

Tragfähige Idee gesucht – numerische Simulationen von Bodenverdichtung als Entwicklungsbaustein innovativer Geräteansätze

H. Pankrath¹, M. Barthel¹, A. Knut¹, M. Bracciale², R. Thiele¹

¹ Institut für Grundbau und Verkehrsbau, Fakultät Bauwesen, HTWK Leipzig, Leipzig, Deutschland

² Fakultät Bauingenieurwesen, Universität von Rom „Tor Vergata“, Rom, Italien

Kurzfassung.

Anhand der vorgestellten Projektarbeiten werden Entwicklungsschritte, Bewertungsansätze und Ergebnisse geeigneter numerischer Modelle zur Nach-Simulation dynamischer Verdichtungs großgeräte in ABAQUS® erläutert. Darüber hinaus wird eine Versuchsanordnung mit Verwendung der PIV-Methode zur berührungslosen Messung hochdynamischer Bodenverformungen sowie Interaktionen zwischen Gerät und Boden vorgestellt. Mit dem weiteren Projektschwerpunkt der Messung an Verdichtungs großgeräten wie der 32 t Polygonwalze BW 332 DI wurden wesentliche Voraussetzungen zur Optimierung und Neuentwicklung innovativer Geräte geschaffen.

Schlagwörter: dynamische Bodenverdichtung, modifiziertes Drucker-Prager Stoffgesetz, PIV-Methode

1 VERANLASSUNG

Eine effektive und zielgerichtete Bodenverdichtung ist für eine Vielzahl von Bauaufgaben notwendig. Die Optimierung und Verbesserung der hierzu notwendigen Großgeräte ist daher weltweit ein sehr wichtiger Forschungs- und Entwicklungsbereich. Durch das Verständnis der Verdichtungsmechanismen können Möglichkeiten zur Verbesserung der Gerätesysteme und Vorteile in der Bauausführung hinsichtlich Energieverbrauch, Wirktiefen, Verdichtungsgleichmäßigkeit und -qualität sowie effizienter Arbeitsweisen abgeleitet werden. Eine Gruppe aus Bauingenieuren und Maschinenbauern der HTWK Leipzig mit zeitweiser Unterstützung durch einen italienischen DAAD-Stipendiaten beschäftigt sich seit September 2012 intensiv mit dieser Thematik im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projekts. Ein Abgleich von Herangehensweisen und Ergebnissen erfolgt zudem auch mit Praxispartnern sowie mit Wissenschaftlern deutscher und österreichischer Universitäten. Zum Erreichen hochwertiger Ergebnisse sind mathematische Modelle zu entwickeln, die mit geeigneten Versuchsständen (klein-/großskalig), sowie zwingend auch mit 1:1 Versuchen an Großgeräten im Detail geprüft und im Sinne eines interaktiven Vorgehens immer wieder verbessert werden (3 Projektschwerpunkte).

2 STAND DER TECHNIK UND MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Effizienz in der Bodenverdichtung

Weltweit wurde in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von Bodenverdichtungsverfahren entwickelt, die sich u.a. hinsichtlich Art der Anregung (periodisch kraft- bzw. weggesteuert oder transient), dem Ort des Energieeintrages (Oberfläche oder in der Tiefe) sowie erzielbarer Tiefenwirkung unterscheiden. Insbesondere durch die Entwicklung der dynamischen Anregung für Walzenzüge und vergleichbarer Systeme mit z.T. selbstregelnder Anregung (z.B. VARIOCONTROL, VARIOMATEC, ACE) konnten in den letzten beiden Jahrzehnten eine Vielzahl von Anwendungsfeldern für eine hochwertige Baugrundverdichtung erschlossen werden. Wirktiefen sind dabei weiterhin oft stark begrenzt (< 1 m).

Neben der Impulsverdichtung konnten sich für mittlere Bodentiefen vor allem Walzen mit Polygonbandage als neue Verfahren aufgrund vorteilhafter Eigenschaften im Hinblick auf Anwendungsvielfalt, Verdichtungsqualität sowie Tiefenwirkung etablieren.

