

## Schaffung eines Bewertungshintergrundes für den Nachweis der Tragfähigkeit mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgerät

FA 6.094

Forschungsstelle: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)  
 Bearbeiter: Bräu, G. / Vogt, S.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn  
 Abschluss: Mai 2014

### 1 Aufgabenstellung

In den ZTV E-StB 09 existieren bezüglich der Tragfähigkeit Anforderungswerte, welche mit dem (statischen) Plattendruckversuch nach DIN 18134 oder gleichwertig mit dem Leichten Fallgewichtsgerät nach TP BF-StB, Teil B 8.3 nachgewiesen werden dürfen. Im Bereich von Tragschichten des Oberbaus sind bis jetzt nach ZTV SoB-StB 04 Anforderungswerte an die Tragfähigkeit nur im Bezug auf  $E_{v2}$ -Werte, welche mit dem statischen Plattendruckversuch ermittelt werden, angegeben. Ziel der Arbeit war die Schaffung einer durch Versuche unter kontrollierten Randbedingungen gewonnenen Datenbasis, in der primär der Zusammenhang des  $E_{v2}$ -Werts zum  $E_{vd,M}$ -Wert, welcher unter Verwendung des Mittelschweren Fallgewichtsgeräts gemäß TP Gestein-StB, Teil 8.2.1 gemessen wird, mithilfe statistischer Methoden interpretiert werden kann.

Kern der Arbeiten lag somit in versuchstechnischen Untersuchungen an einem 2-Schichten-System bestehend aus einer Unterlage (Planum, Frostschuttschicht oder ggf. Untergrund) und einer ungebundenen Tragschicht des Straßenoberbaus gemäß ZTV SoB-StB 04. Dabei wurden verschiedene Dicken der Tragschicht unter Verwendung des statischen und dynamischen Plattendruckversuchs mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgerät untersucht. Die eingebauten Materialien der Tragschicht sowie das Material und die Steifigkeit der Unterlage wurden ebenfalls variiert. In Ergänzung dazu war der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  der beiden Schichten zu dokumentieren und mit den Anforderungswerten zu vergleichen. Dadurch sollten in späteren Auswertungen Informationen zum Einfluss der Tragschichtdicke, des Tragschichtmaterials sowie der Steifigkeit der Unterlage auf mögliche Korrelationen zwischen den Verformungsmoduln  $E_{v2}$  sowie  $E_{vd,M}$  gewonnen werden. Die geschaffene Datenbasis soll als Bewertungshintergrund zur Schaffung von Anforderungswerten an den  $E_{vd,M}$ -Wert dienen. Vor Durchführung der Reihenuntersuchungen mussten die verwendeten Fallgewichtsgeräte einer Kalibrierung bzw. einer Überprüfung der vorab herstellereitigen Kalibrierung unterzogen werden. Ferner sollten klassifizierende Versuche die verwendeten Böden bzw. Tragschichtmaterialien dokumentieren. Begleitet werden sollten die experimentellen Arbeiten durch Untersuchungen an theoretischen Modellen, in denen wesentliche Einflussgrößen, die etwa aus der Interferenz an der Schichtgrenze Tragschicht – Unterlage oder der Steifigkeit und Dichte der Böden bzw. Tragschichtmaterialien folgen, herauszustellen waren.

### 2 Untersuchungsmethodik

Die Arbeiten gliedern sich in einen theoretischen Teil und die experimentellen Untersuchungen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf Reihenversuchen auf unterschiedlichen Tragschichtaufbauten zur Schaffung einer Datenbasis, die zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen dem  $E_{v2}$ -Wert und dem  $E_{vd,M}$ -Wert herangezogen wurde. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch Vergleichsversuche, in denen geräte- bzw. herstellerepezifische Unterschiede ermittelt wurden.

