter der Platte sowie der Setzung des Bodens wird der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  ermittelt. Zusätzlich kann mit Hilfe einer Setzungsmesseinrichtung die Setzung des Bodens  $s$  sowie die Geschwindigkeit  $v$  bei der Stoßbelastung und das Verhältnis der maximalen Setzung  $s_{max}$  zur maximalen Verformungsgeschwindigkeit  $v_{max}$  angegeben werden [Merkblatt Plattendruckversuch, 2006; TP BF-StB Teil B 8.3, 2012].

Der dynamische Plattendruckversuch kann mit einem leichten oder einem mittelschweren Fallgewicht durchgeführt werden [TP BF-StB Teil B 8.3, 2012 bzw. TP Gestein-StB Teil 8.2.1, 2012]. Bei Verwendung des leichten Fallgewichts beträgt die maximale Normalspannung unter der Platte 0,1 MN/m<sup>2</sup>, d. h. eine Fallgewichtsmasse von 10 kg. Bei Verwendung des mittelschweren Fallgewichts hingegen beträgt maximale Normalspannung 0,2 MN/m<sup>2</sup> und das Fallgewicht weist eine Masse von 15 kg auf. Zudem kommen bei dem mittel-

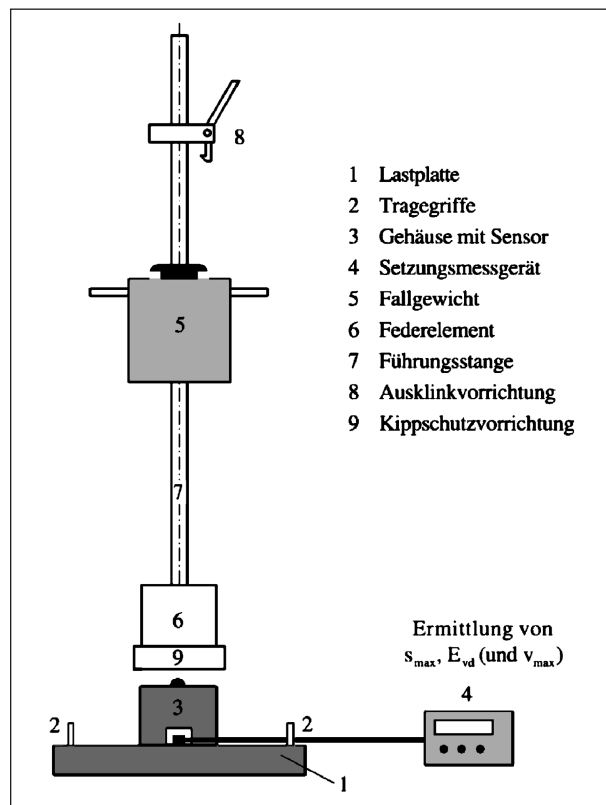


Bild 3-17: Schematische Darstellung des leichten bzw. mittelschweren Fallgewichtsgeräts nach [TP BF-StB Teil B 8.3, 2012 bzw. TP Gestein-StB Teil 8.2.1, 2012]

schweren Fallgewicht härtere Prüffedern zum Einsatz als bei dem leichten.

In Bild 3-18 sind der Verlauf der Belastung sowie der bei der Versuchsdurchführung aufgezeichnete Setzungsverlauf dargestellt. Die maximale Setzung entspricht dabei der Differenz zwischen der Position und der Lastplatte vor der Belastung und dem Maximum der aufgezeichneten Setzung in Belastungsrichtung.

In Abhängigkeit von der Bodengruppe kann aus  $E_{vd}$  der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  abgeschätzt werden (Tabelle 3-3).

Der Vorteil des dynamischen Plattendruckversuchs gegenüber dem statischen Plattendruckversuch besteht in der leichten Handhabung des Prüfgeräts, da es sehr kompakte Maße hat und kein Gegengewicht benötigt. Zudem kann der Versuch deutlich schneller durchgeführt werden, da neben dem Ebenen der Prüffläche keine Vorbereitungen notwendig sind. Jedoch ist der Anwendungsbereich im Vergleich zum statischen Plattendruckversuch eingeschränkter.

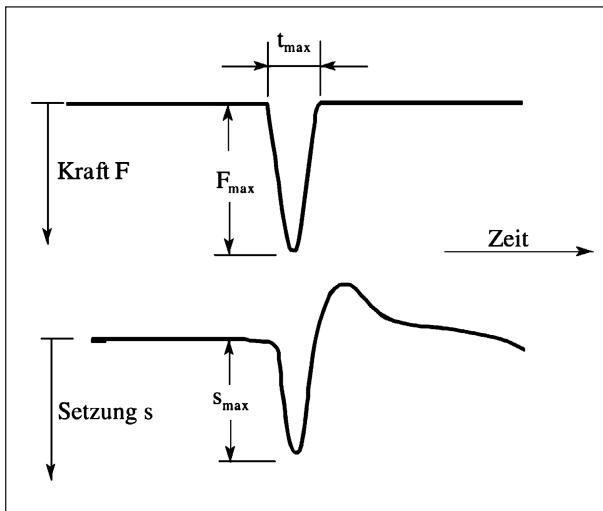


Bild 3-18: Prinzipskizze zum zeitlichen Verlauf der Kraft und der Setzung bei Stoßbelastung mit leichtem oder mittelschweren Fallgewichtsgerät [TP BF-StB Teil B 8.3, 2012]

Bodengruppe	dynamischer Verformungsmodul $E_{vd}$ in $\text{MN/m}^2$	Verdichtungsgrad $D_{Pr}$ in %
GW, GI, GE,	$\geq 50$	$\geq 100$
S, SI, SE	$\geq 40$	$\geq 98$

Tab. 3-3: Richtwerte für die Zuordnung vom dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden nach [ZTV E-StB, 2009]

In Tabelle 3-4 sind der dynamische Plattendruckversuch und der statische Plattendruckversuch entsprechend der zugehörigen Regelwerke [DIN 18134, 2012; TP BF-StB Teil B 8.3, 2012; TP Gestein-StB Teil 8.2.1, 2012] vergleichend gegenüber gestellt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes [FE 07.0246/2011 AGB, 2014] wurde ein modifiziertes leichtes Fallgewichtsgerät (mod. LFGG) zur Messung der elastischen und plastischen Verformbarkeit einer noch warmen Asphaltoberfläche eingesetzt. Dabei wird um die Lastplatte mit dem Durchmesser von 50 mm (für Asphaltprüfungen) zusätzlich eine Ringscheibe gelegt, die als Bezugshöhe für die bleibenden Verformungen dient. Der Lastplattendurchmesser kann auf die normale Größe von 300 mm angepasst werden.