2.2 Dynamische Bodenverdichtung - Berechnungsansätze zur Wirktiefermittlung

Grundlegende mathematische Gesetzmäßigkeiten wurden zunächst für die Methode der Dynamischen Intensivverdichtung aufbereitet. Gegenüber einer rein statischen Auflast wird bei dynamischen Verdichtungsmethoden ein Vielfaches der Verdichtungsleistung generiert. Bei dieser in den 60er Jahren entwickelten Verdichtungsmethode mit Nutzung eines Kranes zum Anheben und Lösen eines Fallgewichtes können oft Wirktiefen von mehr als 10 m erreicht werden (Adam 2013). Die Einflusstiefe lässt sich näherungsweise aus der Masse des Fallgewichtes (m_G), der Fallhöhe (h_0) sowie den Parametern zur Fallbewegung (c) und zum Boden (δ) ermitteln (d_{max} in Metern nach Varaskin 1981):

$$d_{max} = c \delta \sqrt{m_G h_0} \quad (1)$$

In umfänglicheren Berechnungsansätzen, wie z.B. nach Poran (1992), werden auch Anzahl der Impulse und Abmessungen des Fallgewichtes berücksichtigt. Dynamische Effekte wie die Wellenausbreitung der Baugrundverbesserung werden z.B. in Berechnungsmethoden nach Chow (2000) beschrieben. Vergleichsberechnungen mit Variation wesentlicher Eingangsparameter zeigten bei diesen Ansätzen z.T. erhebliche Ergebnisstreuungen. Hochwertigere Aussagen, bspw. zur Auswirkung unterschiedlicher Gerätegeometrie auf die Verdichtungsleistung, sind mit diesen Ansätzen kaum möglich.

2.3 Numerische Verfahren in der Geotechnik

In der Geotechnikpraxis werden numerische Verfahren wie die Finite Elemente Methode (FEM) vor allem zur Berechnung von Verformungen des Bodens und geotechnischer Elemente eingesetzt. Gegenüber anderen Fachdisziplinen, wie z.B. dem Konstruktiven Ingenieurbau mit Stahl, gelten bei Berechnungsansätzen zum Bodenverhalten einige Besonderheiten, besonders hinsichtlich Festigkeits- und Steifigkeitsverhalten, die in Abhängigkeit der zu bewertenden Fragestellungen bekannt sein und hinreichend genau berücksichtigt werden müssen. Hierfür wurde eine Reihe von Stoffgesetzen entwickelt, die Teile dieser Besonderheiten näherungsweise beschreiben können. Für eine Simulation typischer Bodenverdichtungsgeräte ist neben einem geeigneten Stoffgesetz eine gute Beschreibung der Interaktion zwischen Gerät und Boden erforderlich. Für die „klassische“ Form der Finiten Elemente Methode mit Verwendung von mit Lagrange-Elementen vernetzten Körpern begrenzen oft große Relativverformungen die Einsatzmöglichkeiten numerischer Berechnungen. In einigen Programmcodes wie ABAQUS® können diese Grenzen durch Modellansätze wie dem Coupled Eulerian-Lagrangian Ansatz (CEL) oder dem Arbitrary Lagrangian-Eulerian Ansatz (ALE) auch für relativ große Bodenverformungen erweitert werden (Henke 2012).

