

Aufstellung von Anforderungswerten für den dynamischen Verformungsmodul

FA 5.114

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfstelle für Grundbau, Boden- und Felsmechanik (Prof. Dr.-Ing. R. Floss)

Bearbeiter: Bräu, G. / Hartmann, K.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Abschluss: November 2001

1. Aufgabenstellung

Gemäß der ZTV E-StB 94 kann der dynamische Plattendruckversuch als indirektes Prüfverfahren zur Kennzeichnung des Verdichtungsgrades D_{Pr} oder des Verformungsmoduls auf dem Planum angewendet werden.

Auf Grund zahlreicher Untersuchungen und Erfahrungswerte bezüglich der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften von Böden wurden für die verschiedenen Anwendungsfälle erdbautechnische Anforderungswerte für den Verdichtungsgrad D_{Pr} sowie für den Verformungsmodul E_v aufgestellt, die in der ZTV E-StB niedergelegt sind.

Für den dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}), der mit dem Leichten Fallgewichtsgeschütz (LFG) nach TP BF-StB Teil B 8.3 Ausgabe 1997 ermittelt wird, fehlen diese allgemein gültigen Anforderungswerte, sodass derzeit noch für jede Baumaßnahme und Bodenart eine Rückbindung an herkömmliche bodenmechanische Anforderungswerte (E_{vd} , D_{Pr} , n_a) durch Kalibrierungen notwendig ist, soweit keine entsprechenden Erfahrungen aus Baumaßnahmen mit vergleichbaren Randbedingungen vorliegen.

Über Vergleichsuntersuchungen wird mittels Regressionsrechnungen der dynamische Verformungsmodul auf die entsprechende Bezugsgröße kalibriert. Hierbei wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}) und dem Verdichtungsgrad (D_{Pr}), dem Luftporenanteil (n_a) bzw. dem statischen Verformungsmodul (E_{v2}) ermittelt. Auf Grund der gefundenen Beziehung kann mit Rückbindung an einen vorgegebenen Anforderungswert, wie beispielsweise den E_{v2} -Wert, ein E_{vd} -Qualitätskriterium festgelegt werden. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich in Abhängigkeit von Bodenart und Einbaubedingungen zum Teil gute Korrelationen zwischen diesen Bodenkenngrößen und dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} ergeben.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, Hilfsmittel für die Festlegung bodenartabhängiger Anforderungswerte für den dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}) zu erstellen. Dadurch soll im Weiteren die Notwendigkeit einer bodenabhängigen Kalibrierung des LFG bei Regelanwendungen minimiert und ein zielgerichteter verbreiteter Einsatz dieses Prüfverfahrens erreicht werden.

Die in dieser Forschungsarbeit aufzuzeigenden Grenzwerte sollen u. a. Gewähr leisten, dass die Anforderung nach der ZTV E-StB 94 bezüglich des Verdichtungsgrades D_{Pr} , des Luftporenanteils n_a und des Verformungsmoduls E_{v2} auf dem Planum erfüllt werden.

Da sich bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens gezeigt hat, dass unterschiedlich kalibrierte LFG im Einsatz sind und infolge gerätetechnischer Unterschiede bei den Dämpfungselementen nicht vergleichbare Ergebnisse bei den verschiedenen LFG erhalten werden, sollten in einem zweiten Teil der Arbeit

unter definierten Randbedingungen die verschiedenen Gerätetypen verglichen werden, um die Auswirkungen der Unterschiede auf die gesuchten Anforderungswerte abschätzen zu können.

2. Untersuchungsmethodik

Als Grundlage für die Ableitung von Anforderungswerten wurde eine sehr umfangreiche und detaillierte Datenbasis erstellt, bei der neben allgemeinen Angaben zur Örtlichkeit, Bodenart und -zustand, Schichtung und Aufbau auch Zuordnungen zwischen den verschiedenen Bodenparametern möglich sind.