Während der Kraftereinwirkung wird die Beschleunigung des Prüfstempels durch einen Sensor aufgezeichnet. Durch eine einfache Integration kann aus dem entstandenen Beschleunigungsimpuls die Geschwindigkeit und durch eine weitere Integration die Relativbewegung des Stempels berechnet werden. Aus der Relativbewegung wird die zeitabhängige Setzungslinie ermittelt, die sich in einen reversiblen Teil und einen irreversiblen Teil aufteilt (Bild 3-19). Um diese Anteile zu erfassen misst ein Wegaufnehmer die Relativbewegung zwischen dem Prüfstempel und der als Referenz dienenden Lastplatte.

Eine Messung besteht aus mehreren unmittelbar aufeinander folgenden Laststößen, bei denen jeweils die reversiblen und die irreversiblen Set-

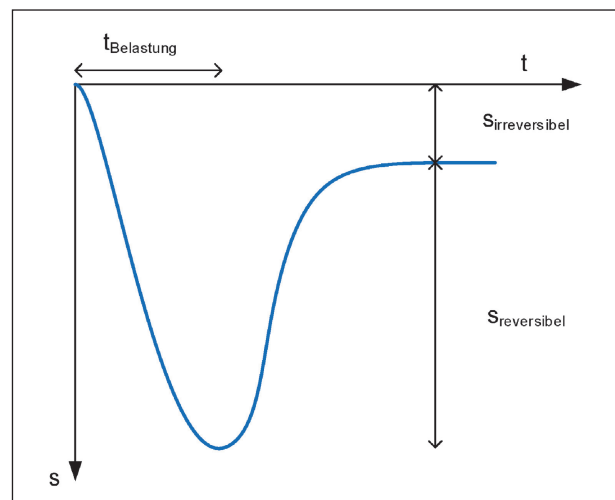


Bild 3-19: Setzungsverlauf durch die Stoßbelastung des dynamischen Plattendruckversuchs

Prüfverfahren	Dynamischer Plattendruckversuch mit leichtem Fallgewichtsgerät	Dynamischer Plattendruckversuch mit mittelschwerem Fallgewichtsgerät	Statischer Plattendruckversuch
Belastungsart	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gedämpfter Stoß</li> <li>Fallgewicht: 10 kg ± 0,1 kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gedämpfter Stoß</li> <li>Fallgewicht: 15 kg ± 0,150 kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholte Druckbelastung</li> </ul>
Physikalische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plattendurchmesser: 300 mm ± 0,5 mm</li> <li>Maximale Stoßkraft <math>F_{max}</math>: 7,07 kN</li> <li>Stoßdauer <math>t_{max}</math>: 17 ms ± 1,5 ms</li> <li>Normalspannung <math>\delta_{max}</math>: 0,1 MN/m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plattendurchmesser: 300 mm ± 0,5 mm</li> <li>Maximale Stoßkraft <math>F_{max}</math>: 14,140 kN ± 1 %</li> <li>Stoßdauer: 13 ms ± 1 ms</li> <li>Normalspannung <math>\delta_{max}</math>: 0,2 MN/m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plattendurchmesser: 300 mm/600 mm/762 mm</li> <li>Maximale Last bzw. maximale Setzung richtet sich nach der Zielsetzung des Versuchs</li> <li>Normalspannung <math>\delta</math> in Abhängigkeit von der gewählten Lastplatte</li> </ul>
Messwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximale Setzung <math>s_{max}</math></li> <li>Maximale Geschwindigkeit <math>v_{max}</math></li> <li>dynamischer Verformungsmodul <math>E_{vd,L}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximale Setzung <math>s_{max}</math></li> <li>Maximale Geschwindigkeit <math>v_{max}</math></li> <li>dynamischer Verformungsmodul <math>E_{vd,M}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normalspannung <math>\delta_{0max}</math></li> <li>Setzung <math>s</math></li> </ul>
Abgeleitete Messwerte	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verhältnis <math>s_{max}/v_{max}</math></li> <li>dynamischer Verformungsmodul <math>E_{vd,L}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verhältnis <math>s_{max}/v_{max}</math></li> <li>dynamischer Verformungsmodul <math>E_{vd,M}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verformungsmodul <math>E_{v1}</math> und <math>E_{v2}</math> sowie Verhältnis <math>E_{v2}/E_{v1}</math></li> <li>Bettungsmodul <math>k_s</math></li> </ul>
Anwendungsbereich	<ul style="list-style-type: none"> <li>Insbesondere grobkörnige und gemischtkörnige Böden mit einem Größtkorn bis 63 mm</li> <li><math>E_{vd}</math> von 15 MN/m<sup>2</sup> bis 70 MN/m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frostschuttschichten, Kies- und Schottertragschichten, Deckschichten ohne Bindemittel mit einem Größtkorn bis 63 mm oder Schichten mit vergleichbarer Tragfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Für alle ungebundenen Schichten des Ober- und Unterbaus</li> </ul>

Tab. 3-4: Vergleich des dynamischen Plattendruckversuchs mit leichtem und mittelschwerem Fallgewicht mit dem statischen Plattendruckversuch

zungen erfasst werden. Der Gesamtanteil der irreversiblen Setzung erhöht sich dabei mit jeder Belastung. Aus diesen Untersuchungsergebnissen wäre auch das Verdichtungsverhalten ableitbar und könnte mit dem Verhältnis  $E_{v1}/E_{v2}$  verglichen werden.

**Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)**

Für Schichten ohne Bindemittel steht zudem ein flächendeckendes Messverfahren zur Verfügung, die „flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung“ (FDVK) [TP BF-StB Teil E 2, 1994]. Die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle lässt Erkenntnisse über gesamte Abschnitte zu.

Die Funktion des Messgerätes übernimmt in diesem Fall das Verdichtungsgerät, die Vibrationswalze. Das Prinzip kann bei allen mit Vibrationswalzen zu verdichtenden Böden angewendet und wird vor allem im Zuge des Einbaus zur Steuerung und Optimierung der Verdichtungsarbeiten genutzt.