3 ENTWICKLUNG NUMERISCHER GRUNDMODELLE

3.1 Konzept und Vorgehensweise

Bei der numerischen Modellbildung wurde eine hinreichend genaue Abbildung der Realität angestrebt. Auf Basis konzeptioneller Modelle waren wesentliche Bewegungsformen, Stoffeigenschaften und Geometrien in geeigneter Näherung mathematisch und dann im Computermodell zu beschreiben. Verlässliche Berechnungsergebnisse sind nur bei hoher Qualität und Umfang notwendiger Verifikationen und Validierungen von Annahmen und Ergebnissen zu erwarten. Verifikationen dienen dabei als Überprüfung, ob das Computermodell die mathematischen und physikalischen Annahmen korrekt berücksichtigt. Über Validierungen wurde in erster Qualität bereits geprüft, ob das konzeptionelle

Modell die Realität hinreichend genau erfasst. Modellgrenzen konnten so erkannt und behoben bzw. bei der Ergebnisbewertung und den weiteren Projektschritten berücksichtigt werden.

3.2 Stoffgesetz, Bodenparameter und Modellaufbau

Für die eigenen Simulationen kam bisher vor allem das elastoplastische Stoffgesetz nach Drucker-Prager mit Modifizierung durch eine hydrostatische Kappe zum Einsatz. Durch spannungsabhängige Versagensflächen werden plastische Verformungen des Bodens aus Scherversagen entlang einer vom hydrostatischen Druck abhängigen linearen Versagensfläche oder aus Versagen im Bereich einer hydrostatischen Kappe geeignet ermittelt. Problematisch ist auch bei diesem Stoffgesetz die Formulierung des Plastischen Potentials. Kontraktantes Bodenverhalten wird aus Versagen im Bereich der hydrostatischen Kappe errechnet, während Scherversagen immer als dilatantes Verhalten ausgegeben wird (Adam 2013). Bei Simulation einer Bodenverdichtung von der Oberfläche kann dies oberflächennah und besonders bei Böden mit geringer Kohäsion zu unrealistisch großen Bodenauflockerungen führen, während die Ergebnisse in der Tiefe kaum beeinflusst werden. Unter Berücksichtigung von Randbedingungen und Lastverhältnissen wurden bei der Modellentwicklung umfangreiche Vor- und Sensitivitätsstudien durchgeführt. Der Fokus lag neben der Bewertung der Relevanz auf die Berechnungsergebnisse auch auf der Optimierung von Rechenzeiten der Modelle.

Tabelle 1. Wesentliche Stoffparameter der Modellböden für die erste Simulationsphase

Formel	E (isotrop)	ν	ρ_{d0}	ρ_{Pr}	φ	c'	e_0	I_D
Einheit	N/m ²	-	kg/m ³	kg/m ³	°	N/m ²	-	-
Kies, sandig	40.000.000	0,25	2.038	2.120	32	200	0,3	0,7
Schluff, sandig	5.000.000	0,35	1.472	1.790	25	24.000	0,8	0,2

Tabelle 2. Tabelle mit Kenndaten zu Modellen mit transientem Energieeintrag (Auswahl)

Parameter/Teilthema	gewählte Kennwerte und Lösungsansätze
Randbedingungen	2D Modell axialsymmetrisch (XSYMM) bzw. ebener Dehnungszustand, 3D Modell
Elementdefinitionen	Finite Elemente bilinear od. biquadratisch (CAX4R, CAX8R, C3D8) Infinite Elemente bilinear oder quadratisch (CINAX4, CINAX5R, C3D8I)
Materialdefinition	Grundparameter E , ν und ρ sowie Stoffgesetzparameter (Drucker-Prager, modifiziert)
Elementanzahl	2.000 / 5.000 / 10.000 / 20.000 / 40.000
ABAQUS Standard	Voruntersuchungen zur Netzfeinheit an Vertikalspannungen aus geostatischem Druck
ABAQUS Standard und Explicit	Einflussuntersuchungen u.a. mit dynamischen Kurzzeitbelastungen zur Elementwahl sowie zum Dämpfungsverhalten (numerische Dämpfung und Materialdämpfung) Konvergenz-, Sensitivitäts- und Parameterstudien mit Simulation der Verdichter