Es wurden unterschiedliche **bodendynamische Modelle** herangezogen und auf die Problemstellung angepasst, um eine Interpretation der auf den unterschiedlichen Tragschichtaufbauten gewonnenen Versuchsergebnisse zu ermöglichen. Einige der Modelle wurden bereits im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben FE 5.138 benutzt und sind um die Problematik der Analyse eines Mehrschichtsystems mit unterschiedlichen Steifigkeits- und Dämpfungsparametern ergänzt worden. Zur Kalibrierung der Modellparameter

- Unterlage: Festigkeit, Steifigkeit, Dämpfung
- Tragschicht: Festigkeit, Steifigkeit, Dämpfung
- Fallgewichtsgerät: Fallhöhe, Fallgewicht, Federpaket (Steifigkeit und Dämpfung)

wurden neben Erfahrungswerten neue Messdaten herangezogen, die insbesondere die Parameter des Mittelschweren Fallgewichtsgeräts sowie bodenmechanische Kenngrößen der verwendeten Böden und Tragschichtmaterialien beschreiben können. Die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse wurde stichpunktartig im Rahmen einer Validierung nachgewiesen. Mit den theoretischen Berechnungen konnte neben der Ermittlung maßgebender Einflussparameter, wie Schichtdicken der Tragschichten und Steifigkeit der Unterlage, die Ermittlung von relevanten Versuchsrandbedingungen erfolgen. Damit war es möglich, die Versuchsergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität (Trend) zu überprüfen.

Mit **experimentellen Reihenuntersuchungen** wurde eine Datenbasis zur Ermittlung des Zusammenhangs  $E_{v2}$ -Wert zu  $E_{vd,M}$ -Wert gewonnen. Die Versuchsrandbedingungen wurden im Wesentlichen durch den Auftraggeber vorgegeben. Dazu zählen auch die Kriterien hinsichtlich der CBR-Werte und des Ursprungs der Tragschichtmaterialien (Tabelle 1).

An den Tragschichtmaterialien wurden zunächst klassifizierende Versuche durchgeführt (Kornverteilung gemäß DIN 18123, Proctorversuche gemäß DIN 18127 und CBR-Versuche gemäß TP BF-StB, Teil B 7.1). Die Planung der Versuche sah nach Auftrag die in Tabelle 2 dargestellten Tragschichtaufbauten vor. Es wurden auf zwei unterschiedlichen Niveaus der Steifigkeit der Unterlage ( $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$  und  $E_{v2} = 120 \text{ MN/m}^2$ ) drei ver-

schieden starke Schichtdicken der ungebundenen Tragschicht von 15, 30 und 45 cm untersucht. Jeweils eine Kombination aus  $E_{v2}$ -Wert bzw. Boden der Unterlage, Tragschichtmaterial und Schichtdicke der Tragschicht definierte eine Versuchsreihe. Insgesamt wurden  $2 \times 3 \times 4 = 24$  Kombinationen in Versuchsreihen untersucht.

Tabelle 1: Gemäß Auftrag zu untersuchende Tragschichtmaterialien

Bezeichnung	Tragschichtmaterial 1	Tragschichtmaterial 2	Tragschichtmaterial 3	Tragschichtmaterial 4
angestrebter CBR-Wert	45 %	65 %	90 %	125 %
vom Auftraggeber vorgeschlagenes Material	"Rundkorngemisch"	"Breckkorngemisch aus Kalkstein"	"Breckkorngemisch aus Naturstein"	"RC-Tragschichtmaterial mit Natursandanteil"

Tabelle 2: Randbedingungen der Versuchsreihen (Zielwerte gemäß Auftraggeber)

Schichtdicke	$E_{v2}$ -Wert der Unterlage	CBR-Wert des Tragschichtmaterials			
		Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
15 cm	45 $\text{MN/m}^2$	45 %	65 %	90 %	125 %
	120 $\text{MN/m}^2$	45 %	65 %	90 %	125 %
30 cm	45 $\text{MN/m}^2$	45 %	65 %	90 %	125 %
	120 $\text{MN/m}^2$	45 %	65 %	90 %	125 %
45 cm	45 $\text{MN/m}^2$	45 %	65 %	90 %	125 %
	120 $\text{MN/m}^2$	45 %	65 %	90 %	125 %

### 3 Untersuchungsergebnisse

Aus den Berechnungen der **bodendynamischen Modelle** lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen, welche eine vertiefende Interpretation der Versuchsergebnisse ermöglichen.