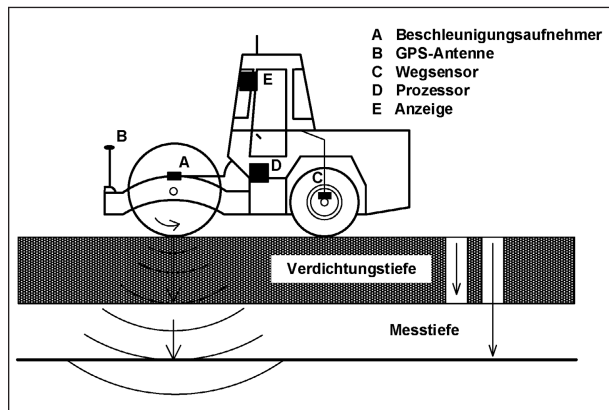


Bild 3-20: Walzenzug für FDVK-Messungen (Prinzipskizze) [Merkblatt FDVK, 1993]

An der Vibrationswalze sind Mess- und Registrierungsgeräte installiert, sodass bereits während der Verdichtungsarbeiten dynamische Kennwerte Hinweise auf den Verdichtungs- und Tragfähigkeitszustand des überwalzten Untergrunds liefern (siehe Bild 3-20).

Der Verdichtungszustand lässt sich über eine Analyse des Schwingungsverhaltens (Schwingungs-

amplituden) und des Energieeintrags ableiten. Dabei wird der Boden vereinfacht als homogener Halbraum angesehen, der zu keinen Eigenschwingungen fähig ist.

Die Vibrationswalze stellt eine zusätzliche Masse auf der Oberfläche dar, deren rotierende Massen Schwingungen erzeugen. Somit ist ein Schwingungssystem mit Eigenfrequenz und Resonanz vorhanden, sodass sich Schwingungen einstellen, die von der Dämpfung beeinflusst werden. Die Dämpfung wird von der inneren Reibung des Bodens, der Energieabstrahlung durch Raum- und Oberflächenwellen sowie von der für Kornumlagerungen verbrauchten Energie bestimmt. Zwischen Bewegungsenergie des Walzkörpers und der Energie des Schwingungssystems Walze-Boden findet ein ständiger Austausch statt. Die durch die Dämpfung verbrauchte Energie muss demnach durch den Antrieb der Vibrationswalze aufgebracht werden.

Bei fortschreitender Verdichtung nimmt die Steifigkeit des Bodens zu und der Leistungs- bzw. Energietransfer von der Walze in den Boden steigt.

So können die Beschleunigungssignale der Walze aufgezeichnet und in ein Kraft-Weg-Diagramm übertragen werden, aus dem wiederum die Steifigkeit des Bodens abgeschätzt wird.

Mit fortschreitender Verdichtungsarbeit verändern sich die Steifigkeit des Bodens und damit die Dämpfung des Schwingungssystems, sodass sich zudem über die Schwingungsanalyse der Verdichtungszustand des Bodens ableiten lässt.

Die Kräftewirkung zwischen Walze und Boden nimmt mit wachsender Verdichtung und Steifigkeit zu, infolgedessen Oberschwingungen auftreten. Das Amplitudenverhältnis zwischen erster Oberschwingung und Grundschiwingung kann als Maß für die Verdichtung verwendet werden [Merkblatt FDVK, 1993].

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den dynamischen Steifigkeiten mit dem Verformungsmodul und Verdichtungsgrad zu haben, ist vor Beginn der Messung eine Kalibrierung des Prüfgeräts erforderlich, wobei sich die Randbedingungen der Kalibrierung nach der genauen Prüfaufgabe richten und das Kalibrierfeld hinsichtlich der Dicke der Einbauschicht, der Bodenart und der Untergrundsteifigkeit auszuwählen ist [TP BF-StB Teil E 2, 1994].

Der Einsatz der dynamischen Belastung einer Vibrationswalze ist jedoch mit Einschränkungen verbunden. Böden mit geringer Dichte und hohen Sättigungsgraden (sowohl Sande als auch bindige Böden) neigen unter dieser Belastung zum Aufweichen, somit können in dem Fall keine zuverlässigen Messdaten erzeugt werden. Jedoch ist die Betrachtung solcher Böden eher nebensächlich, da ohnehin der Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit nicht erbracht werden kann. Des Weiteren ist für die direkte Korrelation zwischen erfasstem Messwert und einem zuzuordnenden Tragfähigkeitsindex (beispielsweise Verformungsmodul) die Bodenart und Wassersättigung zu beachten. Bei grobkörnigen Böden können bis zur vollen Wassersättigung eindeutige Korrelationen gefunden werden. Gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil von  $\leq 15$  M.-% zeigen gute Korrelationen bis zu einer Sättigung von 90 %. Bei gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil  $> 15$  % und bei feinkörnigen Böden ist die zuverlässige Zuordnung des Tragfähigkeitsindex bis zu einer Wassersättigung von 80 % gegeben [BRÄU, G.; VOGT, S., 2010].

## Bewertung

Die Analyse ungebundener Schichten erfolgt größtenteils mithilfe statischer und dynamischer Plattendruckversuche, die über Einsenkungs- und Setzungsmessungen infolge stufenweiser Be- und Entlastung (statischer Plattendruckversuch) oder infolge von Kraftstößen über ein Fallgewicht (dynamischer Plattendruckversuch) die Tragfähigkeit des Bodens ermitteln können. Den Vorteilen der präzisen Ergebnisse mit hoher Wiederholgenauigkeit steht gegenüber, dass aufgrund punktueller Messungen keine flächendeckenden Analysen möglich sind.

Bei der FDVK-Prüfmethode werden Daten bezüglich des Verdichtungsgrades sowie des Verformungsmoduls des Bodens erfasst, die durch eingetragene Schwingungen in den Boden über eine Vibrationswalze erzeugt 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.

Es ist möglich, die Mess- und Registrierungsgeräte auf andere Messfahrzeuge oder Prüfgeräte zu übertragen, sodass Messungen nach dem gleichen



Bild 3-21: Tragfähigkeitsmesssysteme auf ungebundener Befestigung

Prinzip der Schwingungsanalyse mit höherer Messgenauigkeit betrieben werden können.

Bild 3-21 zeigt vergleichend die aktuellen Tragfähigkeitsmesssysteme auf ungebundener Befestigung.

## 3.2 Georadar

Das Georadar (Ground Penetrating Radar – GPR, auch Bodenradar) ist eine etablierte geophysikalische Messmethode, mit der in situ die räumliche Ausdehnung des Schichtaufbaus im Untergrund, von Hohlräumen oder von Fremdkörpern nahe der Oberfläche abgebildet werden kann. Das Georadar gehört damit ebenso wie die Seismik zu einer Gruppe von in situ bildgebenden Verfahren.

### 3.2.1 Methodik

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 Reflektion 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

Reflektionsquelle 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.

### 3.2.2 Bewertung

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 Feuchtegehaltes kritisch zu sehen. Es bleibt zu prüfen, ob das Georadar zur Überprüfung der Schichtdicken bzw. der Gleichmäßigkeit der Eigenschaften eingesetzt werden kann.

