

# Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

FA 5.158

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

Bearbeiter: Heyer, D. / Birle, E. / Lypp, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Mai 2014

## 1 Aufgabenstellung

Die bodenmechanischen Eigenschaften von feinkörnigen Böden und gemischtkörnigen Böden mit Feinkornanteilen über 15 M.-% werden maßgeblich von der Konsistenz und der Plastizität des Feinkorns bestimmt. Mittel- und langfristig können an Erdbauwerken, die aus diesen Bodenarten errichtet wurden, Schäden entstehen, wenn Wasserzutritte eine Verringerung der Konsistenz der feinkörnigen Anteile bewirken. Um dem entgegenzuwirken und somit eine dauerhafte Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten, müssen eine Verringerung der Scherfestigkeit sowie Sackungen und Setzungen vermieden werden. Dafür wurden in Regelwerken verschiedene Verdichtungsanforderungen festgelegt. Bei der Verwendung oben genannter Böden wird in den ZTV E-StB 09 ein Verdichtungsgrad  $D_{Pr} \geq 97\%$  und ein Luftporenanteil  $n_a \leq 12\%$  Vol.-% gefordert.

Durch eine Verringerung des Luftporenanteils bei der Verdichtung wird der Wasserzutritt in den verdichteten Unterbau erschwert. Möglich ist diese Reduzierung zum einen durch eine Erhöhung der Einbauwassergehalte, zum anderen durch eine stärkere Verdichtung. In beiden Fällen wird auch die Durchlässigkeit des Bodens vermindert. Durch die Weiterentwicklung der Baumaschinen ist es heute möglich, nach Verdichtung deutlich geringere Luftporenanteile als den in den ZTV E-StB 09 geforderten Wert zu erreichen. Hierdurch ist mit einer Minimierung der oben genannten Schäden und folglich mit einer Reduktion der Instandhaltungskosten während der Nutzungsdauer zu rechnen. Aus baupraktischer Sicht werden jedoch von den Baubeteiligten höhere Kosten durch den erhöhten Verdichtungsaufwand befürchtet.

In der vorliegenden Forschungsarbeit soll untersucht und beurteilt werden, welchen Einfluss der Luftporenanteil auf das Verformungsverhalten von verdichteten fein- und gemischtkörnigen Böden besitzt. Aus den daraus resultierenden Erkenntnissen soll weitergehend untersucht werden, inwieweit eine Verschärfung der Anforderungen an den Luftporenanteil eine Verbesserung der dauerhaften Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Erdbauwerken bewirkt. Zudem soll eine etwaige Verbesserung in Relation zu dem höheren Verdichtungsaufwand, der für eine Verminderung des Luftporenanteils benötigt wird, gesetzt werden und geklärt werden, ob die Vorteile aus der Verdichtung diesen höheren Aufwand rechtfertigen und die in den ZTV E-StB 09 bestehenden Anforderungen an die neuen Erkenntnisse angepasst werden sollten.

## 2 Untersuchungsmethodik

Ziel der Untersuchungen war, den Einfluss des Luftporenanteils auf die Verformungseigenschaften feinkörniger Böden und gemischtkörniger Böden mit mehr als 15 M.-% an Feinkorn zu analysieren. Dadurch sollte gezeigt werden, ob und, wenn ja, welche Vorteile sich aus einer Verringerung des Luftporenanteils als Anforderung beim Bau von Erdbauwerken ergeben. Für die Untersuchungen sollten fünf feinkörnige beziehungsweise gemischtkörnige Versuchsböden ausgewählt werden. Dabei handelte es sich um Böden, die nach DIN 18196 den Boden- gruppen UL (leicht plastischer Schluff), TM (mittelplastischer Ton), TA (ausgeprägt plastischer Ton), SU\* (stark schluffiger Sand) und GU\* (stark schluffiger Kies) zugeordnet werden konnten. Die Böden sollten bei den vorgesehenen Laborunter- suchungen fünf unterschiedliche Einbaubedingungen mit Ver- dichtungsgraden zwischen  $D_{Pr} = 95\%$  und  $100\%$  sowie Luft- porenanteilen zwischen  $n_a = 4\%$  Vol.-% und  $12\%$  Vol.-% aufweisen.

