

## s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

FA 5.187

Forschungsstelle: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. R. Cudmani)

Bearbeiter: Bräu, G. / Vogt, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Oktober 2018

### 1 Aufgabenstellung

Dynamische Plattendruckversuche, bei denen eine Fallmasse einen stoßartigen Impuls auf eine Lastplatte überträgt, dienen zur Tragfähigkeitsüberprüfung bei ungebundenen Tragschichten und Böden. Das leichte Fallgewichtsgesetz (LFG), geregelt in den TP BF-StB, Teil B 8.3 (2003), stellt das Ergebnis einer kontinuierlichen gerätetechnischen Entwicklung über mehrere Jahrzehnte dar (Weingart 1978, Kudla und Floss 1990). Es ist im Anwendungsspektrum der Qualitätskontrolle im Straßenbau ein akzeptiertes und aufgrund von diversen Vorteilen gegenüber anderen Prüfmethode ein verbreitetes Prüfinstrument (Kudla et al. 1991, Brandl et al. 2003). Dabei wird die Einsenkung beziehungsweise Setzung  $s$  der Lastplatte unter einer standardisierten Stoßbelastung gemessen. Aus der Einsenkung wird der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  berechnet.

Die ZTV E-StB Abschnitt 4.5.2 formulieren (seit Ausgabe 2009) parallel zu Anforderungswerten des Verformungsmoduls aus dem statischen Plattendruckversuch  $E_{v2}$  für frostsichere Böden des Unterbaus beziehungsweise des Untergrunds auf dem Planum Anforderungen bezogen auf das 10%-Mindestquantil des  $E_{v2}$ -Werts, der mit dem leichten Fallgewichtsgesetz zu messen ist. Damit kann gleichwertig zum statischen Plattendruckversuch die Prüfung mit dem leichten Fallgewichtsgesetz vorgenommen werden. Auch für ungebundene Tragschichten des Oberbaus wird die Möglichkeit des Nachweises der Tragfähigkeit mit dem Fallgewichtsgesetz angestrebt. Aufgrund der höheren Steifigkeiten der im Oberbau herzustellenden Schichten wurde zur genaueren Erfassung des dynamischen Verformungsmoduls ein Mittelschweres Fallgewichtsgesetz (MFG) entwickelt (Bräu und Vogt 2008). Durch weitere Datensammlung soll auch für diesen Gerätetyp die Verankerung einer Anforderung in den Vorschriften vorangetrieben werden.

Zum indirekten Nachweis des Verdichtungsgrads  $D_{Pr}$  im Dammkörper bieten die ZTV E-StB Richtwerte für die Zuordnung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden an.

Die Fallgewichtsgesetze verschiedener Hersteller messen neben den maximalen Setzungen  $s$  und dem daraus errechneten  $E_{vd}$ -Wert auch die maximale Setzungsgeschwindigkeit  $v$ . Als Kenngröße kann der Quotient  $s/v$  möglicherweise bei Böden und Tragschichtmaterialien herangezogen werden, um auf den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  zu schließen. Damit verbunden kann etwa in einem arbeitsintegrierten Prozess eine Entscheidungsgrundlage definiert werden, die eine weitere Verdichtung beziehungsweise Nachverdichtung zur Folge hat. Ferner ist es denk-

bar, dass der  $s/v$ -Wert ähnlich dem beim statischen Plattendruckversuch gemessenen Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  interpretiert werden kann.

### 2 Untersuchungsmethodik

Für die Untersuchungen wurden folgende Fallgewichtsgesetze verwendet, welche von der TU München, Zentrum Geotechnik vorgehalten werden und bei denen die Auswertung des zeitabhängigen Setzungsverlaufs, des  $E_{vd}$ -Werts und des  $s/v$ -Werts möglich ist:

- leichtes Fallgewichtsgesetz, Herstellerfirma HMP (H10)
- leichtes Fallgewichtsgesetz, Herstellerfirma Zorn (Z10)
- Mittelschweres Fallgewichtsgesetz, Herstellerfirma HMP (H15)
- Mittelschweres Fallgewichtsgesetz, Herstellerfirma Zorn (Z15)

Die Geräte entsprechen den aktuellen Vorschriften und wurden während der Durchführung der Forschungsarbeiten fortlaufend hinsichtlich der gültigen Kalibriervorschrift überprüft. Auf dem Kalibrierstand der TU München, Zentrum Geotechnik wurden die Geräte vor jeder Versuchsserie vergleichend untersucht und gegebenenfalls die Belastungseinrichtung beziehungsweise das Setzungsmessgerät neu justiert. Die Ergebnisse der Kalibrierungen an der Kalibrierstelle der TU München, Zentrum Geotechnik wurden mit den Ergebnissen der Kalibrierungen, welche an den Kalibrierstellen der jeweiligen Hersteller durchgeführt wurden, verglichen. Die Einbeziehung der Referenzkalibrierstelle (BAST) war aus technischen Gründen zur Zeit der Durchführung des Forschungsvorhabens nicht möglich.