## 3.3 Seismische Verfahren

Im Rahmen seismischer Verfahren (Geoseismik) erfolgt eine zerstörungsfreie Untergrundprüfung durch mechanische Anregung im akustischen Frequenzbereich (i. d. R. < 1 kHz). Die akustische Anregung kann kontinuierlich erfolgen (Vibroiseis-Verfahren) oder gepulst (Schlag- bzw. Impulshammer). Als Detektoren werden Arrays von Geophonen eingesetzt.

### 3.3.1 Methodik

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, z. B. 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 von der Tiefe gegeben. Oberflächenwellenseismik eignet sich zur flächig ausgedehnten Baugrunduntersuchung.

#### 3.3.2 Bewertung

Die seismischen Verfahren eignen sich aufgrund der großen Breite der gewonnenen Daten sehr gut zur In-situ-Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften granularer Schichten. Die Verfahren sind im Bereich der Geophysik etabliert und bewährt. Mit der großen Datenfülle steigen jedoch auch die Anforderungen an eine möglichst automatisierte Dateninterpretation. Die in ungebundenen Schichten zu erwartende starke Streuung elastischer Wellen erfordert eine große Intensität des Anregungssignals.

## 4 Laborprüfverfahren

### 4.1 Bildgebende Verfahren

Neben den bis hier beschriebenen In-situ-Messverfahren können zerstörungsfreie Messmethoden auch für einzelne Proben im Labor herangezogen werden. In den vergangenen Jahren erfuhren zerstörungsfreie, bildgebende Verfahren zur Charakterisierung von Geomaterialien eine enorme technische Entwicklung.

#### 4.1.1 Methodik

Röntgentomografieverfahren (Bild 4-1) erlauben dabei Auflösungen bis ca.  $1e-6$  m/Voxel bei komfortabler Bedienung und Scanzeiten im Bereich von einigen Stunden, vgl. [STOCK, 2008]. Durch die Ausführung als Röntgenvollschutzgeräte sind spezielle Röntgenstrahlabsorbierende Räume nicht notwendig – eine wichtige Voraussetzung für viele Nutzer. Auf Basis der dreidimensionalen Tomografie-daten können eine Vielzahl von wichtigen effektiven Eigenschaften von Böden ermittelt werden, wie z. B. die Porosität (Porenzahl), die mittlere Korngröße oder die geometrische Tortuosität. Darüber hinaus bieten diese Methoden aber auch den großen Vorteil, dass man für die o. g. Größen die statistische Verteilung innerhalb der Probe ermitteln kann, d. h. Porengrößenverteilungen, Korngrößenverteilungen etc. Aufwendige Laboruntersuchun-

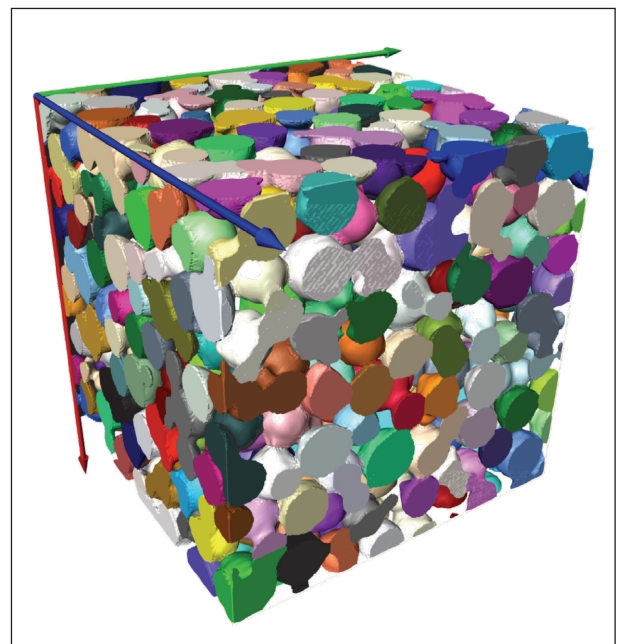


Bild 4-1: 3-dim mu-CT Röntgentomografieaufnahme einer Partikelprobe

gen, z. B. auf Basis von Quecksilberporosimetrie oder Lasergranulometrie, können reduziert oder gar ganz vermieden werden. Des Weiteren lassen sich auf Basis der 3-dim Tomografiedaten effektive physikalische Materialeigenschaften (Permeabilität, Reabhängige Tortuosität, Steifigkeiten, elektrische Leitfähigkeiten etc.) mittels numerischen Porenraumsimulationen (Digital Material Laboratory) ermitteln.

In den letzten Jahren wurden einige Anstrengungen unternommen um röntgenbasierte bildgebende Verfahren auch auf bituminöse Tragschichten zu übertragen, vgl. [WANG, 2011] und Forschungsbericht EMPA [JÖNSSON, et al., 2002; WANG, et al., 2001; HASSAN, et al., 2014]. In den Arbeiten von WANG wurden unter anderem Schädigungsparameter näher untersucht, [HASSAN et al., 2014], die durch die Auswertung von zweidimensionalen Schnittbilder (Radiografieaufnahmen) vor und nach einer mechanischen Belastung gewonnen wurden. Der verwendete Röntgentomograph ist allerdings von eingeschränkter Leistung (geringe räumliche Auflösung, 8-bit Graustufen-tiefe).

Wissenschaftliche Großforschungseinrichtungen (PSI – Paul-Scherer Institut, Villigen Schweiz; DESY – Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg) bieten für darüber hinausgehende Anforderungen an Bildqualität, Auflösung und Scanzeiten die Möglichkeiten der Synchrotron-basierten Röntgenmikrotomografie. Für Fluid-gesättigte Böden und spezielle dynamische Fragestellungen bietet sich, mit einer Beschränkung in Bildrate und Auflösung, darüber hinaus auch die Neutronentomografie an (u. a. Neutronen-Beamline am PSI).

Hochauflösende Neutronentomografie und Röntgentomografie wurde für kohäsionslose, fluid-gesättigte Böden zuletzt auch in der Kombination beider Verfahren angewandt, vgl. [KIM et al., 2013].

#### 4.1.2 Bewertung

Die genannten bildgebenden Verfahren erlauben eine feldliche Auswertung und Charakterisierung von Proben unter Laborbedingungen. Die Probenpräparation, d. h. 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 insbe-

sondere den Spannungszustand, aber natürlich auch morphologische Größen der Probe. Deswegen ist v. A. 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 (z. B. Simpleware<sup>®</sup> oder Avizo<sup>®</sup>) zurückgreifen. Darüber hinaus sind auch freie (Open Source) Softwarelösungen verfügbar (z. B. ImageJ).