In Klassifizierungs- und Proctorversuchen wurden die grund- legenden Eigenschaften der ausgewählten Versuchsböden un- tersucht. Die Bestimmung der Verdichtungseigenschaften war maßgeblich für die Einstellung der gewählten Einbaubeding- ungen während der weitergehenden Laboruntersuchungen. Die Auswahl der Einbaubedingungen für weitergehende boden- mechanische Untersuchungen erfolgte wiederum auf Grundlage der ZTV E-StB 09 und der Änderungen gegenüber ihrer Vor- gängerversion ZTV E-StB 94/97. Sie umfasste neben den ur- sprünglich angedachten fünf Einbaubedingungen ( $D_{Pr} = 100\%$ ,  $n_a = 8\%$  Vol.-% und  $D_{Pr} = 97\%$ ,  $n_a = 4\%$  Vol.-%,  $8\%$  Vol.-% bezie- hungsweise  $12\%$  Vol.-% sowie  $D_{Pr} = 95\%$ ,  $n_a = 8\%$  Vol.-%) zwei weitere Einbaubedingungen ( $D_{Pr} = 100\%$ ,  $n_a = 4\%$  Vol.-% sowie  $D_{Pr} = 95\%$ ,  $n_a = 12\%$  Vol.-%). Die zusätzlichen Einbauzustände entsprachen zum einen einer Vorgabe aus den alten ZTV E-StB 94/97 ( $D_{Pr} = 95\%$ ,  $n_a = 12\%$  Vol.-%), die in der aktuellen Fassung nicht mehr zulässig ist, zum anderen stellten sie eine Bedin- gung dar, die einen Einbauzustand mit erhöhten Anforderungen darstellen sollte ( $D_{Pr} = 100\%$ ,  $n_a = 4\%$  Vol.-%). Die ursprüngli- chen fünf Einbaubedingungen decken die nach ZTV E-StB 09 für die gewählten Bodengruppen zulässigen Einbauzustände gleichmäßig ab und ermöglichen einen Vergleich der Verfor- mungseigenschaften sowohl bei gleichem Verdichtungsgrad und unterschiedlichem Luftporenanteil als auch bei gleichem Luftporenanteil und unterschiedlichem Verdichtungsgrad.

Die Untersuchungen zu den Verformungseigenschaften der Proben erfolgten in einaxialen Kompressionsversuchen nach DIN 18135 (auch Oedometerversuche genannt). Hierbei wurde, soweit möglich, jeder der fünf Böden bei den vorgesehenen Einbaubedingungen untersucht. Die Böden UL, TM, TA und SU\* wurden in Oedometern mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 2 cm getestet. Je Versuchsboden und Einbaubedingung wurden vier Einzelversuche durchgeführt. Am Versuchsboden GU\* mit einem Größtkorn von 32 mm wurden Großoedometerversuche durchgeführt, die einen Durchmesser von 30 cm und eine Probenhöhe von 6 cm aufwiesen. Aufgrund der geringeren Anzahl an zur Verfügung stehenden Großoe- dometergeräten wurden je Einbaubedingung nur drei Einzelver-

suche vorgenommen. In einem Versuchsdurchlauf wurden die Proben ohne Wasserzugabe belastet, bei den restlichen Versuchen erfolgte die Sättigung der Proben bei zwei (GU\*) beziehungsweise drei (UL, TM, TA, SU\*) unterschiedlichen Spannungsniveaus.

Weitergehende Untersuchungen sollten an Versuchsböden durchgeführt werden, die sich in den Oedometerversuchen als besonders wasserempfindlich herausgestellt hatten. Für Triaxialversuche nach DIN 18137-2 wurden hierbei die Böden TM und TA ausgewählt. In den Versuchen wurden zwei unterschiedliche Einbauzustände ( $D_{Pr} = 100\%$ ,  $n_a = 4\text{ Vol.-%}$  sowie  $D_{Pr} = 97\%$ ,  $n_a = 12\text{ Vol.-%}$ ) untersucht. Die Einbaubedingungen wurden so gewählt, dass die nach ZTV E-StB 09 möglichen Einbauzustände mit zwei Proben bestmöglich abgedeckt werden konnten. Die Triaxialversuche sollten dabei Auskunft zum Scherverhalten der Versuchsböden liefern. Die Proben für die Triaxialversuche wiesen eine Höhe von 9 cm und einen Durchmesser von 3,6 cm auf. In einem  $K_0$ -Versuch wurde zudem versucht, das Verhalten eines Bodens unter oedometrischer Belastung in der Triaxialzelle nachzuvollziehen. Der Versuch wurde mit dem Boden TM an einer Probe mit einer Höhe von 6 cm und einem Durchmesser von 10 cm durchgeführt.