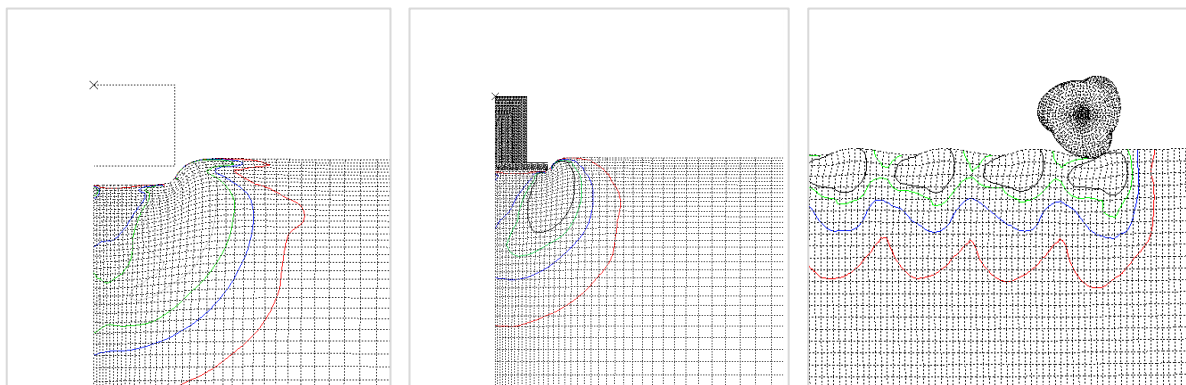


Abbildung 1. Nach-Simulation DYNIV, Impulsverdichter sowie Impact Roller (exemplarisch, PEQC2)

3.3 Bewegungsverhalten der Großgeräte

Ein Untersuchungsschwerpunkt behandelte bisher die Nach-Simulation impulsartiger Bodenverdichter. Maßgebend für die erzeugte Verdichtungsenergie sind vor allem die Masse des Fallgewichtes (m_G) und die Fallhöhe (h_0). Alternativ zur Simulation des gesamten Fallweges wurde die Aufprallgeschwindigkeit dem Fallkörper nah am Kontaktbereich als Initialbedingung aufgeprägt:

$$v_e = \sqrt{2gh_0} \quad (2)$$

Der Impact Roller und vergleichbare Systeme arbeiten ebenfalls ohne dynamische Anregung und mit Geschwindigkeiten bei der Verdichtungsfahrt von 10 km/h und mehr. In Abhängigkeit von der Form der Trommeleinheit, Geschwindigkeit bei der Überfahrt und Bodenverhalten kann jedoch lokal ein hoher impulsartiger Energieeintrag erfolgen (Sprungenergie). Eine Vergleichmäßigung der Baugrundverdichtung erfolgt v.a. durch die hohe Anzahl von Überfahrten. Für die Simulation des Gerätes wurde eine Geschwindigkeitsfunktion angesetzt, die analog auch bei Walzenzügen z.B. als Feder – Dämpfersystem harmonisiert werden kann (Pistol 2013). Wesentlich ist eine geeignete Kontaktbeschreibung zwischen Gerät und Boden um auch Bewegungszustände der Bandage wie Gleiten und Kontaktverlust bzw. Springen zu beschreiben. Zur Abbildung dynamisch angeregter Systeme war zunächst die Art der dynamischen Anregung mathematisch zu erfassen. Betrachtet wurden wegerregte Geräte wie bei einem Stampfer oder Anbauverdichter sowie krafterregte Systeme als Kreis- oder Richtschwinger. Die Art und Größe der Anregung können im numerischen Modell im Wesentlichen durch vereinfachte Fourier-Reihen beschrieben werden. Auf Basis von (3) ergeben sich die in Tabelle 3 zusammengefassten kinematischen Randbedingungen zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens dynamischer Bodenverdichtungsgeräte:

$$a = A_0 + \sum_{n=1}^N \{A_n \cos(n\Omega(t - t_0)) + B_n \sin(n\Omega(t - t_0))\} \quad (3)$$

Tabelle 3. Wesentliche Formen der dynamischen Anregung (hier auszugsweise für vertikale Komponente)

