

## Dynamischer Plattendruckversuch mit einem Mittelschweren Fallgewichtsgerät

FA 5.138

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Bearbeiter: Bräu, G./ Vogt, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Oktober 2007

### 1 Aufgabenstellung

Das Prüfgerät "Leichtes Fallgewichtsgerät" nach TP BF-StB Teil B 8.3 (2003) wird aufgrund des geringen Zeitaufwands der Prüfungsdurchführung überwiegend im Rahmen von Eigenüberwachungen benutzt. Durch die Möglichkeit der raschen Durchführung einer flächenmäßig verteilten großen Anzahl von Untersuchungen ist z. B. ein rechtzeitiges Erkennen von Mängeln in der Herstellung eines Erdbauwerks noch während der Baumaßnahme gut sicherzustellen. Aufgrund seiner kompakten Konstruktionsweise, die die Bedienung durch einen Mann erlaubt, ist es zudem möglich, in beengten Platzverhältnissen wie Gräben und Schächten die Tragfähigkeit des Untergrunds nachzuweisen.

Die durch den eingetragenen Stoß erzeugte maximale Setzung der Lastplatte wird mithilfe eines Beschleunigungsaufnehmers registriert. Die als konstant angenommenen Eigenschaften der stoßartigen Belastung (maximale Stoßkraft und Stoßzeit) werden mittels genau definierter Prüfvorschrift auf speziellen Versuchsständen, die in der TP BF-StB Teil B 8.3 (2003) geregelt sind, kalibriert. Somit wird sichergestellt werden, dass zufällige und hersteller- bzw. herstellungsspezifische Unterschiede in der setzungserzeugenden Beanspruchung vernachlässigbar sind und eine einheitliche Auswertung gewährleistet ist.

Aufgrund seiner wesentlichen Konstruktionsmerkmale (Fallhöhe, Fallmasse und Lastplatte) und den in der technischen Prüfvorschrift vorgegebenen Anforderungen an die messtechnische Erfassung der maximalen Setzung ist das Leichte Fallgewichtsgerät nur in der Lage, dynamische Steifigkeiten  $E_{vd}$  von etwa 15 bis 70 MN/m<sup>2</sup> (entspricht  $E_{v2} \approx 30$  bis 150 MN/m<sup>2</sup>) für baupraktische Belange genügend genau zu messen. Damit kann es in den meisten erdbautechnischen Anwendungsfällen eingesetzt werden. Sind jedoch Tragschichten zu überprüfen, deren Steifigkeit über  $E_{vd} = 70$  MN/m<sup>2</sup> ( $E_{v2} > 150$  MN/m<sup>2</sup>) liegt, so ist die Verwendung des Leichtes Fallgewichtsgeräts nicht zugelassen, da die Setzungsmesseinrichtung die entsprechend geringen Einsenkungen der Lastplatte von weniger als 0,3 mm nicht mehr genügend genau erfassen kann.

Mit dem Mittelschweren Fallgewichtsgerät wird ein Schnellverfahren zur Überprüfung der Tragfähigkeit entwickelt, das auch auf Tragschichten einsetzbar ist, welche hohe Steifigkeiten aufweisen und dadurch mit dem Leichtes Fallgewichtsgerät nicht zu prüfen sind. Ziel der Entwicklung ist es, aufbauend auf den bestehenden Erfahrungen in der Anwendung des Leichtes Fallgewichtsgeräts und unter Verwendung der bewährten Messtechnik ein Prüfinstrument zu entwickeln, welches durch eine vergrößerte Stoßkraft (z. B. Vergrößerung der Fallmasse) oder eine erhöhte Bodenpressung unter der Lastplatte (z. B. Verkleinerung der Lastplatte) größere Setzungen erzeugt. Es soll weiterhin ein für den baupraktischen Betrieb robustes und bedienungsfreundliches Messgerät sein. Vor allem die Bedien- und Handhabbarkeit stehen hierbei im Mittelpunkt. Um eine kostengünstige Gerätelösung zu erhalten, soll es durch Aus-

tausch von Belastungsvorrichtung oder Lastplatte möglich sein, ein Leichtes Fallgewichtsgerät in ein Mittelschweres Fallgewichtsgerät umzuwandeln.