Weiterhin wurde die Wasserdurchlässigkeit der Böden UL, TM, TA und SU\* im Labor nach DIN 18130-1 untersucht. Die Ergebnisse sollten Aussagen ermöglichen, inwieweit der Verdichtungsgrad und der Luftporenanteil Einfluss auf die Durchlässigkeit der Proben haben. Die Untersuchungen der Wasserdurchlässigkeit erfolgten in Druckzellen an Proben mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 5 cm.

Im Rahmen eines Feldversuchs sollten Untersuchungen zur Bodensteifigkeit und zur Tragfähigkeit durchgeführt werden. Hierfür konnte ein Versuchsfeld an der Bundesautobahn BAB A 3 südöstlich von Aschaffenburg gefunden werden. Es konnte hierbei an einem gefrästen Tonsteinmaterial untersucht werden, wie sich Verdichtungsgrad, Wassergehalt und Luftporenanteil bei Steigerung der Verdichtungsarbeit entwickeln.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die Literaturrecherche zeigte, dass der Luftporenanteil lediglich in Großbritannien und Deutschland als Verdichtungskriterium herangezogen wird. In den ZTV E-StB 09 wird für den Dammunterbau bei feinkörnigen Böden und gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil  $> 15\text{ M.-%}$  ein Luftporenanteil von  $n_a = 12\text{ Vol.-%}$  vorgegeben, bei wasserempfindlichen Böden von  $8\text{ Vol.-%}$ . Für veränderlich feste Gesteine wurde ein Luftporenanteil von  $6\text{ Vol.-%}$  empfohlen. In Großbritannien wird für feinkörnige Böden teilweise ein Luftporenanteil von  $n_a = 10\text{ Vol.-%}$  gefordert.

In Mokwa & Fridleifsson (2007) werden die Vor- und Nachteile des Luftporenanteils als Verdichtungskriterium dargestellt. Als positiv wird dabei die schnelle Durchführbarkeit von Messungen mit radiometrischen Sonden, die eine Bestimmung des Luftporenanteils ermöglichen, bewertet. Kritisch wird jedoch die Möglichkeit gesehen, durch eine Erhöhung des Wassergehalts den Luftporenanteil zu reduzieren.

Aus den Versuchsergebnissen am Boden UL ergaben sich keine eindeutigen Aussagen über den Einfluss von Trocken-

dichte und Luftporenanteil auf die Steifigkeiten der Proben. Die höchsten Steifigkeiten wurden überwiegend an den Proben UL09407 (094 für  $D_{Pr} = 94\%$ , 07 für  $n_a = 7\text{ Vol.-%}$ ) und UL09708 ermittelt. Die niedrigsten Steifigkeiten wurden hingegen an den Versuchen der Reihen UL09508 und UL09514 gemessen. Die Versuche ohne Aufsättigung erreichten bei einer mittleren Spannung von  $\sigma_M = 300\text{ kN/m}^2$  überwiegend die größten Steifigkeiten, während die Versuche mit früher Sättigung, das heißt einer Sättigung bereits bei geringer Spannung ( $\sigma = 12,5\text{ kN/m}^2$ ), in nahezu allen Einbauzuständen die geringsten Steifigkeiten aufwiesen. Bei der Auswertung der Spannungs-Zusammendrückungskurven wurden die größten bezogenen Zusammendrückungen ( $s' \geq 3\%$ ) bei einem Einbauzustand mit einem geringen Verdichtungsgrad ( $D_{Pr} = 95\%$ ) gemessen. Bei den Ergebnissen der Versuche, die nach ZTV E-StB 09 zulässige Einbaubedingungen aufwiesen, konnten jedoch keine auffälligen Sackungs- oder Hebungerscheinungen und somit deutliche Änderungen hinsichtlich der bezogenen Zusammendrückung festgestellt werden. Deutliche Verformungen zeigte lediglich der Versuch UL09514 während der Sättigung bei einer Spannung von  $\sigma = 200\text{ kN/m}^2$  mit einer Sackung von  $4,5\%$  der Ausgangsprobenhöhe.