Zunächst sollten möglichst viele Daten der verschiedensten Anwendungsbereiche gesammelt werden. Hierzu wurden in einer Rundschreibenaktion mögliche Anwender des LFG insbesondere Baufirmen, Ingenieurbüros, Straßenbauämter und öffentliche Verwaltungen etc. um Unterstützung gebeten. Die Reaktion auf diese Rundschreibenaktion konnte als recht gut bezeichnet werden, wenn auch der Informationsgehalt und somit die Verwertbarkeit stark unterschiedlich war. Als Ergänzung zu den gesammelten Daten wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zusätzlich eine Vielzahl von eigenen Versuchen durchgeführt.

Für die Auswertung der gesammelten Versuchsdaten kamen Methoden der Statistik zur Anwendung. Es wurden Regressions-, Korrelations- und Kovarianzanalysen durchgeführt. Bei der Regressionsanalyse wurde ein linearer Funktionsansatz zur Beschreibung der Beziehung zwischen dem E_{vd} -Wert und dem Vergleichswert gewählt. Die Regressionsrechnung wurde jeweils mit logarithmierten und nicht logarithmierten Daten durchgeführt. Zu den Ergebnissen der Regressions- und Korrelationsanalysen wurden über die Kovarianzanalyse Untersuchungen durchgeführt. Diese sollten feststellen, inwieweit sich die Ergebnisse der einzelnen Auswertungen voneinander unterscheiden.

Bei der Auswertung wurde die Beziehung des dynamischen Verformungsmoduls (E_{vd}) zum statischen Verformungsmodul (E_{v2}) und zum Verdichtungsgrad (D_{Pr}) untersucht. Auswertbare Versuchsergebnisse zum Luftporengehalt (n_a) lagen nicht vor. Unterschieden wurde zwischen den LFG, bei denen als Federelement entweder eine Stahlfeder oder ein Gummipuffer verwendet wurde. Außerdem wurden die Daten entsprechend der bei den Versuchsdurchführungen vorliegenden Böden in Bodenklassen aufgeteilt und getrennt ausgewertet. Weiterhin wurden in einem zusätzlichen Schritt die Messwertbereiche der in die Auswertung mit aufgenommenen Daten beschränkt. Dadurch wurden nur Daten berücksichtigt, die zum Einen für den dynamischen Verformungsmodul innerhalb des zulässigen Messbereiches des LFG lagen und zum Anderen für den statischen Verformungsmodul innerhalb des beim Erdbau geforderten Tragfähigkeitsniveaus zu liegen kamen.

Die Messwertspanne für den dynamischen Verformungsmodul orientiert sich an dem in der TP BF-StB Teil B 8.3 Ausgabe 1997 genannten Anwendungsbereich des dynamischen Plattendruckversuches. Dieser Anwendungsbereich liegt zwischen einem E_{vd} von 15 bis 80 MN/m². Die verwendete Messwertspanne wurde hierzu mit einer Abweichung von 5 MN/m² zwischen 10 und 85 MN/m² festgelegt. Für den statischen Plattendruckversuch wurde aus den beim Erdbau geforderten Tragfähigkeitswerten zwischen 45 und 120 MN/m² die Messspanne mit einer Abweichung von 15 MN/m² zwischen 30 und 135 MN/m² festgelegt.

In einem weiteren Auswertungsschritt für die Beziehung E_{v2} - E_{vd} wurden für die grob und gemischtkörnigen Böden bis zu einem Feinkornanteil von 15 % nur Daten berücksichtigt, bei denen innerhalb einer Tiefe von 0,5 m kein Schichtwechsel im Bodenaufbau vorlag und somit kein Untergrundeinfluss auf die Messwertbildung zu erwarten war. Weiterhin wurde hierbei untersucht, ob sich die Messergebnisse und die daraus erhaltenen Regressionsfunktionen für Kies und Sand sowie für die verschiedenen dynamischen Plattendruckversuche innerhalb der Bodenklassen für grob- und gemischtkörnige Böden unterscheiden.