Zur Überprüfung der mit den Geräten ermittelten Setzungen wurde stichpunktweise ein unabhängig arbeitendes Messsystem auf Basis hochpräziser optischer Laser zur direkten Setzungsmessung im Kalibrierstand und bei den Feldversuchen eingesetzt. Eine Auswertung des Schwingungssignals, das unabhängig von der Signalverarbeitung in der Setzungsmessungseinrichtung ist (zweifache Integration der Messwerte zur Beschleunigung), war bei einem Fallgewichtsgesetz durch den Hersteller ermöglicht worden. Ergänzende theoretische Überlegungen wurden mithilfe von FEM-Berechnungen nach entsprechender Auswertung rechnerischer dynamischer Schwingungsverläufe des Systems Lastplatte – Boden beziehungsweise Tragschicht durchgeführt.

Zur Beschreibung des verdichteten Versuchsbodens beziehungsweise Tragschichtmaterials kamen folgende Prüfmethode zum Einsatz (punktuelle Prüfung):

- Statischer Plattendruckversuch gem. DIN 18134
- Dichtebestimmung durch Isotopsonde (Troxlerr)
- Dichtebestimmung mittels Ersatzverfahren (Ballon) gem. DIN 18125

Die verwendeten Geräte zur Durchführung der Prüfungen entsprechen den aktuellen Vorschriften und wurden soweit erforderlich vor dem Einsatz kalibriert.

Für die notwendigen klassifizierenden Versuche der Böden beziehungsweise Tragschichtmaterialien wurden am Labor der TU München, Zentrum Geotechnik umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Für jeden Versuchsboden beziehungsweise jedes Tragschichtmaterial wurden folgende Versuche durchgeführt:

- a) Siebanalyse nach nassem Abtrennen der Feinbestandteile gem. DIN 18123
- b) Bestimmung der Korndichte im Kapillar- beziehungsweise Gaspyknometer gem. DIN 18124
- c) Bestimmung der Proctordichte und des günstigsten Wassergehalts gem. DIN 18127
- d) Bestimmung der lockersten und dichtesten Lagerung gem. DIN 18126

Durch die Beteiligung der TU München, Zentrum Geotechnik an vielen, insbesondere größeren Erdbau- beziehungsweise Straßenbaumaßnahmen und den intensiven Kontakten zu Lieferwerken von Gesteinskörnungen waren sowohl baustellenintegrierte Feldversuche als auch Versuche in der Versuchsgrube der TU München, Zentrum Geotechnik möglich, für die das der Boden beziehungsweise das Tragschichtmaterial entsprechend angeliefert wurde.

Es wurden insgesamt 15 Materialien gem. TL BuB E-StB beziehungsweise Tragschichtmaterialien gem. TL SoB-StB sowie erdbautechnisch relevante Böden gemäß den Bodengruppen nach DIN 18196 beziehungsweise nach TL BuB E-StB untersucht.

Die Versuche zur Bestimmung der im Feld erreichten Dichte (Volumenersatzverfahren, Versuche mit der Isotopsonde) sowie zur Ermittlung der statischen beziehungsweise dynamischen Verformungsmoduln (statischer Plattendruckversuch und Versuche mit leichtem und Mittelschwerem Fallgewichtsgerät) als indirekte Prüfmerkmale zur Bestimmung des Verdichtungsgrads bei grobkörnigen Materialien im Feld wurden bei verschiedenen Verdichtungsgraden der jeweils eingebauten Tragschichtmaterialien beziehungsweise Böden durchgeführt. In jedem der angelegten Probefelder wurden mehrere Verdichtungsspuren, die sich in ihrem Verdichtungsgrad unterscheiden, hergestellt. Der unterschiedliche Verdichtungsgrad wurde durch eine variierende Anzahl an Überfahrten mit dem jeweils zur Verfügung stehenden Verdichtungsgerät erreicht.