Beim Versuchsboden TM wiesen tendenziell die Proben mit niedrigen Luftporenanteilen und hohen Einbautrockendichten höhere Steifigkeiten auf, jedoch wurden hier auch Ausnahmen festgestellt. Bei einer mittleren Spannung von  $\sigma_M = 300\text{ kN/m}^2$  zeigten im Allgemeinen die Versuche ohne Aufsättigung die größten Steifigkeiten und die Proben mit einer Sättigung bei niedrigen ( $\sigma = 12,5\text{ kN/m}^2$ ) und mittleren ( $\sigma = 50\text{ kN/m}^2$ ) Spannungen die geringsten. Die Auswertung der Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramme des Versuchsbodens TM ließ keine eindeutige Aussage über den Einfluss der Einbautrockendichte und des Luftporenanteils zu. Sowohl an Proben mit hohen als auch bei solchen mit niedrigen Luftporenanteilen wurden niedrige und hohe Werte für die bezogene Zusammendrückung ermittelt. Tendenziell konnten jedoch bei den maximalen untersuchten Spannungen an den Proben mit den höchsten Einbautrockendichten die geringsten bezogenen Zusammendrückungen festgestellt werden. Während der Sättigung stellten sich bei der überwiegenden Anzahl an Proben kaum lastunabhängige Verformungen ein. Die Proben TM10004, TM09512 und TM09508 wiesen jedoch insbesondere bei Wasserzugabe im niedrigen und mittleren Spannungsniveau deutliche Quellhebungen auf.

Die Relevanz der Forschungsarbeit wurde an zwei Versuchsreihen des Bodens TM ersichtlich, bei denen im Rahmen der Probekörpererstellung Trocken- und Feuchtdichte verwechselt worden waren. Dadurch ergaben sich Proben mit deutlich zu geringen Verdichtungsgraden ( $D_{Pr} = 83\%$  beziehungsweise  $86\%$ ) und sehr hohen Luftporenanteilen ( $n_a = 18\text{ Vol.-%}$  beziehungsweise  $22\text{ Vol.-%}$ ). Bei Wasserzugabe gerade bei höheren Spannungen zeigten die beiden Proben hohe Sackungen mit bis zu über  $8\%$  der ursprünglichen Probenhöhe.

Bei den Versuchen am Boden TA waren ebenfalls Aussagen hinsichtlich des Einflusses des Luftporenanteils auf die Versuchsergebnisse anhand der Spannungs-Steifemodul-Diagramme nur schwer abzuleiten, da sowohl Proben mit niedrigen als auch mit hohen Luftporenanteilen hohe und niedrige Steifigkeiten aufwiesen. In Bezug auf den Einfluss der Einbau-

trockendichte und des Luftporenanteils ergab die Auswertung der Spannungs-Zusammendrückungs-Diagramme, dass tendenziell die Proben zu deutlichen Volumenzunahmen (Quellhebungen) während des Sättigungsvorgangs neigten, die hohe Einbautrockendichten oder hohe Luftporenanteile aufwiesen. Dies war insbesondere während der Sättigung bei niedrigeren Spannungen der Fall. Bei höheren Spannungen ( $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$ ) zeigten sich deutliche Quellhebungen nur noch an Proben mit Verdichtungsgraden  $D_{Pr} \geq 97 \%$ . Generell konnte beobachtet werden, dass die Hebungen geringer ausfielen je höher die Spannungen während der Sättigung waren. Sackungen wurden am Versuchsboden TA nicht festgestellt.