- Die Beanspruchung des Bodens bzw. des Tragschichtmaterials hängt wie beim Leichten Fallgewichtsgerät auch beim Mittelschweren Fallgewichtsgerät deutlich von der Bodensteifigkeit ab. Erst für eine hohe Bodensteifigkeit am Rande der baupraktischen Relevanz ist die Stoßkraft auf dem nachgiebigen Boden bzw. Tragschicht in etwa gleich der Stoßkraft, welche am Kalibrierstand unter sehr starren Verhältnissen nachzuweisen ist. Die Kontaktspannung liegt für plausible Bodenparameter für einen weiten Anwendungsbereich über der Spannung, welche in der

Auswerteformel zur Bestimmung des  $E_{vd}$ - bzw.  $E_{vd,M}$ -Werts angesetzt wird.

- Für steife grobkörnige Tragschichtmaterialien sind Dichten in einer Größenordnung zwischen  $2000 \text{ kg/m}^3$  und  $2500 \text{ kg/m}^3$  sowie Querdehnzahlen zwischen 0,20 und 0,35 gewöhnlich. Setzt man das Modell eines elastisch homogenen Halbraums an, so gilt nahezu  $E_v = E_{vd}$  bzw.  $E_{vd,M}$ . Nichtlinearitäten, die aus der geometrischen Abstrahlungsdämpfung entstehen, spielen in der untersuchten Parameterbandbreite nur eine untergeordnete Rolle. Erfahrungswerte aus Felduntersuchungen, wonach  $E_{v2} \approx 2 \cdot E_{vd,M}$  bzw.  $2 \cdot E_{vd}$  gilt, können mit derart einfachen Modellen nicht abgebildet werden.
- Bei einem 2-Schichten-System wird an der Schichtgrenze Tragschicht – Unterlage ein Teil des Impulses aus dem Fallgewichtsgerät reflektiert. Die zurücklaufende Welle reduziert die Gesamtsetzung der Lastplat-

te und stellt einen Effekt dar, der bei der Durchführung des statischen Plattendruckversuchs nicht zum Tragen kommt. Der  $E_{vd}$ - bzw.  $E_{vd,M}$ -Wert liegt demnach im elastischen Bodenmodell stets über dem  $E_v$ -Wert. Hohe Steifigkeitsunterschiede zwischen Tragschicht und Unterlage begünstigen die Reflexion. So liegt der  $E_{vd,M}$ -Wert bei einer 60 cm starken Tragschicht und bei einer gegenüber der Tragschicht fünfmal weicheren Unterlage um 40 % über dem entsprechenden statischen  $E_v$ -Wert. Aus einer rein elastischen Modellierung des Bodens folgt demnach, dass der Zusammenhang zwischen statischen und dynamischen Messwerten deutlich von der Dicke der Tragschicht und dem Steifigkeitsverhältnis zur Unterlage abhängt.

- Bei einer genaueren Nachrechnung der Ergebnisse aus statischen und dynamischen Plattendruckversuchen mit elasto-plastischen Stoffmodellen ist eine richtige Erfassung der spannungsabhängigen Steifigkeitsänderung wichtig. Bei zutreffender Modellparameterwahl kann die Spannungs-Verformungskurve eines statischen und dynamischen Plattendruckversuchs sehr gut wiedergegeben werden. Dies ermöglicht prinzipiell auch die Abbildung, dass – wie die Versuchsergebnisse zeigen – der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  bzw.  $E_{vd,M}$  deutlich kleiner ist als der statische Verformungsmodul  $E_{v2}$ .

