

Eignung konventioneller Prüfverfahren für Recycling-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte im Erdbau

FA 5.203

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

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V., Duisburg

Bearbeiter: Heyer, D. / Birle, E. / Demond, D. / Huber, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: April 2022

1 Einleitung

Mineralische Baurestmassen sowie Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen und der thermischen Verwertung von Siedlungsabfällen stellen deutschlandweit einen erheblichen Massenstrom dar. Im Hinblick auf die Themen Ressourcenschonung und nachhaltige Materialverwendung ist es unter sozio-ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten dringend geboten und auch durch den Gesetzgeber vorgegeben (Kreislaufwirtschaftsgesetz von 2012), derartige Stoffe möglichst hochwertig als Baustoffe wiederzuverwenden. Der Erdbau, in dem kontinuierlich vergleichsweise große Mengen an Baustoffen benötigt werden, ist dabei eines der Hauptanwendungsgebiete. Elementare Voraussetzung ist allerdings, dass die mineralischen Sekundärbaustoffe nicht nur aus umwelt-, sondern auch aus bautechnischer Sicht geeignet sind und sie vertragssicher und regelwerkskonform eingesetzt werden können.

Bei mineralischen Sekundärbaustoffen, die bereits seit vielen Jahren erfolgreich im Erdbau Anwendung finden, bestehen im Hinblick auf ihre bautechnische Gleichwertigkeit gegenüber natürlichen Baustoffen noch immer Vorbehalte und in Bezug auf eine vertragssichere Anwendung nach wie vor häufig Schwierigkeiten. Ursächlich hierfür sind vor allem Auffälligkeiten, die bei der erdbautechnischen Prüfung mineralischer Sekundärbaustoffe im Labor und im Feld auftreten. Diese müssen im Hinblick auf eine vertragssichere und anforderungsgerechte Anwendung mineralischer Sekundärbaustoffe dringend geklärt werden.

In diesem Forschungsprojekt wurde untersucht, inwieweit die Probleme bei der Ausführung konventioneller Prüfverfahren tatsächlich spezifisch für mineralische Sekundärbaustoffe sind, oder nicht doch auch bei natürlichen Baustoffen auftreten und auf allgemeinere Ursachen (zum Beispiel granulometrische Beschaffenheit der Einzelkörner) zurückzuführen sind. Es wurde zudem überprüft, ob die bei der Klassifizierung sowie bei der Eignungsprüfung im Labor und der Kontrollprüfung im Feld auftretenden Probleme tatsächlich eine Minderung der

erdbautechnischen Eignung von mineralischen Sekundärbaustoffen bedeuten. Schließlich wurde erörtert, ob im Hinblick auf eine vertragssichere Anwendung von mineralischen Sekundärbaustoffen im Erdbau zusätzliche Regelungen zur Beurteilung der bautechnischen Eignung derartiger Materialien im Labor sowie zur Beurteilung des Verdichtungsgrads im Feld zu schaffen sind. Falls begründet möglich, sollten abschließend Vorschläge für die Weiterentwicklung des erdbautechnischen Regelwerks unterbreitet werden.

2 Untersuchungskonzept

Zunächst wurden im Zuge einer Literaturrecherche die grundlegenden Anforderungen an mineralische Sekundärbaustoffe hinsichtlich ihrer Verwendung im Erdbau sowie die wesentlichen bautechnischen Anforderungen an Erdbauwerke und deren Herkunft erarbeitet. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Literaturrecherche die erdbautechnisch relevanten Eigenschaften mineralischer Sekundärbaustoffe recherchiert. Der Fokus bezüglich der erdbautechnisch relevanten Eigenschaften lag auf dem Verdichtungsverhalten sowie dem Last-Verformungs-Verhalten und der Scherfestigkeit, wobei insbesondere der Einfluss granulometrischer Eigenschaften betrachtet wurde.