Modellvorschlag	Komponente	A_0	A_1	A_2	B_1	B_2	n. Gleichung
Wegerregung	Beschleunigung	0	0	$\Omega^2 r \lambda$	$-\Omega^2 r \lambda$	0	$\ddot{s}_k = \Omega^2 r (\lambda \cos 2\Phi - \sin \Phi)$
Kreisschwinger	Axialkraft	0	F_Z	0	0	0	$F_Z^{(x)} = F_Z \cos(\Omega t)$
Kreisschwinger	Vertikalkraft	0	0	F_Z	0	0	$F_Z^{(y)} = F_Z \sin(\Omega t)$
Richtschwinger	Betragsfunktion	0	$2m_u r \Omega^2$	0	0	0	$ F_R = 2m_u r \Omega^2 \cos(\Phi + \alpha/2)$

3.4 Ermittlungen zur Tiefenwirkung

Bei den Untersuchungen der Wirkweisen unterschiedlicher Bodenverdichter lag ein Hauptinteresse auf der Tiefenwirkung der Verfahren. Grundsätzlich können im Rahmen der numerischen Berechnungen eine Vielzahl von Ausgabegrößen aufgezeichnet und ausgegeben werden. Aussagen zur Tiefenwirkung lassen sich vor allem anhand der plastischen Verformungen und Spannungsänderungen im Boden ableiten. Im Hinblick auf eine direkte Bewertung der Ergebnisse wurden Möglichkeiten zur Umrechnung der Simulationsergebnisse auf praxisrelevante Parameter u.a. gemäß Beziehungen zwischen Porenzahl sowie Porenanteil geprüft (Gudehus 1986). Unter Annahme des theoretischen Ansatzes der ödometrischen Kompression kann gemäß (4) und (5) aus einer Anfangsporenzahl e_0 die Porenzahländerung während bzw. nach der Verdichtung über die Änderung der Dehnungsrate ε_i ermittelt und ausgewertet werden. Eine vergleichbare Beziehung wurde zudem auch für die Ermittlung der Dichteänderung, vom Verdichtungsgrad D_1 , der bezogenen Lagerungsdichte $I_{D,i}$ sowie vom Grad der Verbesserung $I_{r,i}$ abgeleitet. Maßgebend für die Errechnung und Ausgabe an jedem Elementknoten sind die verdichtungswirksamen Dehnungsanteile bzw. plastischen Verformungen (z.B. aus dem Stoffgesetzparameter PEQC2).

$$\rho_{d,i} = \rho_S / (1 + e_i) \quad (4)$$

$$e_i = e_0 - \varepsilon_i (1 + e_0) \quad (5)$$

4 MESSTECHNISCHE VALIDIERUNG

4.1 Versuche mit der PIV-Methode an klein- und großskaligen Modellen

Der 2. Projektschwerpunkt liegt in der Entwicklung und Bewertung geeigneter Modellversuche zur Validierung der numerischen Arbeiten, aber auch zur Abbildung von Teilaspekten und Besonderheiten, die mit numerischen Methoden nicht oder nur ungenügend beschrieben werden können. Das Bewegungsverhalten der Geräte kann gut über Beschleunigungssensoren erfasst werden. Eine messtechnische Erfassung des dynamischen Bodenverhaltens ist ebenfalls über im Boden eingebaute Beschleunigungssensoren und ähnliche Messsysteme mit hoher zeitlicher Auflösung bedingt möglich. Im Rahmen des Projektes wurden Versuchsstände mit Nutzung der PIV Methode (Particle Image Velocimetry) entwickelt. Dieses berührungslose Messverfahren wurde vor allem in der Strömungsmechanik eingesetzt und ist in der Lage durch einen paarweisen Vergleich von diskreten Bildbereichen das Verschiebungs- und Geschwindigkeitsfeld des gesamten strömenden Fluides zu beschreiben. Diese Möglichkeit kann auch zur Beurteilung des Verschiebungsfeldes im Boden (White, D. J. 2003) und für Rückschlüsse auf die Veränderung der relativen Dichte eingesetzt werden (Hajjalilue-Bonab 2009). Neben einer Erfassung und Auswertung des Verschiebungsfeldes vor und nach einer Verdichtung soll in den eigenen Versuchsständen das dynamische Bodenverhalten erfasst werden. Durch den Einsatz einer Highspeedkamera (1000 Hz bei Auflösung 1280x1024) ist es möglich, das Geräteverhalten, die Interaktion Boden/Gerät sowie das dynamische Verformungsverhalten mit Hilfe der PIV-Methode auszuwerten. Aufgrund großer Vorteile des Verfahrens hinsichtlich störungsfreier und hochauflösender Messungen wurde im Frühjahr 2014 ein kleinskaliger Versuchsstand für stehende und fahrende Kleinmodelle sowie ein Großversuchsstand zur Bewertung bspw. handgeführter Verdichtungsgeräte am digitalen Modell geplant, konstruiert und auf dem Gelände der HTWK Leipzig in Betrieb genommen.