Die Versuche am Boden SU\* lieferten keine eindeutigen Aussagen über den Einfluss von Trockendichte oder Luftporenanteil anhand der Spannungs-Zusammendrückungskurven. Die festgestellte Streuung der Ergebnisse ließ in dieser Hinsicht keine eindeutige Interpretation der Ergebnisse zu. Bei einer niedrigen Spannung ( $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ ) wurden geringe Hebungen bis maximal ca. 0,2 % der Ausgangsprobenhöhe während der Wasserzugabe festgestellt, bei einer mittleren Spannung ( $\sigma = 50 \text{ kN/m}^2$ ) wurden daneben auch geringe Sackungen gemessen. Deutlichere Sackungen wurden hingegen bei einer Wasserzugabe bei einer Spannung von  $\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$  festgestellt, insbesondere an den Proben mit hohen Luftporenanteilen. Die höchsten Steifigkeiten wurden tendenziell an den Proben gemessen, die hohe Einbautrockendichten und niedrige Luftporenanteile aufwiesen, wobei auch bei diesen Ergebnissen eine gewisse Streuung festgestellt werden konnte. Bei den Ergebnissen der Versuche, die nach ZTV E-StB 09 zulässige Einbaubedingungen aufwiesen, konnten jedoch keine auffälligen Sackungs- oder Hebungerscheinungen und somit deutliche Änderungen hinsichtlich der bezogenen Zusammendrückung festgestellt werden.

Aus den Versuchsergebnissen am Boden GU\* ergab sich für die Steifemoduln eine Streuung, die keine Aussagen zum Einfluss des Luftporenanteils auf das Verformungsverhalten des Bodens erlaubte. Mit Bezug auf die jeweilige Einbaubedingung wurden zumeist die größten Steifigkeiten bei den Proben ohne Sättigung und die geringsten Steifigkeiten bei den Proben mit früher Sättigung ( $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$ ) festgestellt. Die Versuche der Reihen GU10004 und GU09712 zeigten dabei deutlich höhere Steifigkeiten als die der Reihen GU09704 und GU09508. Ähnliches ergab sich aus der Auswertung des Spannungs-Zusammendrückungsverhaltens der Proben. An der Probe GU09712 konnte durch die Wasserzugabe bei einer Spannung von  $\sigma = 12,5 \text{ kN/m}^2$  eine Hebung von ca. 0,2 % der Ausgangsprobenhöhe festgestellt werden. Ansonsten traten keine nennenswerten Hebungen oder Sackungen auf. Jedoch konnte festgestellt werden, dass bei den untersuchten Einbauzuständen, die alle innerhalb des nach ZTV E-StB 09 gültigen Bereichs lagen, keine auffälligen Verformungen festgestellt werden konnten.

Die Ergebnisse der Triaxialversuche am Boden TM ergaben eine Abhängigkeit des Reibungswinkels und der Kohäsion vom Wassergehalt. Der Reibungswinkel nahm mit abnehmendem Wassergehalt zu. Die Kohäsion wies mit höherem Wassergehalt hingegen höhere Werte auf. Die Ergebnisse des Versuchsbodens TA bestätigten diese Ergebnisse nicht. Hier war keine

Systematik hinsichtlich des Einflusses des Wassergehalts auf Reibungswinkel und Kohäsion zu erkennen.

Bei den Wasserdurchlässigkeitsversuchen an den Versuchsböden UL, TM, TA und SU\* wurden die Ergebnisse der Literaturrecherche überwiegend bestätigt. Größtenteils wiesen die Versuche mit hohen Verdichtungsgraden und niedrigen Luftporenanteilen die geringsten Durchlässigkeitsbeiwerte auf, wobei die Streuungen der Werte aufgrund der eher kleinen Unterschiede in den Einbaubedingungen gering ausfielen.

Im Rahmen des Probefelds konnte im Feld die Auswirkung der Verdichtung auf die Entwicklung des Luftporenanteils untersucht werden. Dabei zeigte sich, dass mit den auf der Baustelle zur Verfügung stehenden Walzenzügen eine Verringerung der Luftporenanteile mit zunehmenden Walzenübergängen bis zu einem bestimmten Grad erreicht werden konnte. An einem der zwei Untersuchungspunkte konnte eine annähernd lineare Abnahme der Luftporenanteile mit den Walzenübergängen erreicht werden, am zweiten Untersuchungspunkt stellte sich hingegen nach bereits vier Walzenübergängen eine Verdichtung ein, die mit weiteren Überfahrten kaum mehr gesteigert werden konnte beziehungsweise sogar leicht zurückging. Letzteres konnte in ähnlicher Weise auch bei der Entwicklung der Trockendichte beobachtet werden.