Die im Zusammenhang mit der Klassifizierung, der Eignungsprüfung im Labor sowie der Kontrollprüfung im Feld (vor allem Verdichtungskontrolle) bei mineralischen Sekundärbaustoffen bekannten Schwierigkeiten und Problemen wurden neben der Literaturrecherche insbesondere mittels einer Umfrage bei am Bau beteiligten Firmen und Institutionen erörtert. Hierbei wurden sowohl eine Vielzahl persönlicher Gespräche geführt als auch Fragebögen bemüht. Ebenfalls eingeflossen sind Erfahrungen der beiden Forschungsnehmer, die im Rahmen des vorliegenden und aus vorangegangenen Forschungsprojekten gewonnen wurden.

Die Beantwortung der Fragestellungen, inwieweit die Auffälligkeiten, die bei der Prüfung mineralischer Sekundärbaustoffe im Zuge der Klassifizierung, der Eignungs- sowie der Kontrollprüfung auftreten, materialcharakteristisch für mineralische Sekundärbaustoffe sind oder nicht doch auch bei natürlichen Baustoffen mit vergleichbarer Granulometrie auftreten und inwieweit sie eine Minderung der erdbautechnischen Eigenschaften von mineralischen Sekundärbaustoffen darstellen, erfolgte unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus der Literaturstudie sowie der Umfrage bei am Bau Beteiligten auf Basis von umfangreichen Labor- und Felduntersuchungen an fünf natürlichen Baustoffen und neun mineralischen Sekundärbaustoffen.

Zunächst wurden zwei natürliche und zwei rezyklierte Baustoffe im Rahmen einer Untersuchungskampagne sowohl im Labor klassifiziert und hinsichtlich ihres Verdichtungs- sowie Last-Verformungs-Verhaltens unter eindimensionaler Kompression

und Scherbeanspruchung untersucht als auch großtechnisch verdichtet und dort mittels direkten und indirekten Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle untersucht. Weitere Versuche nach großtechnischer Verdichtung wurden im Anschluss an einer Elektroofenschlacke durchgeführt. Schließlich wurden vergleichende Laboruntersuchungen zur Klassifizierung sowie zum Last-Verformungs-Verhalten unter eindimensionaler Kompression und Scherbeanspruchung an je drei Primärbaustoffen, rezyklierten Baustoffen und industriellen Nebenprodukten durchgeführt. Hierfür wurden je drei Versuchsmaterialien aus den für den Erdbau typischen Bodengruppen GW/GI/GE, GU/GU* und SU/SU* ausgewählt. Da geklärt werden sollte, ob die angeführten Schwierigkeiten tatsächlich spezifisch für mineralische Sekundärbaustoffe sind, oder nicht doch auch bei natürlichen Baustoffen mit vergleichbaren granulometrischen Eigenschaften auftreten, sollten die jeweils drei Versuchsmaterialien einer Bodengruppe eine möglichst vergleichbare Granulometrie (zum Beispiel Kornform, Kornabstufung) aufweisen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Literaturstudie, der Umfrage bei am Bau Beteiligten sowie der eigenen Ergebnisse aus den Labor- und Felduntersuchungen wird abschließend beurteilt, ob die Auffälligkeiten bei der Prüfung mineralischer Sekundärbaustoffe charakteristisch für solche Materialien sind oder nicht doch auch bei natürlichen Baustoffen auftreten und ob sie eine Minderung der erdbautechnischen Eignung mineralischer Sekundärbaustoffe darstellen. Zudem werden Vorschläge bezüglich der Weiterentwicklung des erdbautechnischen Regelwerks hinsichtlich der Klassifizierung, der Eignungsprüfung und der Kontrollprüfung von mineralischen Sekundärbaustoffen erbracht. Abschließend wird geprüft, ob für mineralische Sekundärbaustoffe beziehungsweise für spezielle Materialgruppen mineralischer Sekundärbaustoffe fundiert anderslautende Richtwerte für die indirekten Prüfmerkmale (E_{v2} , E_{v2}/E_{v1} , E_{vs}) zur regelwerkskonformen Verdichtungsprüfung im Feld als die bis dato existierenden vorgeschlagen werden können.