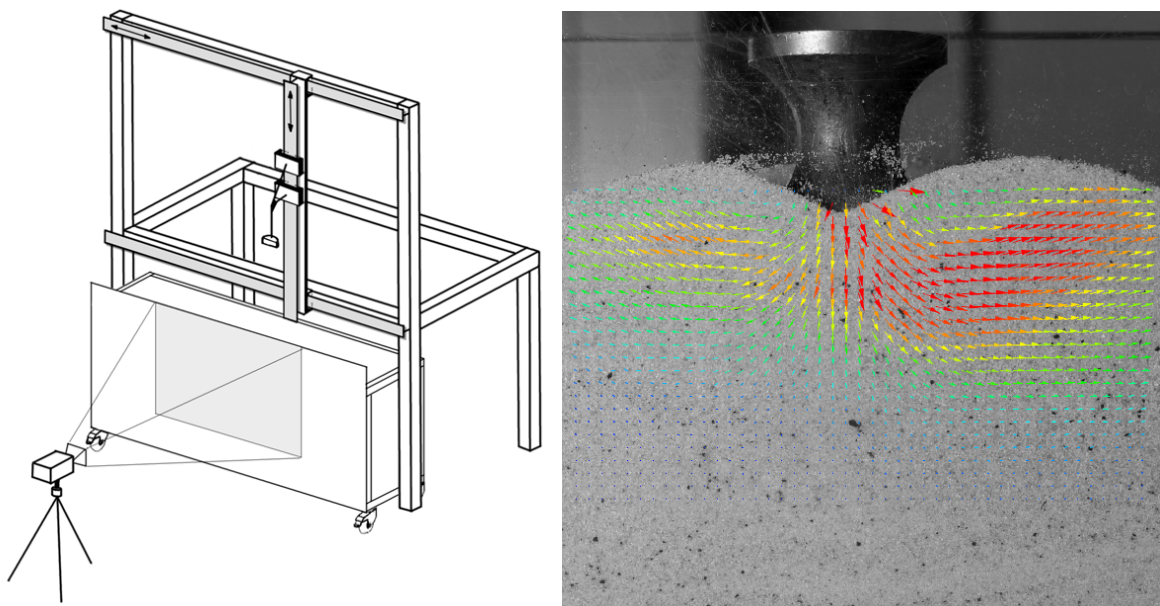


Abbildung 2. Kleinskaliger Versuchsstand als digitales Modell (links), Anwendung der PIV-Methode (rechts)