Ergänzend wurde untersucht, welche Abhängigkeiten zwischen dem dynamischen und dem statischen Verformungsmodul für Tragschichten bestehen. Hierzu ist eine Unterscheidung nach dem verwendeten Tragschichtmaterial, gekennzeichnet durch die Kornform (Rundkorn bzw. Brechkorn), und nach dem verwendeten LFG ("Stahlfedergerät" oder "Gummipuffergerät") gemacht worden.

Auf Grund der festgestellten systematischen Unterschiede zwischen den verschiedenen LFG wurden zusätzliche Vergleichsversuche zwischen den verschiedenen Geräten unter jeweils gleichen Randbedingungen auf künstlichen und natürlichen Untergrundverhältnissen durchgeführt. Hierbei wurde der Einfluss der Dämpfungselemente der LFG, der daraus resultierende Stoßkraftverlauf sowie die Auswirkungen der Auswerteverfahren (Filterung der Messwerte) bei der gerätetechnischen Kalibrierung betrachtet.

3. Untersuchungsergebnisse

Im vorliegenden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben werden Zusammenhänge zwischen dem dynamischen Verformungsmodul (E_{vd}) und bodenmechanischen Vergleichswerten aufgezeigt, aus denen sich letztlich bodenartabhängige Anforderungswerte ableiten lassen. Schwierigkeiten bei der Auswertung entstanden dadurch, dass die Daten zum Teil mit einer sehr unterschiedlichen Qualität an zugehörigen Informationen über den beprüften Boden, das verwendete Prüfgerät usw. vorlagen. Durch diese teilweise fehlenden und nicht zu ermittelnden Informationen konnte eine Auswertung nach speziellen Kriterien nur mit einer gewissen Unsicherheit bezüglich der richtigen Zuordnung der Daten zur entsprechenden Auswerteeinheit durchgeführt werden.

Dies erklärt zumindest teilweise auch die relativ große Schwankungsbreite der Messwerte innerhalb einer Auswerteeinheit. Der 95 %-Vertrauensbereich der Einzelwerte weist bei allen Datengruppen eine enorme Bandbreite auf. Beispielsweise können Einzelwerte des dynamischen Verformungsmoduls bei beiden Gerätetypen für einen E_{v2} -Wert von 45 MN/m² zwischen $E_{vd} = 0\text{--}50$ MN/m² sowie für einen E_{v2} -Wert von 120 MN/m² zwischen $E_{vd} = 40\text{--}90$ MN/m² liegen.

Allgemein kann trotzdem festgestellt werden, dass bei den meisten Auswertungen ausreichende korrelative Zusammenhänge aufgestellt werden konnten. Außerdem zeigte sich, dass für die Beziehung E_{vd} - E_{v2} mit den logarithmierten Daten ein höherer Korrelationskoeffizient ermittelt wurde als mit den nicht logarithmierten Daten. Im Gegensatz hierzu konnte bei der Auswertung der Daten nach dem Verdichtungsgrad D_{Pr} mit den nicht logarithmierten Daten ein besserer korrelativer Zusammenhang festgestellt werden.

Vergleicht man die Ergebnisse der Regressions- und der Korrelationsanalyse, die für die Daten der verschiedenen Böden erhalten wurden, miteinander, wird deutlich, dass die Unterschiede teilweise sehr gering sind. Auf Grund dieser Resultate könnten einige erhaltene Beziehungen als gleich betrachtet und

zusammengefasst werden. Hinweise auf die Zusammenfassbarkeit lieferte hier die Kovarianzanalyse.