Die Versuche wurden auf einer frisch verdichteten Fläche durchgeführt. Dies bedeutet, dass entweder noch nicht eingebautes Material geprüft wurde, oder dass bereits eingebautes Material zunächst wieder aufgelockert und anschließend neu verdichtet werden musste, bevor die Versuche durchgeführt wurden. Dies ist aus Gründen der Vergleichbarkeit von Ergebnissen der unterschiedlichen Probefelder von Bedeutung, da aus Erfahrungen bekannt ist, dass sich mit zunehmender Liegezeit des eingebauten Materials im Vergleich zu frisch verdichtetem Material höhere Verformungsmoduln ergeben. Spezielle Versuche zum Einfluss der Liegezeit wurden jedoch ergänzend durchgeführt.

Nr.	Bodenart	Bodengruppe	Bezeichnung
1	Kies, schwach sandig	GI	Lieferkörnung 0/32
2	Sand, stark feinkiesig	SI	Lieferkörnung 0/8
3	Kies, sandig, schwach schluffig	GU*	RC-Mix 0/56
4	Kies, sandig	GW	Bauschuttgemisch
5	Fein-Mittelsand, stark kiesig, stark schluffig	SU	Tertiärer Sand aus München
6	Ton, kiesig	GT* bzw. TM	Abdichtungsmaterial Lehm
7	Kies, sandig, schluffig	GU	Terrassenschotter der Würmeiszeit aus München
8	Kies, sandig	GW	Schotter 0/45
9	Kies, sandig	GW	RC-B 0/56
10	Kies, stark sandig, schwach schluffig	GU	RC-M 0/8
11	Kies, stark sandig	GI	RC-M 0/45 1 + 11
12	Kies, stark sandig, schwach schluffig	GU	RC-M 0/56
13	Sand, stark kiesig	SE	EOS 0/4
14	Kies, schwach sandig	GW	EOS 0/32
15	Kies, stark sandig, schwach schluffig	GU	Grubenkies 0/22

Nach Verdichtung wurden auf dem jeweiligen Probefeld zunächst statische Plattendruckversuche nach DIN 18134 sowie dynamische Plattendruckversuche mit dem leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgerät nach TP BF-StB, Teil B 8.3 sowie abschließend Versuche zur Bestimmung des erreichten Verdichtungsgrads nach DIN 18125-2 durchgeführt. Je Verdichtungsspur wurden um einen Prüfpunkt zum statischen Plattendruckversuch herum jeweils vier dynamische Plattendruckversuche durchgeführt. Dabei kamen alle vier der oben genannten Fallgewichtsgeräte zum Einsatz.

Die erreichte Dichte im Nahbereich der statischen Plattendruckversuche wurde mit dem Ballon ("Densitometer") und mit der Isotopsonde ("Troxler") ermittelt. Der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  der vier Verdichtungsspuren, berechnet aus dem Verhältnis der Trockendichte, die durch eine Isotopsonde bestimmt wurde, zur im Labor ermittelten Proctordichte, wird in der Regel für die weitere Auswertung herangezogen.

Ergänzend zu den Versuchen im Feld wurden beispielhaft Vergleichsuntersuchungen in der Versuchsgrube des Zentrums Geotechnik durchgeführt. Mit diesen Versuchsreihen sollte unter anderem die Tiefenwirkung der Fallgewichtsgeräte und die Auswirkung auf den  $E_{vd}$  und den  $s/v$ -Wert untersucht werden. Hierbei wurde eine definierte "Weichschicht" aus einem Geovliesstoff in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Die Verdichtung erfolgte mit einem Plattenrüttler. Die genaue Dokumentation der Versuchsfelder und der Ergebnisse erfolgt im Schlussbericht zum Forschungsvorhaben. Grundlage hierfür war eine Erfassung der Ergebnisse in einer Datenbank, die nach allen relevanten Kriterien (Versuchsgeräte, Versuchsböden, Zustand der Tragschicht mit Werten zum Verdichtungsgrad und Verformungsmodul) filterbar ist. Daraus lassen sich entsprechende Korrelationen erstellen. Die Möglichkeit der Fortschreibung der Datenbank im Anschluss an das FE-Vorhaben ist gegeben.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Aus den FEM-Berechnungen zeigte sich, dass die durch den Stoß erzeugten plastischen Setzungen von der Größe der vorangehenden Verdichtung des Bodens beziehungsweise Tragschichtmaterials abhängen. Je größer die Verdichtung desto geringer wird die plastische beziehungsweise bleibende Setzung der Lastplatte. Dieser Zusammenhang lässt sich äquivalent mit dem Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  beschreiben. Weniger stark ausgeprägt ist die Abhängigkeit des Werts  $s/v$  von der Größe der plastischen Setzungen. Entsprechend deutlich ist der Einfluss anderer, in dieser Forschungsarbeit nicht weiter bestimmbarer Einflussgrößen auf den Wert  $s/v$ . Eine Korrelation zwischen  $s/v$  und dem  $E_{v2}/E_{v1}$  ist prinzipiell erkennbar, jedoch schwanken einzelne berechnete Werte erheblich gegenüber dem Trend, der sich aus der Summe der Berechnungsergebnisse ergibt. Deutlich ausgeprägt ist dagegen die rechnerische Abhängigkeit zwischen dem Verhältniswert  $\Delta s/s_{max}$  (bleibende plastische Setzung im Verhältnis zur maximalen Setzung) und den rechnerischen Werten  $E_{v2}/E_{v1}$  aus dem statischen Plattendruckversuch. Eine zuverlässige und dabei einfache beziehungsweise kostengünstige messtechnische Erfassung des Werts  $\Delta s$  erscheint jedoch zumindest aktuell nicht erreichbar.