4.2 Statische und dynamische Messungen an Großgeräten

Zur Bewertung der gewählten Modellansätze und Ergebnisse sind Messungen an Großgeräten zwingend erforderlich. Im Rahmen des 3. Projektschwerpunktes werden daher seit dem Frühjahr 2014 umfangreiche Messungen an einer 32 t Polygonwalze BW 332 DI auf Probefeldern nahe Leipzig geplant und vorbereitet. Der Schwerpunkt dieser Feldversuche liegt in einer umfassenden Dokumentation der Bodenverdichtungsarbeit, aber auch des Bewegungsverhaltens der Walze. Neben vor- und nachbereitenden Sondierungen werden schichtenweise Aufgrabungen für weitere Feldversuche und mit Entnahme von Bodenproben für ergänzende Laborversuche erfolgen (nach Thiele 2011). Darüber hinaus wird das Bewegungsverhalten der Walze mit Beschleunigungsmessungen an der Bandage erfasst.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der bisherigen Arbeit in dem vom BMBF finanzierten Projekt ECompact ist es gelungen, numerische Modelle in ABAQUS® zur Nach-Simulation unterschiedlicher Verdichtungsgeräte zu entwickeln und an verfügbaren Messdaten erfolgreich zu prüfen. Hierbei wurde belegt, dass das Verformungsverhalten von Boden sowie auch Wirkprinzipien von Bodenverdichtungsgeräten numerisch geeignet beschrieben und somit besser verstanden werden können. Darüber hinaus wurden klein- und großskalige Versuchsstände für hochdynamische Messungen mit der PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) entwickelt. Erste Ergebnisse belegen die Möglichkeiten, Verschiebungsfelder im Boden sowie auch die Interaktion zwischen Fallkörper bzw. Verdichtungsgerät und Boden präzise zu erfassen und beschreiben zu können. Zudem konnten Versuche an der Großwalze BW 332 DI geplant und für umfangreiche statische und dynamische Messanordnungen an Gerät und im Boden vorbereitet werden. Somit wurden drei wesentliche Voraussetzungen geschaffen, um Ansätze zur Optimierung, Weiter- und Neuentwicklung von innovativen Verdichtungsgeräten zu prüfen und zu verknüpfen.

LITERATUR

- Adam, D. (2013). Aktuelle Entwicklungen im Erd- und Grundbau für Straßen und Eisenbahnen. In: Bauakademie Sachsen (hrsg.): *9. Erdbaufachtagung, Aktuelle Entwicklungen in der Geotechnik*; 31.01.-01.02.2013, Leipzig, Deutschland, 64 Seiten.
- Chow, Y. K.; Yong, D. M.; Yong, K. Y.; Lee, S. L. (2000). Improvement of granular soils by high-energy impact. *Ground Improvement*, 4, S. 31–35.
- Hajjalilue-Bonab, M.; Rezaei, A.H (2009). Physical Modelling of Low-Energy Dynamic Compaction. *IJPMG-International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 3, S. 21–32.
- Henke, S.; Hamann, T.; Grabe, J. (2012). Numerische Untersuchungen zur Bodenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren. In: Adam und Herrmann (hrsg.): *Baugrundverbesserung in der Geotechnik*; 13.09.-14.09.2012, Wien, Österreich, 18 Seiten.
- Gudehus, G. (1981). *Bodenmechanik*. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart.
- Poran C. J.; Rodriguez J. A. (1992). Design of dynamic compaction. CISMFE. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, S. 796–802.
- Pistol, J.; Adam, D.; Falkner, F.-J.; Adam, C. (2012). Numerische Simulation zur Wirkungsweise verschiedener Bandagetypen bei der Verdichtung mit Walzen im Erdbau. In: Adam, Herrmann (hrsg.): *Baugrundverbesserung in der Geotechnik*; 13.09.-14.09.2012, Wien, Österreich, 17 Seiten.
- Thiele, R.; Kloubert, H.-J. (2011). Dynamische Bodenverdichtung durch Einsatz schwerer Polygonwalzen, In: Adam, Herrmann (hrsg.): *Baugrundverbesserung in der Geotechnik*, 14.- 15.09.2010, Siegen, Deutschland, 18 Seiten.
- White, D. J.; Take, W. A.; Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique* 53, No. 7, S. 619–631.