Der Vergleich der Regressions E_{vd} - E_{v2} zwischen den LFG mit Stahlfeder und mit Gummipuffer als Federelement zeigte immer einen deutlichen Unterschied in den Regressionsgeraden an. Untermauert wird dieser Sachverhalt wiederum durch die Ergebnisse der hierzu durchgeführten Kovarianzanalyse. Auf Grund dieser Erkenntnis wurden systematische Vergleichsversuche zunächst im Kalibrierstand mit unterschiedlichen Gummipufferplatten zur Erzeugung verschiedener Setzungsbereiche durchgeführt. Es zeigte sich, dass auch bei ordnungsgemäß kalibrierten Geräten nach TP BF zwischen den Geräten mit einem Dämpfungselement aus Stahlfedern und einem mit Gummipuffer Unterschiede von mehr als 20 % bei Auswertung der erzeugten Setzungen bestehen. Die Werte des Gerätes mit Gummipuffer liegen um dieses Maß unter den Werten bei Geräten mit Stahlfedern. Bei diesen Auswertungen wurde ein systematischer Fehler bei der Setzungsmessung im Gerät mit Gummipuffer bereits rechentechnisch eliminiert, der ohne Korrektur, also z. B. beim Einsatz auf Baustellen, zusätzlich zu ca. 10–20 % geringeren Setzungswerten führt. Es werden also insgesamt mit dem Gerät mit Gummipuffer zu geringe Setzungen und somit zu hohe E_{vd} -Werte ermittelt.

4. Folgerungen für die Praxis

Trotz der sehr umfangreichen Datenbank besteht im Rahmen der in dieser Forschungsarbeit durchgeführten Auswertungen ein Bedarf an weiteren Daten, insbesondere gilt dies bei der Beziehung E_{vd} - E_{v2} im Bereich der gemischtkörnigen Böden. Eine bessere Differenzierung zwischen den Kiesen und Sanden innerhalb der grob- und gemischtkörnigen Böden ist anzustreben.

Ebenso besteht Bedarf an zusätzlichen Daten für die Beziehung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} zum Verdichtungsgrad D_{Pr} . Bei den gemischt- bis feinkörnigen Böden konnte auf Grund fehlender oder wegen einer zu geringen Anzahl an Daten keine bzw. keine befriedigende Auswertung durchgeführt werden. Darüber hinaus soll durch eine Erhöhung der Datenbasis im Bereich der grobkörnigen Böden für Kiese und Sande eine detailliertere Betrachtung der Beziehung E_{vd} - D_{Pr} möglich werden. Speziell ist hier der Zusammenhang des E_{vd} -Wertes zum D_{Pr} -Wert für weit-, eng- und intermittierend gestufte Korngrößenbereiche zu betrachten.

Dennoch wird in dieser Arbeit ein Zusammenhang der Beziehung zwischen den bodenmechanischen Kenngrößen (E_{v2} , D_{Pr}) und dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} aufgezeigt, welcher eine Übertragbarkeit der bestehenden Anforderungswerte für bestimmte Randbedingungen nach der ZTV E-StB 94 ermöglicht und die Anwendbarkeit der LFG zur Einschätzung der Tragfähigkeit und zur indirekten Bestimmung der Dichte bestätigt.

Derzeit sind diese Zusammenhänge nur für den jeweils betrachteten Gerätetyp gültig. Auf Grund der festgestellten Diskrepanzen zwischen den Gerätetypen und den daraus resultierenden Problemen bei Baumaßnahmen wurde als Sofortmaßnahme im März 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen ein Rundschreiben versandt, in dem u.a. festgelegt wurde, dass auf einer Baustelle jeweils nur ein Gerätetyp zum Einsatz kommen darf. Da dieser Zustand auf Dauer nicht tragbar ist, soll mit Hilfe der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit und den Auswertungen eines Ringversuches zwischen den Kalibrierstellen für die LFG eine Lösung gefunden werden. Nach Klärung dieser gerätetechnischen Abhängigkeiten sind die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit erneut zu sichten und hinsichtlich der Ableitung von allgemein formulierten Anforderungswerten zu überprüfen. □