Darüber hinaus sind in verschiedenen Tomografiesystemen auch physikalische Experimente (z. B. 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.

## 4.2 Schall- und Ultraschallverfahren

### 4.2.1 Methodik

Im Gegensatz zu den o. g. Tomografieverfahren können mit Schall- bzw. Ultraschallbasierte (20 kHz – 10 MHz) Verfahren aus den experimentell erhaltenen Laufzeiten von Puls-Echo, Through-Transmission-Untersuchungen oder Oberflächenwellen, akustische Wellengeschwindigkeiten (z. B. P- und S-Wellen) bzw. Scher- und Elastizitätsmodul (G, E) direkt bestimmt werden. Die gewählte Frequenz (Wellenlänge) des Signals bestimmt dabei die Auflösung der Untersuchung. Dämpfung und intrinsische Längenparameter (z. B. Korn-durchmesser) 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.

#### 4.2.2 Bewertung

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, vgl. Kapitel 4.1.2, 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 piezoelektronischen Schallköpfe. Somit sind wenigstens hypothetisch auch Überfahrten und damit großflächige Untersuchungen möglich.

### 5 Ansätze zur Modifizierung der vorhandenen Prüfverfahren

Für die zerstörungsfreie Untersuchung und Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der verdichteten Schichten werden im Folgenden zwei erfolgsversprechende 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.

#### 5.1 Harmonische Deflektometrie

Die harmonische Deflektometrie ist eine Weiterentwicklung des Falling Weight Deflectometers (FWD) und des dynamischen Plattendruckversuches. 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

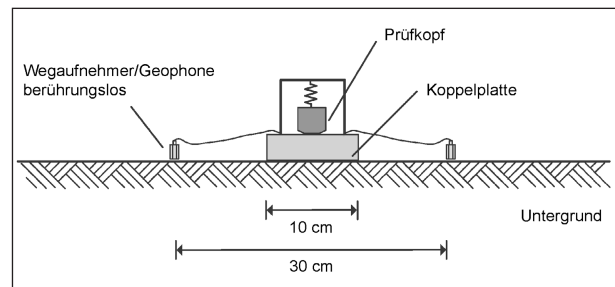


Bild 5-1: Harmonische Deflektometrie

10 kHz angeregt werden. Berührungslose Wegaufnehmer (kapazitive Aufnehmer oder Wirbelstromaufnehmer) oder alternativ Geophone bzw. Beschleunigungsaufnehmer sind zur weiteren Auswertung der Antwortsignale in einem definierten Abstand zur Lastmitte angebracht, vgl. Bild 5-1. 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.

Zur Umsetzung dieses Prüfverfahrens in die Praxis sind schätzungsweise Gesamtgerätekosten von 30.000 bis 40.000 Euro notwendig. Der Personalaufwand für die Geräteinbetriebnahme, Optimierung der Einstellungen und Validierung der ersten Ergebnisse ist hierin nicht enthalten und lässt sich nicht hinreichend belastbar abschätzen. Gegebenenfalls könnte dies im Rahmen eines anschließenden Forschungsprojektes erfolgen, wenn entsprechende Geräteinvestitionen erfolgt sind.

#### 5.2 Reflexionsmessung

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 (Bild 5-2). Die Wellenlänge des Erregersignals wird dabei an die inhärente Mikrostruktur des Bodens bzw. der Schichtdicken angepasst und



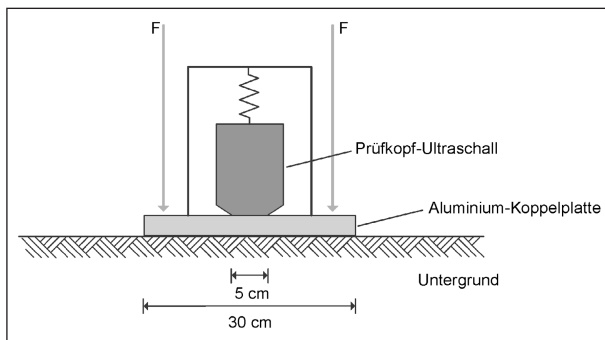


Bild 5-2: Reflexionsmessung

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 ggfs. 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, z. B. mit modulierten Signalen oder Wavelets, gezielt anregen. Die erzeugten Signale (i. d. R.  $\pm 10$  V) müssen dann mittels einem Leistungsverstärker (z. B. E&I 1.040L) 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-Rauschverhältnis erzeugen, die anschließend in einem Postprocessing-Schritt ausgewertet werden können (Bestimmung der über die Schichtdicke gemittelten mechanischen Steifigkeiten).

Ebenso wie bei dem Verfahren harmonische Deflektometrie wurden für die Reflexionsmessung die anfallenden Kosten zur Konstruktion eines Messgerätes abgeschätzt. Zur Umsetzung der Reflexionsmessmethode in die Praxis sind schätzungsweise Gesamtgerätekosten von 20.000 bis 30.000 Euro erforderlich. Auch hier ist der Personalaufwand für die Geräteinbetriebnahme, Optimierung der Einstellungen und Validierung der ersten Ergebnisse exklusive und lässt sich ebenfalls nicht hinreichend belastbar abschätzen. Ebenso könnte dieser Arbeitsschritt im Rahmen eines anschließenden Forschungsprojektes erfolgen, wenn entsprechende Geräteinvestitionen erfolgt sind.

### 5.3 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  $\lambda$ , d. h. der Ortsauflösung der Verfahren, dargestellt (Bild 5-3). Auf der einen Seite stehen die bildgebenden und die Schall- und Ultraschallverfahren. Diese Verfahren werden im Labor durchgeführt und decken einen Wellenlängenbereich von ungefähr  $10^{-6}$  m bis  $10^{-1}$  m ab. Die Mikrostruktur der zu prüfenden Schicht liegt vergleichend dazu im Bereich zwischen  $10^{-4}$  m und  $10^{-2}$  m.

Auf der anderen Seite werden die In-situ-Messverfahren aufgeführt. Dazu zählen das Georadar, die seismischen Verfahren, die bekannten Verfahren zur Tragfähigkeitsanalyse (vgl. Kapitel 3.1) und die modifizierten Verfahren. Anhand Bild 5-3 ist deutlich zu erkennen, dass sich der Wellenlängenbereich gegenüber den Labormethoden auf  $10^{-1}$  m bis  $> 10^2$  m verschiebt und sich mit den In-situ-Verfahren die Bereiche von typischen Schichtdicken gut erfassen lassen.