3 Beschreibung der Ergebnisse

3.1 Schwierigkeiten und Probleme bei der Prüfung mineralischer Sekundärbaustoffe

Die Ergebnisse der Literaturrecherche, der Umfrage bei am Bau Beteiligten und der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zeigen, dass die Versuchstechnik des Erdbaus für mineralische Sekundärbaustoffe in gleicher Weise geeignet ist wie für natürliche Baustoffe. Dennoch treten sowohl bei natürlichen als auch bei mineralischen Sekundärbaustoffen Schwierigkeiten und Probleme bei der Klassifizierung, der Eignungs- und der Kontrollprüfung auf. Diese sind in der Regel auf die granulometrischen Eigenschaften der Einzelkörner zurückzuführen und treten häufiger bei mineralischen Sekundärbaustoffen auf, die hinsichtlich der Granulometrie ihrer Einzelkörner (zum Beispiel Porosität, Kornfestigkeit) häufig Unterschiede gegenüber natürlichen Baustoffen aufweisen.

Schwierigkeiten bei der Klassifizierung, die auf materialcharakteristische Eigenschaften zurückzuführen sind, treten vor allem bei der Siebanalyse und der Bestimmung der Korndichte auf. Bei der Siebanalyse kann die mechanische Beanspruchung durch den Siebvorgang zum Abrieb weicher Einzelkörner und damit zur Verfälschung der Korngrößenverteilung führen. Bei der Bestimmung der Korndichte führt die etwaige Porosität der Einzelkörner dazu, dass die ermittelte Korndichte vom verwendeten Messfluid und den Versuchsrandbedingungen des jeweiligen Prüfverfahrens abhängt.

Beim Proctorversuch zeigen die Verdichtungskurven vieler mineralischer Sekundärbaustoffe anstatt des von vielen natürlichen Baustoffen bekannten parabolischen Verlaufs häufig einen horizontalen Verlauf, lineare Anstiege oder konkave und konvexe Krümmungen. Dies führt in der Konsequenz dazu, dass bei mineralischen Sekundärbaustoffen häufig nicht ohne Weiteres ein eindeutiges Proctroptimum zur Ermittlung der Proctordichte als Bezugsgröße für die Verdichtung im Feld sowie ein optimaler Wassergehalt abgeleitet werden kann.

Im Zusammenhang mit der Kontrollprüfung kann es bei der direkten Verdichtungskontrolle mit der radiometrischen Sonde vor allem bei mineralischen Sekundärbaustoffen vorkommen, dass die Kalibrierung der Sonde nicht auf die elementare Zusammensetzung der zu prüfenden Baustoffe anwendbar ist. Dies kann zu systematischen Fehlern bei der Dichte- und Wassergehaltsbestimmung führen. Bei der indirekten Verdichtungskontrolle mittels Plattendruckversuchen und Verwendung der Richtwerte der ZTV E-StB 17 kommt es bei grobkörnigen mineralischen Sekundärbaustoffen häufig vor, dass bei ausreichender Verdichtung zwar ausreichend hohe Verformungsmoduln E_{v2} erreicht werden, der Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} allerdings oberhalb des zulässigen Werts liegt. Mit dem dynamischen Plattendruckversuch werden bei mineralischen Sekundärbaustoffen hingegen trotz ausreichender Verdichtung meist dynamische Verformungsmoduln E_{vs} erreicht, die unterhalb der Richtwerte der ZTV E-StB 17 liegen.

Anzumerken ist, dass die beschriebenen Schwierigkeiten und Probleme nicht nur bei mineralischen Sekundärbaustoffen, sondern auch bei natürlichen Baustoffen bekannt sind. Bei mineralischen Sekundärbaustoffen treten sie allerdings häufiger auf.

3.2 Labor- und Feldversuche an natürlichen und mineralischen Sekundärbaustoffen

Klassifizierende Untersuchungen. Die klassifizierenden Untersuchungen haben die im vorangegangenen Abschnitt erwähnten Auffälligkeiten hinsichtlich der Ermittlung der Korndichte bestätigt, wohingegen die im Zusammenhang mit der Siebanalyse genannten Effekte nicht beobachtet wurden. Die klassifizierenden Untersuchungen, die an den beiden beteiligten Prüfinstituten durchgeführt wurden, haben zudem gezeigt, dass zwischen den Ergebnissen unterschiedlicher Prüfinstitute Unterschiede bestehen können.