Bei den Feldversuchen zeigte sich, dass bei den Geräten LFG (H10 und Z10) und bei MFG Z15 die Ergebnisse der Geräte in einem deutlich größeren Setzungsbereich als in der Prüfvorschrift gefordert baupraktisch verwendbar sind. Bei diesen drei Geräten wurde festgestellt, dass bei steigender Setzung auch die Geschwindigkeit  $v$  ansteigt. Beim Gerät MFG H15 sind die Ergebnisse stets gegenläufig, das heißt, bei größeren Setzungen nimmt die Geschwindigkeit ab. Da eine Erklärung hierfür nicht gefunden werden konnte, wurde dieses Gerät bei den Auswertungen für den Bericht nicht berücksichtigt.

Hinsichtlich der Tragfähigkeit kann von einem neu definierten dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  – wie in den ZTV E-StB auch umgesetzt – im Allgemeinen brauchbar auf den statischen  $E_{v2}$ -Wert mit dem allgemein angewandten Faktor "2" geschlossen werden. Bei Differenzierung der Böden werden deutlich bessere bis sehr gute Bestimmtheitsmaße erhalten. Allerdings zeigen sich deutlich unterschiedliche bodenabhängige Faktoren zwischen  $E_{vd}$  und  $E_{v2}$ .

Auch für den Verhältniswert  $s/v$  wird eine brauchbare Zuordnung zum statischen Verformungsmodul  $E_{v2}$  erhalten, wobei für die Erreichung von  $E_{v2} = 100 \text{ MN/m}^2$  ein wohl in der Praxis schon vielfach angewandter Wert von  $s/v = 4$ , über alle Böden betrachtet, erforderlich erscheint. Auch hier erscheint jedoch eine bodenspezifische Betrachtung sinnvoll.

Hinsichtlich der Ermittlung von Kenngrößen zur Verdichtung ist zum Beispiel eine Zuordnung der dynamischen Kennwerte ( $E_{vd}$ ,  $s/v$ ) zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  sehr eingeschränkt zu verwenden. Im Allgemeinen liegen sehr große Streuungen vor und nur bei einzelnen Böden können baupraktisch sinnvolle Aussagen hinsichtlich möglicher Anforderungswerte getroffen werden.

Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn durch die Anwendung des  $s/v$ -Werts gegenüber dem  $E_{vd}$ -Wert ist aus den erzielten Ergebnissen nicht analysierbar. Dieser wäre gegeben, wenn der  $s/v$ -Wert ähnlich dem  $E_{v2}/E_{v1}$ -Wert beim statischen Plattendruckversuch eine Abschätzung von erreichter und noch möglicher

Verdichtung, das heißt des Verdichtungspotenzials, geben würde.

Für einzelne Böden sind Korrelationen zwischen dem  $E_{v2}/E_{v1}$ - und dem  $s/v$ -Wert darstellbar. Bei den meisten Böden sind keine Zusammenhänge belegbar. Teilweise liegen große Streuungen und nur geringe Neigungen der Regressionsgeraden mit resultierend unsicherer Übertragung vor. Inwieweit dies der aus baupraktischen Erfahrungen oft zweifelhaften Aussagekraft des Verhältniswerts  $E_{v2}/E_{v1}$  oder den Ergebnissen des dynamischen Versuchs geschuldet ist, konnte nicht vertiefend untersucht werden.