## 6 Aufbau der Datenbank mit Citavi®

Für eine systematische, nachvollziehbare und erweiterbare Literaturstudie, wurden die Quellen mit dem Literaturverwaltungsprogramm Citavi® (Bild 6-1) sortiert. Citavi® dient zur Literaturrecherche, Verwaltung von Literaturquellen und zur Wissensorganisation durch Zitate und Anmerkungen. In diesem Projekt wurden die Texte verschiedenen Kategorien und Schlagwörtern zugeordnet sowie eine Kurzfassung/Abstract hinterlegt.

Die detektierten Prüfverfahren wurden in folgende Kategorien unterteilt:

1. In-situ-Prüfverfahren,
  - 1.1 Tragfähigkeitsanalysen,
    - 1.1.1 gebundene Schichten,
    - 1.1.2 ungebundene Schichten,
  - 1.2 Georadar,

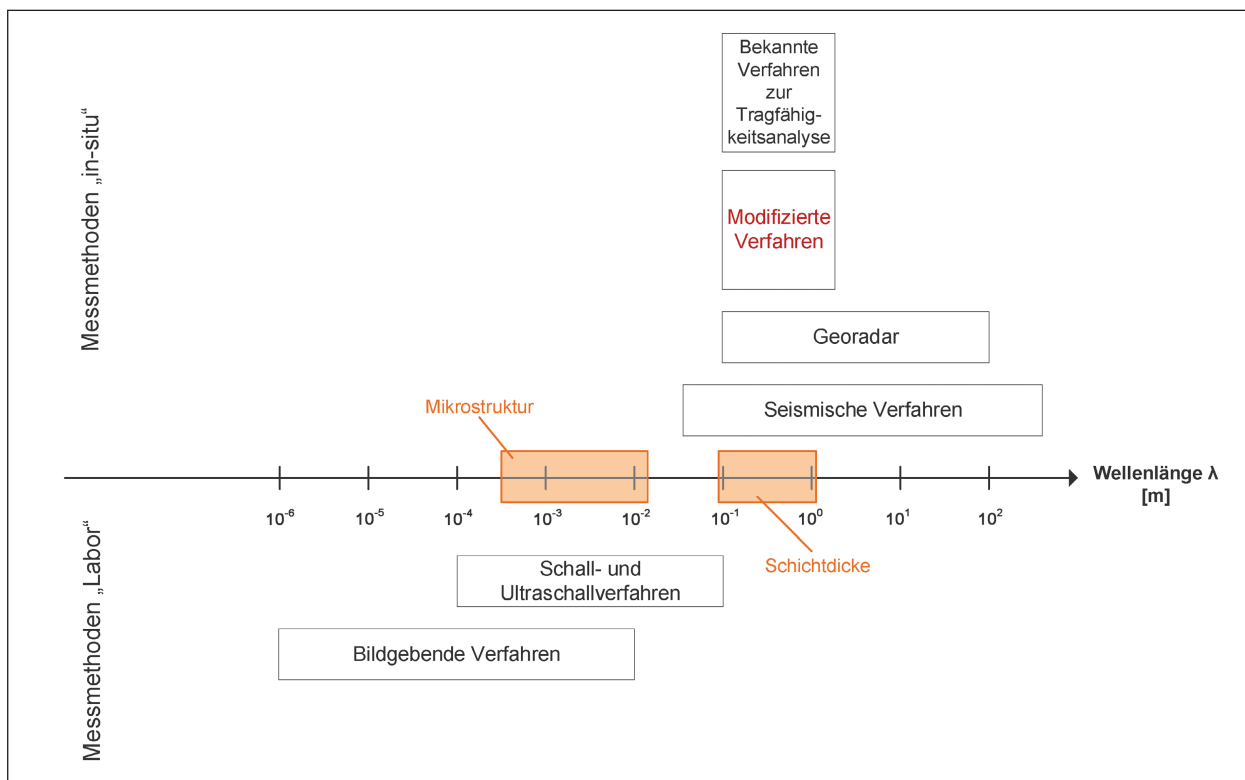


Bild 5-3: Messmethoden in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$

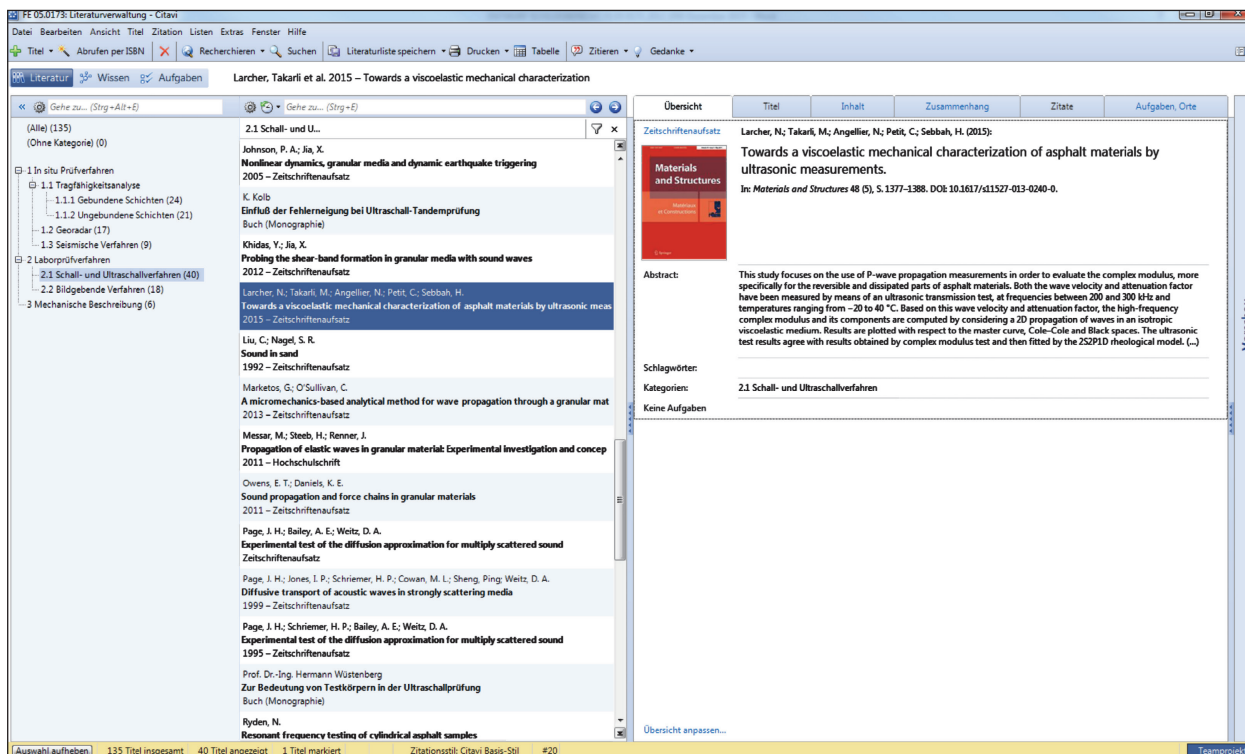


Bild 6-1: Benutzeroberfläche Citavi®

- 1.3 seismische Verfahren,
2. Laborprüfverfahren,
- 2.1 Ultraschallverfahren,
- 2.2 bildgebende Verfahren,
3. mechanische Beschreibung.

