

Nachsimulation dynamischer Bodenverdichter und Ansätze zur klein- und großskaligen Validierung

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

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

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

Kurzfassung

Vorgestellt werden numerische und technische Untersuchungen zu dynamischer Bodenverdichtung. Der Schwerpunkt der Projektarbeit lag dabei in der Entwicklung von numerischen Modellen in Anlehnung an die Systeme Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV), Impulsverdichtung (RIC) und Impact Roller. Neben einer Validierung an verfügbaren Felddaten wurde ein Versuchsstand für den Einsatz der PIV Methode (Particle Image Velocimetry) geplant und in Vorversuchen getestet. Mit dem weiteren Projektschwerpunkt von Messungen an Verdichtungsgrößgeräten wie der BOMAG 32 t Polygonwalze BW 332 DI wurden Voraussetzungen zur Optimierung der Verdichter geschaffen.

Schlagwörter: dynamische Bodenverdichtung, Abaqus, 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, Wirtktiefen, 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 (FKZ: 03FH027I2). 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 auch mit 1:1 Versuchen an Großgeräten geprüft und im Sinne eines interaktiven Vorgehens immer wieder verbessert werden.

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 konnten in den letzten beiden Jahrzehnten neue An-

wendungsfelder 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.

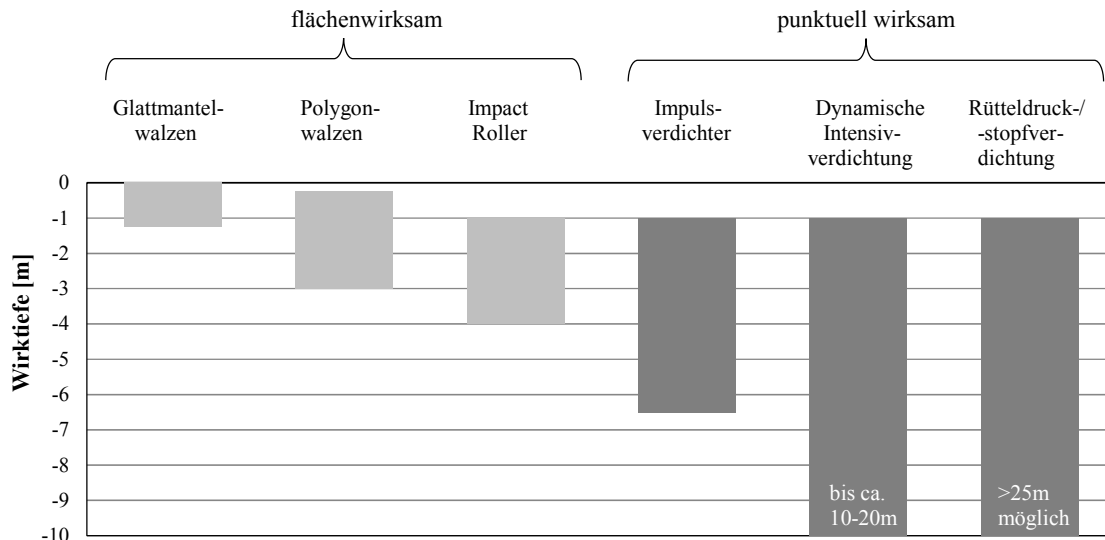


Abbildung 1. Zusammenstellung typischer Wirktiefenbereiche ausgewählter Bodenverdichter

2.2 Dynamische Bodenverdichtung – Berechnungsansätze zur Wirktiefenermittlung

Grundlegende mathematische Gesetzmäßigkeiten wurden zunächst für die Methode der Dynamischen Intensivverdichtung aufbereitet. Gegenüber einer rein statischen Auflast wird bei dynamischer Verdichtung ein Vielfaches der Verdichtungsleistung generiert. Bei dieser in den 60er Jahren entwickelten Dynamischen Intensivverdichtung mit Nutzung eines Kranes zum Anheben und Lösen eines Fallgewichtes können oft Wirktiefen von mehr als 10 m erreicht werden (Adam, D., 2013).