Die Problematik der ungenauen Ermittlung von Setzungen auf steifen Tragschichten mit dem verwendeten Messprinzip des Leichtes Fallgewichtsgeräts ist schon seit längerer Zeit bekannt und daher Gegenstand von mehreren Forschungsarbeiten mit dem Ziel der gerätespezifischen Weiterentwicklung des Leichtes Fallgewichtsgeräts. Aufgrund der bereits durchgeführten gerätetechnischen Veränderungen ist es eine der Hauptaufgaben dieser Forschungsarbeit, die Basis für eine einheitliche Gerätespezifikation zu schaffen. Nur mit einheitlichen Anforderungen an Geräte- und Messtechnik ist es möglich, ein baupraktisch anerkanntes Bewertungssystem im Rahmen der entsprechenden Regelwerke zu etablieren.

### 2 Untersuchungsmethodik und -ergebnisse

#### 2.1 Entwicklung modifizierter Fallgewichtsgeräte

Zusammen mit Herstellerfirmen wurden verschiedene Gerätevarianten entwickelt, welche die geforderte Zielsetzung auf unterschiedliche Art erreichen. So wurden in einer Gerätevariante die Belastungseinrichtungen des Fallgewichtsgeräts mit Fallmasse, Führungsstange und Tellerfederpaket derart geändert, dass unter Beibehaltung eines Lastplattendurchmessers von 300 mm die maximale mittlere Bodenpressung auf 0,15 bzw. 0,20 MN/m<sup>2</sup> gegenüber dem Leichtes Fallgewichtsgerät (0,10 MN/m<sup>2</sup>) erhöht werden konnte.

Mit einer möglichen Verkleinerung des Lastplattendurchmessers kann grundsätzlich auf eine Erhöhung der Fallmasse verzichtet werden. In einer weiteren Variante wurde daher die Belastungseinrichtung des Leichtes Fallgewichtsgeräts in Kombination mit verkleinerten Lastplatten realisiert (Ø 212 und Ø 150 mm). Damit konnten die maximalen Bodenpressungen auf 0,20 und 0,40 MN/m<sup>2</sup> vergrößert werden.

Bei vorstehenden Varianten eines Mittelschweren Fallgewichtsgeräts sind entweder die Lastplatte oder die Belastungseinrichtung gegenüber dem Leichtes Fallgewichtsgerät auszutauschen. Die Charakterisierung wesentlicher gerätetechnischer Spezifikationen der Varianten ist in Tabelle 1 gezeigt.

#### 2.2 Untersuchungen an theoretischen Rechenmodellen

Um allgemeine Aussagen dazu machen zu können, in welcher Weise und Größe die einzelnen Parameter des Fallgewichtsgeräts die Interaktion Boden-Lastplatte und damit das Schwingungsverhalten der Lastplatte beeinflussen, sind theoretische Modelle hilfreich. Darüber hinaus können mit theoretischen Lösungsansätzen die aus experimentellen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse auf ihre Plausibilität geprüft werden. Die vereinfachte Berechnung des Interaktionsproblems Lastplatte-Untergrund wurde mithilfe des gekoppelten Zwei-Massen-Schwingers gelöst. Dabei wird der Boden als elastisches Medium idealisiert und im Rechenmodell als Feder und Dämpfer beschrieben. Aus einer "statischen" Steifigkeit (z. B. "statischer" Verformungsmodul) und unter Annahme eines weiteren elastischen Stoffparameters, z. B. einer Querdehnzahl, lässt sich die Feder- und Dämpferkonstante für die dynamische Berechnung ableiten.

Tabelle 1: Übersicht der entwickelten Modifikationen

	Modifikation Lastplatte		Modifikation Belastungseinheit	
	Subvariante LP B	Subvariante LP C	Subvariante MFG A	Subvariante MFG B
<b>Belastungseinheit</b>	identisch mit LFG	identisch mit LFG	Modifikation Fallmasse Modifikation Tellerfedersteifigkeit	Modifikation Fallmasse Modifikation Tellerfedersteifigkeit
<b>Lastplatte</b>	Ø 212 mm	Ø 150 mm	Ø 300 mm (identisch mit LFG)	Ø 300 mm (identisch mit LFG)
<b>Fallmasse <math>m_1</math></b>	10 kg	10 kg	15 kg	15 kg
<b>Fallhöhe h</b>	aus Kalibrierung festzulegen (ca. 70 cm)	aus Kalibrierung festzulegen (ca. 70 cm)	aus Kalibrierung festzulegen (ca. 70 cm)	aus Kalibrierung festzulegen (ca. 70 cm)
<b>Stoßzeit <math>t_s</math> auf starrer Unterlage</b>	17 ms	17 ms	17 ms	kleiner als 17 ms (ca. 11 .. 13 ms)
<b>maximale Stoßkraft auf starrem Untergrund</b>	7070 N	7070 N	10605 N	14140 N
<b>maximale mittlere Bodenpressung</b>	0,15 MN/m <sup>2</sup>	0,20 MN/m <sup>2</sup>	0,15 MN/m <sup>2</sup>	0,20 MN/m <sup>2</sup>