Es hat sich darüber hinaus bestätigt, dass es sich sowohl bei natürlichen als auch umso mehr bei mineralischen Sekundärbaustoffen um sehr heterogene Materialgruppen handelt, die nicht nur hinsichtlich ihrer Kornabstufung, sondern auch der Eigenschaften ihrer Einzelkörner (zum Beispiel Kornform, Kornfestigkeit) erhebliche Unterschiede aufweisen können.

Verdichtungsverhalten. Die Verdichtungskurven vieler mineralischer Sekundärbaustoffe zeigen zumeist keine eindeutige Abhängigkeit vom Wassergehalt und anstatt des von vielen natürlichen Baustoffen bekannten parabolischen Verlaufs häufig einen horizontalen Verlauf, lineare Anstiege oder konkave und konvexe Krümmungen. Ursächlich hierfür ist vor allem die Porosität der Einzelkörner, die dazu führt, dass verfügbares Porenwasser im Inneren der Einzelkörner gespeichert wird, wodurch es nicht weiter verdichtungsbegünstigend an den Kornoberflächen zur Verfügung steht. Für die Praxis bedeutet dies, dass sich mineralische Sekundärbaustoffe über einen vergleichbaren Wassergehaltsbereich weitgehend gleich gut verdichten lassen und größere Schwankungen des Wassergehalts tolerieren können, ohne dass ihre Verdichtbarkeit nachteilig beeinflusst wird. Allerdings führt das Wasseraufnahmevermögen der Einzelkörner auch dazu, dass – wie aus der Praxis bekannt – meist kein eindeutiges Proctoroptimum und kein optimaler Verdichtungswassergehalt angegeben werden können. Zu berücksichtigen ist, dass auch natürliche Baustoffe mit porösen Einzelkörnern (zum Beispiel Bims) ein vergleichbares Verhalten zeigen. Zudem ist bekannt, dass auch dränierende natürliche Kiese und Sande häufig kein eindeutiges Proctoroptimum ausbilden.

Last-Verformungs-Verhalten bei eindimensionaler Kompression und dreiaxialer Scherbeanspruchung. Die Ergebnisse der durchgeführten Ödometerversuche zeigen, dass das Last-Verformungsverhalten mineralischer Sekundärbaustoffe grundsätzlich demjenigen natürlicher Baustoffe entspricht. Bei Erstbelastung erfahren die Versuchsmaterialien relativ große plastische Verformungen. Bei der Wiederbelastung reagieren sie deutlich steifer als bei der Erstbelastung, wobei zusätzliche plastische Verformungen nur in geringem Maße auftreten. Zwischen unterschiedlichen Materialarten und abhängig von der stofflichen Zusammensetzung konnten dennoch Unterschiede festgestellt werden, die auf die Eigenschaften der Einzelkörner zurückgeführt werden. So zeigen Materialien mit vergleichsweise weichen Einzelkörnern bei ansonsten vergleichbaren Eigenschaften (insbesondere Kornverteilung, Lagerungsdichte) eine größere Kompressibilität als Materialien mit härteren Einzelkörnern. Dies ist eine Folge von Kornbruch der Einzelkörner und von Abplatzungen an Kornkontakten, die durch eine niedrige Kornfestigkeit begünstigt werden. Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass die Unterschiede zwischen natürlichen und mineralischen Sekundärbaustoffen hinsichtlich ihrer Materialsteifigkeit bei vergleichbarer Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte erdbautechnisch von untergeordneter Bedeutung sind. Zu beachten ist, dass hydraulisch aktive Bestandteile bei mineralischen Sekundärbaustoffen in Anwesenheit von Wasser zu

Verfestigungsprozessen führen können, welche zu einer Zunahme der Steifigkeit führen können.

Die an den natürlichen und mineralischen Sekundärbaustoffen als Triaxialversuche durchgeführten Scherversuche zeigen, dass das Scherverhalten von mineralischen Sekundärbaustoffen im Wesentlichen demjenigen natürlicher Baustoffe mit vergleichbarer Kornabstufung entspricht und in erster Linie von Zustandsgrößen wie der Lagerungsdichte oder dem Spannungszustand beeinflusst wird. Die Unterschiede hinsichtlich der Kornfestigkeit scheinen das Scherverhalten und die Scherfestigkeit hingegen nicht maßgeblich zu beeinflussen. Die aus den Triaxialversuchen unter Annahme einer Mohr-Coulombschen Bruchbedingung ermittelten Reibungswinkel φ'_{Peak} zeigen, dass mineralische Sekundärbaustoffe relativ hohe Reibungswinkel aufweisen, die vergleichbar zu denjenigen natürlicher Baustoffe mit vergleichbarer Granulometrie sind.