Von der Baustelle, auf der die Feldversuche durchgeführt wurden, standen Ergebnisse der Verdichtungsprüfungen zur Verfügung. Bei der Auswertung zeigte sich, dass die Anforderungen an Verdichtungsgrad ( $D_{Pr} = 97 \%$ ) und Luftporenanteil ( $n_a = 8 \text{ Vol.-%}$ ) mit der vorgesehenen Verdichtungsarbeit (sechs Walzenübergängen) erreicht wurden. Allerdings standen nur wenige Datensätze zur Verfügung.

#### 4 Folgerungen für die Praxis

Die Ergebnisse der Oedometerversuche lassen nur eingeschränkt Aussagen zum Einfluss der Trockendichte und des Luftporenanteils auf deren Verformungsverhalten zu. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Versuchsböden keine signifikanten Sackungen und Setzungen aufgrund von Wasserzutritten erlitten, wenn sie innerhalb der in den ZTV E-StB 09 geforderten Grenzen für die Einbaubedingungen lagen. Versuche mit deutlich geringeren Verdichtungsgraden beziehungsweise höheren Luftporenanteilen zeigten teilweise hingegen deutliche Verformungen. Insbesondere bei Sättigungen unter hohen Spannungen wiesen diese Proben Sackungen von bis zu 8 % der ursprünglichen Probenhöhe auf. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sprechen somit dafür, dass die in den ZTV E-StB enthaltenen Verdichtungsanforderungen unbedingt bei Erdbaumaßnahmen einzuhalten sind.

Eine Einschätzung anhand der Laborergebnisse, inwieweit eine Reduktion des Luftporenanteils Schäden an Erdbauwerken verhindern kann, lässt sich nur bedingt abgeben. Die Streuung der Laborergebnisse ließ zumeist keine eindeutigen Aussagen hinsichtlich des Luftporenanteils und den ermittelten Bodeneigenschaften zu. Teilweise konnte tendenziell die Annahme bestätigt werden, dass niedrigere Luftporenanteile geringere Verformungen nach sich zogen. Eine durchgehende Systematik über alle Laborversuche war jedoch nicht abzuleiten.

Eine Kombination der Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsversuche, Oedometerversuche und Festigkeitsuntersuchungen spricht allerdings für hohe Anforderungen an Verdichtungsgrad und Luftporenanteil. Versuche mit hohen Verdichtungsgraden und niedrigen Luftporenanteilen waren überwiegend am geringsten durchlässig. Gleichzeitig wiesen die Proben, die während der Oedometerversuche erst spät oder nicht gesättigt worden waren, überwiegend die höchsten Steifemoduln auf. Gemäß den Untersuchungen mittels Taschenpenetrometer wurden bei diesen Proben außerdem die höchsten Werte der undrännierten Scherfestigkeit erreicht.

Die Ergebnisse aus den Feldversuchen zeigen Schwierigkeiten auf, die bei der Verdichtung und der Reduzierung des Luftporenanteils auftreten können. Durch eine Erhöhung der Verdichtungsarbeit mittels einer Erhöhung der Walzenübergänge wird ohne zusätzliche Bewässerung nur bis zu einem bestimmten Grad eine nennenswerte Reduzierung des Luftporenanteils erreicht. Höherer Verdichtungsaufwand und somit höhere Kosten führten im untersuchten Fall nicht unbedingt zu besseren Eigenschaften des verdichteten Bodens. Der geforderte Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 97\%$  wurde jedoch immer erreicht. Eine allgemeingültige Kosten-Nutzen-Analyse kann jedoch aus diesem einzigen Versuch nicht abgeleitet werden. Hierfür sind weitere Untersuchungen im Feld mit verschiedenen Bodenarten, Einbaubedingungen und Verdichtungsgeräten notwendig.