Die Kopplung der Fallmasse und der Lastplattenmasse findet über das Tellerfederpaket statt. Steifigkeits- und Dämpfungsparameter des idealisierten Federpakets wurden durch Rückrechnungen von messtechnisch begleiteten Stößen auf einer starren Unterlage gewonnen. Die so gefundenen Parameter passen gut zu Erfahrungswerten und Angaben aus der Literatur. Die Bewegung der Fallgewichtsmasse und der Lastplattenmasse wurde mit einem gekoppelten System zweier Differentialgleichungen numerisch gelöst. Mit dem theoretischen Modell konnte somit unter anderem die maximale Setzung der Lastplatte unter gewissen vorgegebenen Parametern wie etwa der Fallmasse, der Fallhöhe oder der Steifigkeit des Tellerfederpakets in Abhängigkeit der Untergrundsteifigkeit berechnet und damit prognostiziert werden.

Mit den theoretischen Modellen wurde weiter gezeigt, dass

- die plastischen Verformungen auch für stark erhöhte Bodenpressungen von 0,40 MN/m<sup>2</sup> und einem halbierten Lastplattendurchmesser begrenzt bleiben und in grober Näherung das Bodenverhalten mit einer elastischen Idealisierung beschrieben werden kann,
- für den baupraktisch relevanten Untersuchungsbereich zur vereinfachten Berechnung des dynamischen Verformungsmoduls die Annahme einer konstanten Bodenpressung unabhängig von der Steifigkeit und Dämpfung des Untergrunds gerechtfertigt ist,

- ohne wesentlichen Einfluss auf die Stoßdauer allein aus einer Vergrößerung der Steifigkeit des Tellerfederpakets die Setzung erhöht werden kann,
- die Vergrößerung der Fallhöhe des Fallgewichts kein sinnvoller Weg ist, die Setzungen zu erhöhen und
- der dynamische Verformungsmodul von den Parametern des Fallgewichtsgeräts wesentlich abhängig ist und damit eine systemabhängige Messgröße darstellt. Eine Umrechnung der mit verschiedenen Fallgewichtsgeschossen bestimmten  $E_{vd}$ -Werte ist dadurch grundsätzlich nicht möglich.

Die aus den theoretischen Berechnungen erhaltenen Ergebnisse sind aufgrund der starken Idealisierung des Untergrunds, der Interaktion des Fallgewichtsgeräts mit dem Untergrund und der geräteeigenen Parameter nur bedingt geeignet, um einzelne Aspekte eines Mittelschweren Fallgewichtsgeschosses zu überprüfen und um Entscheidungskriterien zu schaffen. Mithilfe der theoretischen Modellbildung konnten die genannten geräte-technischen Varianten untereinander verglichen werden, für die prinzipiell eine Eignung zum baupraktischen Einsatz denkbar ist.

### 2.3 Vergleichsversuche der Gerätemodifikationen

Messtechnisch ausführlich begleitete Vergleichsversuche auf verschiedenen steifen Gummiplatten und Tragschichten, auf welchen die entwickelten Gerätevarianten geprüft wurden,

bilden die Grundlage zur Entwicklung der technischen Spezifikation eines Mittelschweren Fallgewichtsgeräts. Hauptziel war es, die Leistungsfähigkeit von vier modifizierten Fallgewichtsgeräten (siehe Tabelle 1) hinsichtlich der gewünschten Anforderungen (Vergrößerung der Setzung, Handhabung usw.) zu prüfen. Dazu wurden eine Vielzahl an Versuchsreihen auf unterschiedlich steifen Gummiplatten und Tragschichtaufbauten durchgeführt. Die messtechnische Erfassung der Bewegung der Lastplatte und der Stoßkraft wurde mit einem speziell für diese Arbeit entwickelten externen Messsystem mit hoher Zuverlässigkeit und Genauigkeit gewährleistet.