Versuche nach großtechnischer Verdichtung und zur Verdichtungskontrolle. Die Versuche im großtechnischen Maßstab haben gezeigt, dass mineralische Sekundärbaustoffe großtechnisch entsprechend den Anforderungen des erdbautechnischen Regelwerks an den Verdichtungsgrad verdichtet werden können. In Bezug auf die Steifigkeit als Verformungsmodul E_{v2} zeigen die Ergebnisse der großtechnischen Versuche, dass die mit dem statischen Plattendruckversuch ermittelte Steifigkeit vor allem von der Kornabstufung und dem Verdichtungsgrad abhängt. Wie bereits bei den Kompressionsversuchen zeigt sich aber auch ein gegenüber der Kornabstufung und dem Verdichtungsgrad nachrangiger Einfluss der Kornfestigkeit, wobei wie bereits bei den Ödometerversuchen bei Baustoffen mit vergleichsweise weichen Einzelkörnern etwas geringere Steifigkeiten erreicht werden als bei Baustoffen mit relativ harten Einzelkörnern. Bestehen im erdbautechnischen Regelwerk zusätzlich Anforderungen an die Steifigkeit, können diese – eine anforderungsgerechte Kornverteilungskurve vorausgesetzt – aber sowohl von natürlich als auch mineralischen Sekundärbaustoffen erfüllt werden.

Die Versuche zur direkten Verdichtungskontrolle mit der radio-metrischen Sonde haben gezeigt, dass es bei mineralischen Sekundärbaustoffen vorkommen kann, dass die Kalibrierung der Sonde nicht auf die elementare Zusammensetzung der zu prüfenden Baustoffe anwendbar ist. Dies kann zu systematischen Prüfefehlern führen und sollte im Falle der Anwendung der radio-metrischen Sonde durch Vergleichsversuche mit einem Volumenersatzverfahren im Vorfeld überprüft werden.

Die Versuche zur indirekten Verdichtungskontrolle mittels Plattendruckversuchen haben gezeigt, dass die Verformungsmoduln E_{v2} , E_{v1} und E_{v0} mineralischer Sekundärbaustoffe mit zunehmendem Verdichtungsgrad ansteigen. Damit können Plattendruckversuche grundsätzlich zur Verdichtungskontrolle verwendet werden. Sollen die Plattendruckversuche allerdings ohne vorherige Kalibrierung zum Verdichtungsgrad und unter Verwendung der Tabellenwerte der ZTV E-StB 17 angewendet werden, werden bei grobkörnigen mineralischen Sekundärbaustoffen bei

ausreichender Verdichtung zwar ausreichend hohe Verformungsmoduln E_{v2} erreicht, der resultierende Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} liegt jedoch meist oberhalb des zulässigen Verhältniswerts. Dies trat allerdings auch bei den untersuchten natürlichen Baustoffen auf. Beim dynamischen Plattendruckversuch wurden bei mineralischen Sekundärbaustoffen trotz ausreichender Verdichtung allerdings meist E_{v0} -Werte bestimmt, die unterhalb der Tabellenwerte der ZTV E-StB 17 liegen.