## 7 Zusammenfassung

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

Die Tragfähigkeit ungebundener Schichten, die entscheidend für die Qualität und Dauerhaftigkeit eines Straßenoberbaus ist, wird bisher ausschließlich punktuell durch statische oder dynamische Plattendruckversuch ermittelt und kann somit nicht als maßgebend für die gesamte untersuchte Schicht angenommen werden.

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.

Die interdisziplinäre Literaturrecherche, die Auswertung und die theoretische Übertragung auf den ungebundenen Straßenbau führten zu zwei technisch sinnvollen Messmethoden. Für die beiden Messmethoden wurden vorläufige Arbeitstitel „Harmonische Deflektometrie“ und „Reflexionsmessung“ vorgeschlagen. Beide Prüfmethode sind vergleichsweise einfach durchzuführende dynamische Messverfahren. Die Messungen an sich finden jedoch stationär aber zerstörungsfrei statt. Durch wiederholte Messungen in definierten Abständen können die mechanischen Eigenschaften und die Schichtdicken ansatzweise flächendeckend abgeleitet werden. Theoretisch ließen sich beide Messmethoden mit Georadarmessungen verknüpfen, um eine annähernd flächendeckende Aussage zu bekommen. Allerdings ist fraglich, ob bisherige Georadar-

antennen die notwendigen Genauigkeiten liefern, um die erforderlichen Schwankungen der Schichteigenschaften bei unbekanntem Feuchtegehalt hinreichend genau abzubilden.

Bisherige Erfahrungen zeigen, dass moderne Georadarsysteme nur zur Überprüfung der Schichtdicken und bedingt zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Eigenschaften der zu prüfenden Schicht (Dichte) angewendet werden können. Inwieweit die Genauigkeiten der Dichtebetrachtung mit dem Georadar in Kombination mit den punktuellen Ergebnissen der beiden neuen Messmethoden zu einer aussagekräftigen, flächendeckenden Beurteilung der mechanischen Eigenschaften führen kann, ist zu überprüfen.

## Literatur

- AP Trag Teil A: Arbeitspapier Tragfähigkeit: Messsysteme, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 2013
- AP Trag Teil B 1: Arbeitspapier – Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen: Benkelman-Balken: Gerätebeschreibung, Messdurchführung, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 2014
- AP Trag Teil B 2.1: Arbeitspapier Tragfähigkeit: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen. Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 2008
- AP Trag Teil B 4: Arbeitspapiere Tragfähigkeit: Curviametro, Gerätebeschreibung Messdurchführung, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 2012
- AP Trag Teil C 1: Arbeitspapier Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen: Benkelman-Balken: Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 2014
- BALTZER, S.; PRATT, D.; WELIGAMAGE, J.; ADAMSEN, J.; HILDEBRAND, G.: Continuous bearing capacity profile of 18,000 km Australian road network in 5 months, 24<sup>th</sup> ARRB Conference – Building on 50 years of road and transport research, Melbourne, Australia 2010

- BAS: Falling Weight Deflectometer (FWD), Einsatz und Verfahrensbeschreibung, 2015
- BAY, J. A.; STOKOE, K. H.: Development of a Rolling Dynamic Deflectometer for continuous deflection testing of pavements, University of Texas, Austin, 1998
- BRÄU, G.; VOGT, S.: Bodenspezifische Anwendungsgrenzen der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK), BauPortal 9/2010, S.547-550, München, 2010
- 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
- FHWA: [www.fhwa.dot.gov/pavement/management/rwd/](http://www.fhwa.dot.gov/pavement/management/rwd/), Rolling Wheel Deflectometer, Network-level Pavement Structural Evaluation, Measuring Deflection at Highway Speeds, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, abgerufen: 2015
- FE 07.0246/2011 AGB: Einfluss viskositätsverändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe, Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE 07.0246/2011 AGB, 2014
- GRÄTZ, B.; SUß, G.: Der Einsatz des Benkelman-Balkens zur Beurteilung des Steifigkeitsverhaltens, Bitumen 2/1984, S. 69-77, 1984
- GRÄTZ, B.: Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmeanarten – Teil 1, Straße und Autobahn, S. 572-580, 9.2009
- GRÄTZ, B.: Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmeanarten – Teil 2, Straße und Autobahn, S. 664-670, 10.2009
- Greenwood Engineering: [www.greenwood.dk/tsd.php](http://www.greenwood.dk/tsd.php), Traffic Speed Deflectometer, 2015
- GROßMANN, A.: Zerstörungsfrei arbeitende Messverfahren zur Substanzbewertung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Arbeitsgruppentagung Infrastrukturmanagement, Bamberg, 2009
- HASSAN, N. A.; AIREY, G.; HAININ, M. R.: Characterisation of micro-structural damage in asphalt mixtures using image analysis, Construction and Building Materials, 54, 27-38, 2014
- JOL, H.: Ground penetrating radar theory and applications, Elsevier, 2008
- JÖNSSON, M.; PARTL, M. N.; FLISCH, A.: Comparison of Different Compaction Methods Using X-ray Computer Tomography (No. 113/12 (EMPA No. FE 840544)) (pp. 1-82), EMPA – Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, 2002
- KIM, F. H.; PENUMADU, D.; GREGOR, J.; KARDJILOV, N.; MANKE, I.: High-Resolution Neutron and X-Ray Imaging of Granular Materials, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139 (5), 715-723, 2013
- Merkblatt FDVK: Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 1993
- Merkblatt Plattendruckversuch: Merkblatt Plattendruckversuch DIN 18134, IGEWA GmbH, 2006
- PILLING, M.: Identifikation von zerstörungsfreien Messverfahren und ihre Möglichkeiten zur Anwendbarkeit im Straßenbau, Masterarbeit LVW, 2015 (unveröffentlicht)
- RASMUSSEN, S.; KRARUP, J. A.; HILDEBRAND, G.: Non-contact Deflection Measurement at High Speed, bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Balkema, 1, S. 53-60, 2002
- SACR: Erhebung und Beurteilung der Tragfähigkeit mittels Lacroix-Deflektionen, Ingenieurbüro und Labor für die Straßenerhaltung, 2008