In direkten Vergleichsversuchen auf Gummiplatten und Tragschichten wurde untersucht, wie durch die vergrößerte Beanspruchung der Unterlage (Gummiplatten bzw. Boden) die maximalen Setzungen ansteigen. Der Anstieg der gemessenen Setzungen bei den Geräten mit einem reduzierten Lastplattendurchmesser (Modifikation Lastplatte) lag auf Tragschichten für den Plattendurchmesser 212 mm bei 40 % und für die Lastplatte 150 mm sogar bei 210 %. Es war zu beobachten, dass die Reduzierung des Plattendurchmessers auf 150 mm zu einer überproportionalen Vergrößerung der plastischen Verformungen durch den Stoß führt und eine exakte Auflagerung der Lastplatte auf einer grobkörnigen Tragschicht mit Schwierigkeiten verbunden ist. Letzterer Effekt hängt maßgeblich von der lokalen Struktur einer Tragschicht ab.

Verschiedene Überlegungen zur zuverlässigen Ermittlung der Steifigkeit einer Tragschicht in Anbetracht lokaler Inhomogenitäten (Vergleich Größtkorn zum Plattendurchmesser) machten die Durchführung spezieller Versuchsreihen notwendig. In diesen wurde gezeigt, dass die aus den örtlichen Schwankungen der Steifigkeit herrührende Unschärfe des dynamischen Verformungsmoduls im Vergleich zu anderen Einflüssen nicht maßgebend ist.

In weiteren Vergleichsversuchen wurde die Wirksamkeit einer vergrößerten Steifigkeit des Federpakets in Kombination mit einer Erhöhung der Fallmasse auf 15 kg untersucht (Modifikation Belastungseinrichtung). Verwendet wurden Geräte, welche die maximale mittlere Bodenpressung um 50 % auf  $0,15 \text{ MN/m}^2$  (Subvariante MFG A) bzw. um 100 % auf  $0,20 \text{ MN/m}^2$  (Subvariante MFG B) verglichen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät vergrößern. So erhöhten sich die Setzungen auf Tragschichten um etwa 20 bis 40 % für die Subvariante MFG A ( $0,15 \text{ MN/m}^2$ ) bzw. 50 bis 90 % für die Untervariante MFG B ( $0,20 \text{ MN/m}^2$ ). Es wurde dadurch gezeigt, dass die Konfiguration des Tellerfederpakets großen Einfluss auf die erreichbaren maximalen Setzungen haben kann. Allein durch eine Vergrößerung der Steifigkeit des Tellerfederpakets war es möglich, die Setzungen bei sonst unveränderten Parametern deutlich zu erhöhen. Die Untersuchungen ergaben somit analog zu den Ergebnissen der theoretischen Rechnungen, dass sich die durch die Zunahme der Federsteifigkeit verkleinerte Stoßzeit nur untergeordnet auf die maximalen Setzungen auswirkt. Durch ausgeprägte Oberschwingungen entstehen dabei jedoch hohe Setzungsgeschwindigkeiten und der Einfluss der Zähigkeit des Tragschichtmaterials auf die gemessene maximale Setzung vergrößert sich zunehmend.

Die Auswertung aller Versuchsreihen zeigte, dass sich die maximale Setzung der Lastplatte mit allen Gerätevarianten entsprechend der maximalen mittleren Bodenpressung deutlich erhöhen ließ. Somit ist es für die eindeutige Festlegung der Geräteparameter möglich, andere Gesichtspunkte wie z. B. Herstellungskosten oder die baupraktische Handhabung besonders zu berücksichtigen.

### 3 Folgerungen für die Praxis

Aus den gewonnenen Ergebnissen kann ein Mittelschweres Fallgewichtsgerät spezifiziert werden. Die Umsetzung in eine Prüfvorschrift wird in den entsprechenden Gremien erfolgen. Dadurch wird der Baupraxis ein Schnellverfahren zur Überprüfung der Tragfähigkeit zur Verfügung gestellt, das auf Tragschichten einsetzbar ist. Durch die einfache Handhabung, schnelle Versuchsdurchführung und aussagekräftige Bewertungsmöglichkeit durch die gemessene Steifigkeit wird ein wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung im Erdbau und bei der Herstellung von Tragschichten geleistet. Damit verbunden sind sowohl technische als auch wirtschaftliche Vorteile sowohl für ausführende wie prüfende Stellen.