Während der ersten Versuchsreihen auf unterschiedlichen Tragschichten wurde erkannt, dass es bei der Setzungsermittlung zwischen den MFG-Geräten von zwei Herstellern signifikante gerätespezifische Unterschiede gibt. Um Effekte aus dem Untergrund auszuschließen, welche prinzipiell die Messwerte auch auf der vergleichsweise homogen verdichteten Tragschicht beeinflussen können, wurden **Vergleichsversuche** geplant und durchgeführt, bei denen im Wechsel auf einem Punkt jeweils aufeinander folgende Stöße mit den beiden Geräten ausgeführt wurden. Es wird darauf hingewiesen, dass aus den Protokollen der vorschriftsmäßigen und gültigen Kalibrierungen keine Hinweise zu finden waren, welche zu Diskrepanzen in der folgend beschriebenen Größenordnung führen können.

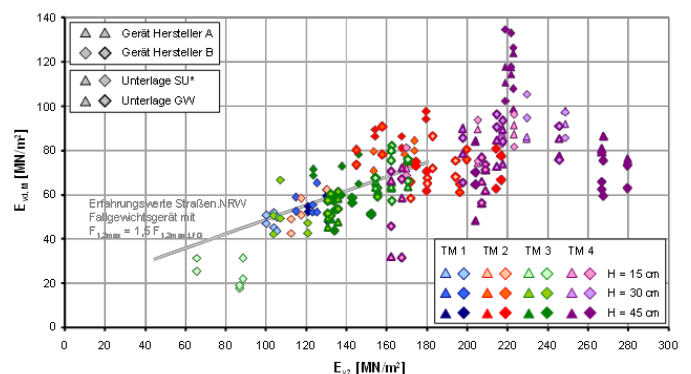
Durch die Vergleichsversuche konnte die fehlerhafte Messwertfassung eines Mittelschweren Fallgewichtsgeräts eindeutig dokumentiert werden. Jedoch zeigten auch weiterhin zwischenzeitlich zugesendete Geräte, welche alle die Anforderungen der Kalibriervorschrift erfüllten, Unterschiede in ihrer Stoß- und Setzungscharakteristik auf, obwohl sie auf den Tragschichten neben der erkennbaren großen Bandbreite an Streuungen für baupraktische Belange ähnliche Messwerte unter gleichen Randbedingungen liefern. Es lassen sich zwei Problemkreise zusammenfassend eingrenzen:

- Geräte, welche die Kalibriervorschrift hinsichtlich Belastungs- und Setzungsmesseinrichtung erfüllen, können bei gleichen Steifigkeitsverhältnissen im Kalibrierstand signifikant unterschiedliche Setzungen erzeugen; d. h., auf gleichen Gummipplatten werden bei einem Kalibrierstand unterschiedliche Absolutsetzungen durch das geräteinterne Messverfahren und durch das Referenzmesssystem festgestellt.

- Unter den Randbedingungen des Kalibrierstands werden sehr viel kleinere Beschleunigungen der Lastplatte erzeugt als auf einer Tragschicht. Abweichungen der Setzungsmesseinrichtung, die auf die hohen Beschleunigungen sensibel reagieren, können bei der Durchführung einer Gerätekalibrierung nicht erkannt werden.

Aus den **Reihenversuchen** auf den in Tabelle 2 definierten Tragschichtaufbauten konnten Ergebnisse gewonnen werden, die den Zusammenhang zwischen den Messwerten des statischen Plattendruckversuchs und des Plattendruckversuchs mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgesetz beschreiben. Aufgrund gerätespezifischer Unterschiede im Bezug auf die eingesetzten Versuchsgeräte wurden jeweils getrennte Auswertungen bezogen auf jeweils ein Versuchsgerät getätigt. Im Gegensatz dazu zeigt Bild 1 zusammenfassend alle Ergebnisse der Reihenuntersuchungen. Nicht berücksichtigt wurden Daten aus Versuchen, in denen ein offensichtlich fehlerhaft messendes Mittelschweres Fallgewichtsgesetz verwendet wurde.