Alternativ zum  $s/v$ -Wert wurde das Verhältnis von aufeinanderfolgenden Stößen (beziehungsweise Stoßgruppen: Mittelwert 1. bis 3. Stoß und Mittelwert 4. und 6. Stoß) der Fallgewichtsgeräte in Analogie zur Erst-/Zweitbelastung beim statischen Plattendruckversuch betrachtet. Dieser, zumindest aus theoretischer bodenmechanischer Sicht, gut begründbare Ansatz musste nach der Ergebnisanalyse als nicht zielführend bewertet werden.

### 4 Folgerungen für die Praxis

Die ZTV E-StB, Abschnitt 4.5.2 formulieren alternativ zu Anforderungswerten hinsichtlich des Verformungsmoduls aus dem statischen Plattendruckversuch  $E_{v2}$  für frostsichere Böden des Unterbaus beziehungsweise des Untergrunds auf dem Planum Anforderungen bezogen auf das 10-%-Mindestquantil des  $E_{vd}$ -Werts, der mit dem leichten Fallgewichtsgerät zu messen ist. Aus den vorliegenden Untersuchungen, die im Weiteren ergänzt werden können, kann auch für das Mittelschwere Fallgewichtsgerät eine entsprechende Anforderung erwartet und formuliert werden. Alternativ hierzu könnte überlegt werden, ob durch Verbesserung beziehungsweise Vereinheitlichung der Messtechnik nicht eine Beschränkung auf nur einen Gerätetyp erreicht werden kann, da sich gezeigt hat, dass die Setzungsmessungen verschiedener Geräte bereits jetzt deutlich über den vorgesehenen Bereich hinaus brauchbare Ergebnisse liefern.

Bereits heute erfassen Fallgewichtsgeräte verschiedener Hersteller auch die maximale Setzungsgeschwindigkeit  $v$  der Lastplatte, die während der stoßartigen Beanspruchung auftritt. Als Kenngröße wurde der Quotient  $s/v$  aus maximaler Setzung  $s$  und maximaler Setzungsgeschwindigkeit  $v$  zur Analyse herangezogen. Er ist gedacht, um bei Böden und Tragschichtmaterialien auf den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  zu schließen. Dies konnte in den durchgeführten Feldversuchen nicht bestätigt werden.

Aus den Feldversuchen zeigte sich, dass Korrelationen zwischen den  $s/v$ -Werten und  $E_{vd}$ -Werten oder  $E_{v2}$ -Werten bodenspezifisch gut möglich sind. In der Praxis verwendete "Abnahmwerte" für eine genügende Verdichtungsleistung, die nicht in den ZTV-E niedergeschrieben sind, konnten in etwa bestätigt werden. Es sind hieraus aber keine neuen Erkenntnisse hinsichtlich einer Möglichkeit zur quantitativen Erfassung einer Nachverdichtung oder zur Unterscheidung von Bodenmaterialien zu erkennen. Vielmehr sind der  $E_{vd}$ - und der  $s/v$ -Wert aufgrund der vorliegenden Korrelationen eher als gegenseitige Alternative zu sehen. Ein zusätzliches Abnahmekriterium wäre aus einer erfolgreichen Zuordnung des  $s/v$ -Werts zum  $E_{v2}/E_{v1}$ -Wert möglich, die nach der Auswertung der in diesem Bericht

vorgestellten Feldversuche jedoch nicht beobachtet wurde. Da die bisherige Einbeziehung des Verhältniswerts  $E_{v2}/E_{v1}$  in die Abnahmekriterien der ZTV-E StB aber auch immer wieder Gegenstand von Diskussionen in Fachkreisen und umstritten ist, kann die fehlende Zuordnung durchaus auch an einer bodenmechanisch nicht zielführenden Interpretation des Werts  $E_{v2}/E_{v1}$  hinsichtlich des Verdichtungsgrads  $D_{Pr}$  liegen.

Bei der Bearbeitung der Forschungsarbeit wurden Unterschiede und Probleme bei der Kalibrierung des leichten und Mittelschweren Fallgewichtsgäräts auf verschiedenen Kalibrierstärden festgestellt. Gerätespezifische Unterschiede, welche bei Versuchen an Kalibrierstellen erkannt wurden, bestehen. Jedoch spiegeln sich diese Unterschiede, nach Analyse der vorliegenden Untersuchungen, nicht unmittelbar in den Ergebnissen der Feldversuche wieder. Bei einem Gerät wurden messtechnische Probleme bei der Ermittlung des  $s/v$ -Werts festgestellt, die einer Überprüfung bedürfen.