4 Folgerungen und Empfehlungen

Die Ergebnisse des durchgeführten Forschungsprojekts zeigen, dass bei der Klassifizierung, der Eignungs- sowie der Kontrollprüfung von mineralischen Sekundärbaustoffen Schwierigkeiten und Probleme auftreten können. Diese treten allerdings nicht nur materialspezifisch bei mineralischen Sekundärbaustoffen, sondern auch bei natürlichen Primärbaustoffen auf und liegen in den jeweiligen granulometrischen Eigenschaften der betroffenen Baustoffe begründet. Da sich die granulometrischen Eigenschaften mineralischer Sekundärbaustoffe oftmals von denjenigen natürlicher Baustoffe unterscheiden und da die Vorgaben des erdbautechnischen Regelwerks bezüglich der Klassifizierung, Eignungs- und Kontrollprüfung weitgehend auf Erfahrungen an natürlichen Baustoffen beruhen, treten die erwähnten Schwierigkeiten allerdings häufiger bei mineralischen Sekundärbaustoffen als bei natürlichen Baustoffen auf. Unter Berücksichtigung der an natürlichen und mineralischen Sekundärbaustoffen durchgeführten Vergleichsversuche zum Last-Verformungs- und zum Scherverhalten kommen die Verfasser zu dem Urteil, dass die Schwierigkeiten und Probleme bei der Prüfung mineralischer Sekundärbaustoffe keine grundsätzliche Einschränkung ihrer erdbautechnischen Einsetzbarkeit oder Minderung ihrer erdbautechnischen Eigenschaften bedeuten, im Hinblick auf ihren vertragssicheren Einsatz aber gleichwohl berücksichtigt werden müssen.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde es aus Vergleichbarkeitsgründen für sinnvoll erachtet, bei der Siebanalyse, bei der die mechanische Beanspruchung während der Siebung zur Kornverfeinerung führen kann, die Siebparameter Siebzeit, -frequenz und -amplitude zu konkretisieren. Ebenfalls aus Vergleichbarkeitsgründen wurde es bei den Prüfverfahren zur Ermittlung der Korndichte, bei denen das Prüfergebnis bei porösen Einzelkörnern neben der Viskosität des Prüffluids von den Parametern Druck und Prüfzeit abhängt, als sinnvoll erachtet, letztere zu konkretisieren.

Für den Proctorversuch wurden für den Fall, dass kein eindeutiges Proctoroptimum identifiziert werden kann, Alternativen zur Ermittlung der Proctordichte als Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad im Feld sowie zur Angabe eines Einbauwassergehalts für die Verdichtung angegeben. So könnte bei horizontal verlaufenden Verdichtungskurven die Proctordichte als Mittelwert der Ergebnisse von mindestens fünf Proctorversuchen bestimmt und der Mittelwert mit der Standardabweichung beaufschlagt werden. Für den Einbauwassergehalt kann auf Basis der so

ermittelten Versuchsergebnisse ein Wassergehaltsbereich angegeben werden. Bei einer nach unten gekrümmten Verdichtungskurve könnte die Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad aus den beiden Maxima der Endwerte als Mittelwert bestimmt und die zugehörigen Wassergehalte angegeben werden. Bei linearen Anstiegen oder nach oben gekrümmten Verdichtungskurven kann die Trockendichte als Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad sowie der zugehörige optimale Wassergehalt wie bisher aus dem Maximum ermittelt werden.

Im Hinblick auf die indirekte Verdichtungskontrolle mittels Plattendruckversuchs unter Verwendung der Tabellenwerte der ZTV E-StB 17 stellt sich aus der Sicht der Verfasser die Sinnhaftigkeit von allgemeingültigen Richtwerten zur Verdichtungskontrolle mittels Plattendruckversuchen. Die Steifigkeit eines Materials und damit die Verformungsmoduln E_{v2} , E_{v1} und E_{v0} hängen nicht allein von der Trockendichte des Korngerüsts, sondern von weiteren Eigenschaften wie zum Beispiel der Kornform, der Kornsteifigkeit, der Kornfestigkeit oder der Korngrößenverteilung ab. Die Steifigkeit ist damit in hohem Maße materialspezifisch und die Angabe allgemeingültiger Richtwerte zur Verdichtungskontrolle ob der enormen Materialvielfalt im Hinblick auf natürliche Baustoffe und mineralische Sekundärbaustoffe sowie den zwischen den Baustoffen bestehenden Unterschieden nicht möglich. Stattdessen sollte für den Fall, dass die Verdichtungskontrolle mittels Plattendruckversuchen durchgeführt werden soll, eine materialcharakteristische Kalibrierung zwischen dem betreffenden Verformungsmodul und dem Verdichtungsgrad durchgeführt werden.