Der Einfluss der Tragschichtdicke und des Tragschichtmaterials auf den Zusammenhang  $E_{v2} - E_{vd,M}$  kann primär aufgrund der Streuungen und der geringen Anzahl an Einzelversuchen nicht zuverlässig analysiert werden. Dazu zeigt sich, dass je nach Schichtdicke und Tragschichtmaterial nicht das ganze Spektrum zwischen  $E_{v2} = 120 \text{ MN/m}^2$  und  $180 \text{ MN/m}^2$  zu erzeugen war. Die Untersuchungen z. B. am RC-Beton konnten größtenteils nicht weiter verwendet werden, da hier die  $E_{v2}$ -Werte weit über dem für die Korrelation definierten Wertebereich zwischen  $E_{v2} = 100 \text{ MN/m}^2$  und  $200 \text{ MN/m}^2$  lagen. Auffallend war in diesem hohen Steifigkeitsbereich die Zunahme des  $E_{v2}$ -Werts bei etwa konstanter bzw. sogar leicht abnehmender Bandbreite der Messwertstreuung des Mittelschweren Fallgewichtsgesetzes. Ferner ergaben sich im Zusammenhang mit einer weichen Unterlage aus "bindigem Sand" mit einem Zielwert  $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$  oft geringere  $E_{v2}$ -Werte, die kleiner als  $100 \text{ MN/m}^2$  waren. Ein deutlicher Trend, dass zumindest abschnittsweise die Korrelation von den Randbedingungen Schichtdicke und Tragschichtmaterial beeinflusst werden, war daher nicht zu erkennen.



**Bild 1: Ergebnisse der Reihenversuche**

## 4 Folgerungen für die Praxis

Basis zur Schaffung des im Folgenden gezeigten Vorschlags zur Definition von Anforderungswerten  $E_{vd,M}$  im Bezug zu den  $E_{v2}$ -Werten gemäß ZTV SoB-StB waren Versuchsdaten, die im Bereich der  $E_{v2}$ -Werte zwischen 100 MN/m<sup>2</sup> und 200 MN/m<sup>2</sup> liegen. Kleinere bzw. größere  $E_{v2}$ -Werte wurden im Hinblick auf die Größe der Anforderungswerte von  $E_{v2} = 120, 150$  bzw. 180 MN/m<sup>2</sup> bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Bandbreite der Versuchsergebnisse ließen bei Berücksichtigung der aufgetretenen Streuungen keine Differenzierung der Betrachtung hinsichtlich des Tragschichtmaterials und der Tragschichtdicke zu. Vielmehr zeigte sich, dass nur ein begrenzter Teil der Versuchsergebnisse zur Aufstellung von Anforderungswerten zur Verfügung steht, da für die Unterlage aus "bindigem Sand" viele Einzelergebnisse unter dem Schwellenwert der Betrachtung von  $E_{v2} = 100$  MN/m<sup>2</sup> liegen. Ferner erreichten fast die Hälfte der Einzelversuche auf Tragschichten über der Unterlage aus "Kies" Werte über  $E_{v2} = 200$  MN/m<sup>2</sup>. Unabhängig von der Unterlage zeigten fast alle Einzelversuche aus den Versuchsreihen, die das Tragschichtmaterial TM 4 (RC-Beton) zur Untersuchung hatten,  $E_{v2}$ -Werte von mehr als 200 MN/m<sup>2</sup>.

Zur Schaffung eines Vorschlags für Anforderungswerte wurden lineare Regressionen durchgeführt. Basis der Korrelationen war jeweils die Berücksichtigung des Mittelwerts der Versuchsergebnisse sowie alternativ eines 25 %- und 5 %-Quantils. Schließt man damit aus einem gemessenen  $E_{vd,M}$ -Wert auf einen  $E_{v2}$ -Wert, so befinden sich entsprechend dem der Korrelation zugrunde liegendem Quantil von 25 % oder 5 % jeweils 75 % bzw. 95 % aller in den Versuchen gemessenen Zusammenhänge  $E_{v2} - E_{vd}$  auf der "sicheren Seite". Würde man den Mittelwert bzw. die Gerade der linearen Regression auf die