- SCULLION, T.: Using Rolling Deflectometer and Ground Penetrating Radar Technologies for Full Coverage Testing of Jointed Concrete Pavements, Texas Transportation Institute, Austin, 2006
- 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, 60-65, 2013
- STOCK, S.: *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications*, CRC Press, 2008
- STOKOE II, K. H.; LEE, J.-S.; LEWIS, M.; HAYES, R.; SCULLION, T.; LIU, W.: Developing a Testing Device for Total Pavements Acceptance – Final Report, FHWA/TX-13/0-6005-3, University of Texas at Austin. Center for Transportation Research (CTR), Austin, Texas, 2013
- 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 Straßenwesen e. V., Köln, 2012
- TP BF-StB Teil E 2: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e. V., Köln, 1994
- TP Gestein-StB Teil 8.2.1: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 8.2.1: Dynamischer Plattendruckversuch mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgesetz, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2012
- WANG, L.: *Mechanics of Asphalt*, McGraw Hill, New York, 2011
- WANG, L. B.; FROST, J. D.; SHASHIDHAR, N.: Microstructure study of WesTrack mixes from X-ray tomography images, *Transportation Research Record*, 1767, 85-94, 2001
- WISTUBA, M.; BLAB, R.; LITZKA, J.: Oberbauverstärkung von Asphaltstraßen. Schriftenreihe Straßenforschung (Wien) H. 546, 2004
- ZIEKUR, R.: Georadar in der Bodenkunde. *Geologisches Jahrbuch der BGR Hannover*, Vol. E 52, 9-34, 2000
- ZTV E-StB: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln, 2009
- ZYWICKI, D. J.: Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 1999

## Bilder

- Bild 3-1: Einflüsse auf die Tragfähigkeit einer Straßenbefestigung [CHAKAR, C., 2010] gemäß [WISTUBA, M. et al., 2004]
- Bild 3-2: Prinzip des Benkelman-Balkens [AP Trag Teil A, 2013]
- Bild 3-3: Muldenmessung mit dem Lacroix-Deflektographen [SACR, 2008]
- Bild 3-4: Prinzipskizze des Curviametro-Messfahrzeugs [AP Trag Teil B 4, 2012]
- Bild 3-5: oben: Verformungs-Zeit-Kure (grün) und Reaktion des Geophons (rot); unten: Beispiel für die Visualisierung der Daten [AP Trag Teil B 4, 2012]
- Bild 3-6: Prinzip der Erzeugung und Messung der Deflektionsmulde [AP Trag Teil B 2.1, 2008]
- Bild 3-7: Darstellung des Messbalkens beim RWD [GROßMANN, A., 2009]
- Bild 3-8: Darstellung der Messmethode und Anordnung der Laser beim RWD [ELSEIFI, M. et al., 2012]
- Bild 3-9: Anordnung der Lasersensoren beim RDT [ELSEIFI, M. et al., 2012]
- Bild 3-10: Prinzip des High Speed Deflectograph (hier: Version mit vier Laser-Dopplersensoren) [ELSEIFI, M. et al., 2012; BALTZER et al., 2010]

- Bild 3-11: Deflektionsmessung mithilfe der Laser-Doppler-Technik [Greenwood Engineering, 2015]
- Bild 3-12: Deflektionsmessung mithilfe der Laser-Doppler-Technik [Greenwood Engineering, 2015]
- Bild 3-13: Messwertanalyse bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten [RASMUSSEN, S. et al., 2002]
- Bild 3-14: Vergleich der Messdaten von HSD und FWD [RASMUSSEN, S. et al., 2002]
- Bild 3-15: Total Pavement Acceptance Device TPAD [STOKOE et. al., 2013]
- Bild 3-16: Tragfähigkeitsmesssysteme auf gebundener Befestigung
- Bild 3-17: Schematische Darstellung des leichten bzw. mittelschweren Fallgewichtsgeräts nach [TP BF-StB Teil B 8.3, 2012 bzw. TP Gestein-StB Teil 8.2.1, 2012]
- Bild 3-18: Prinzipskizze zum zeitlichen Verlauf der Kraft und der Setzung bei Stoßbelastung mit leichtem oder mittelschwerem Fallgewichtsgerät [TP BF-StB Teil B 8.3, 2012]
- Bild 3-19: Setzungsverlauf durch die Stoßbelastung des dynamischen Plattendruckversuchs
- Bild 3-20: Walzenzug für FDVK-Messungen (Prinzipskizze) [Merkblatt FDVK, 1993]
- Bild 3-21: Tragfähigkeitsmesssysteme auf ungebundener Befestigung
- Bild 4-1: 3-dim  $\mu$ -CT Röntgentomografieaufnahme einer Partikelprobe
- Bild 5-1: Harmonische Deflektometrie
- Bild 5-2: Reflexionsmessung
- Bild 5-3: Messmethoden in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$
- Bild 6-1: Benutzeroberfläche Citavi®

## Tabellen

- Tab. 3-1: Vergleich der verschiedenen Messsysteme [AP Trag Teil A, 2013]
- Tab. 3-2: Richtwerte für die Zuordnung vom statischen Verformungsmodul  $E_{v2}$  zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden nach [ZTV E-StB, 2009]
- Tab. 3-3: Richtwerte für die Zuordnung vom dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden nach nach [ZTV E-StB, 2009]
- Tab. 3-4: Vergleich des dynamischen Plattendruckversuchs mit leichtem und mittelschwerem Fallgewicht mit dem statischen Plattendruckversuchs

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung  
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden  
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts  
Durner € 15,00

## 2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control  
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung  
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier  
Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn  
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen  
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®  
Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgebundenen, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht  
Radenberg, Miljković, Schäfer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung  
Müller, Seidel, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten  
Hünger, Börner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten  
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche  
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)  
Neubeck, Wiesebrock  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen  
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung  
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel  
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren  
Dudenhöfer, Rückert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel  
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt  
Böhm, Beara  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt  
Wistuba, Alisov, Isailović  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen  
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb  
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial  
Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013  
Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern  
Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

## 2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden  
Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften  
Radenberg, Nytus, Gehrke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette  
Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels  
Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)  
Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)  
Alisov, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt  
Zander, Buch, Birbaum  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen  
Schellenberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt  
Mollenhauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes  
Wistuba, Isailović  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein  
Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau  
Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte  
Renken, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme  
Wacker, Scherckenbach, Jansen in Vorbereitung  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen  
Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler, Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak in Vorbereitung  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine  
Möller, Bundschuh, Birle, Heyer € 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils  
Stephan, Weigel € 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte  
Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie  
Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)