Korrelation anwenden, so liegen 50 % der in den Versuchen ermittelten Zusammenhänge  $E_{v2} - E_{vd}$  auf der "unsicheren Seite". Mit der Anwendung eines in der weiteren Diskussion festzulegenden Quantils bei der Auswertung der Korrelation können dementsprechend versuchsbedingte Unsicherheiten oder gerätespezifische Messwertschwankungen abgedeckt werden. Zur Berechnung der Korrelationsgeraden unter Berücksichtigung eines 25 %- bzw. 5 %-Quantils wurden die im Wertebereich zwischen  $E_{v2} = 100$  MN/m<sup>2</sup> und 200 MN/m<sup>2</sup> vorliegenden Versuche hinsichtlich ihrer Abweichung von der linearen Regressionsgeraden analysiert. Die Anzahl der Messwerte sowie der ermittelte Regressionskoeffizient sind in Tabelle 3 eingetragen.

Ein relativ hoher Regressionskoeffizient wurde für die Versuche auf den Tragschichten über der Unterlage aus "bindigem Sand" festgestellt ( $R^2 = 0,75$ ). Ein großer Regressionskoeffizient bewirkt, dass der Abstand der  $E_{vd,M}$ -Werte zwischen den in Tabelle 3 dargestellten Spalten klein wird. Einen vergleichsweise großen Abstand dagegen zeigt die Auswertung, welche die Versuche auf der Unterlage aus "Kies" zur Grundlage hatte. Hier liegt der Regressionskoeffizient  $R^2$  bei nur 0,29. Konstruiert man nun jeweils die Schnittpunkte der drei Regressionsgeraden (Mittelwert, 25 %-Quantil und 5 %-Quantil) mit den Anforderungswerten  $E_{v2}$  gemäß ZTV E-StB, so können die in Tabelle 3 eingetragenen Vorschläge zu Anforderungswerten  $E_{vd,M}$  gegeben werden. Entsprechend der Größe des Quantils und der damit verbundenen Sicherheit der Korrelation steigen die vorgeschlagenen  $E_{vd,M}$ -Werte an. Der Anstieg ist umso größer, je kleiner der Regressionskoeffizient  $R^2$  ist, da in diesem Fall die Versuche besonders streuen. Die Werte in Tabelle 3 sind auf ganze Zahlen aufgerundet.

Tabelle 3: Kenndaten der statistischen Analyse und Vorschlag zu Anforderungswerten  $E_{vd,M}$  für verschiedene Quantile

Unterlage	Anzahl der Messwerte [-]	Regressionskoeffizient $R^2$ [-]	Anforderungswert $E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd,M}$ [MN/m <sup>2</sup> ]		
				50 %-Quantil	25 %-Quantil	5 %-Quantil
"bindiger Sand"	52	0,75	120	56	62	68
			150	72	77	84
			180	87	93	99
"Kies"	72	0,29	120	52	59	68
			150	61	68	78
			180	71	78	87
"beide"	124	0,39	120	55	62	71
			150	64	72	81
			180	74	81	91

Es ist anzumerken, dass die derart berechneten Anforderungswerte  $E_{vd,M}$  primär auf den Messdaten aus dem Gerät des Herstellers B beruhen. Messwerte aus dem nach Reparatur zurückgeschickten Fallgewichtsgerät des Herstellers A fließen unter Berücksichtigung des Wertebereiches zwischen

$E_{v2} = 100$  MN/m<sup>2</sup> und 200 MN/m<sup>2</sup> nur sehr untergeordnet in die Analyse ein (Versuche auf RC-Beton). Die wenigen mit in die Auswertung einfließenden Ergebnisse decken sich jedoch weitgehend mit dem Trend der Messwerte des Geräts B.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse eines parallel zu diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Ringversuchs ("Ringversuch zur Kalibrierung des Leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgäräts", TU Freiberg, 2014) und zusätzlichen Erhebungen von Versuchsdaten auf weiteren Tragschichtmaterialien und Untergrundsituationen ist eine Festlegung von Anforderungswerten  $E_{vd,M}$  zu erwarten.