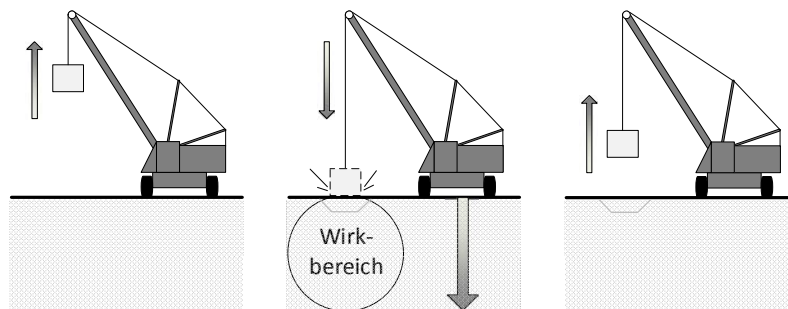


Abbildung 2. Prinzip der Dynamischen Intensivverdichtung

Die Einflusstiefe (d_{\max}) lässt sich näherungsweise aus der Masse des Fallgewichtes (m_G), der Fallhöhe (h_0) sowie den empirischen Parametern zur Fallbewegung (c) und zum Boden (δ) ermitteln (d_{\max} in Meter):

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

In umfanglicheren Berechnungsansätzen, wie z.B. nach Poran, C. J. et al. (1992, Gl. 2), werden auch Anzahl der Impulse und Abmessungen des Fallgewichtes berücksichtigt. Dieser Formelansatz entstand

im Ergebnis kleinskaliger Versuche. In Gl. (2) werden die Seitenlänge (D) und die Fläche (A) eines quadratischen Fallkörpers sowie die Anzahl der Aufprallvorgänge (N) berücksichtigt. Die weitere Parameter j und k sind Koeffizienten zur Beschreibung der Regressionskurve und wurden in Abbildung 3 mit $j = 1,0$ und $k = 0,8$ angesetzt.

$$d_{\max}/D = j + k \cdot \log N \cdot m_G \cdot h_0 / (A \cdot d_{\max}) \quad (2)$$

Dynamische Effekte wie die Wellenausbreitung der Baugrundverbesserung werden z.B. in Berechnungsmethoden nach Chow, Y. K. et al. (2000, Gl. 3) beschrieben. Für Fallgewichte mit einer Aufprallfläche zw. 3 m² und 4 m² sowie Böden mit einer „SPT penetration resistance“ von 1 bis 15 Schlägen/300 mm (entspricht ca. 2 bis 30 Schlägen N_{10} mit DPH) wurde folgende Formel abgeleitet.

$$d_{\max} = m_G \cdot h_0 / (5 + 0,075 \cdot m_G \cdot h_0) \quad (3)$$

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.

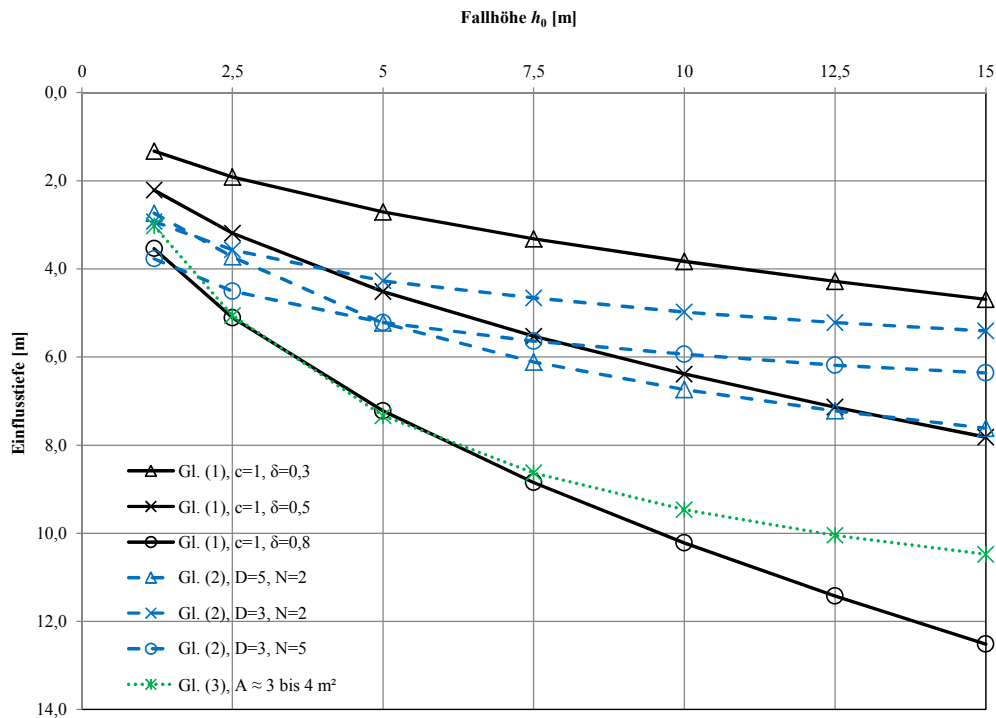
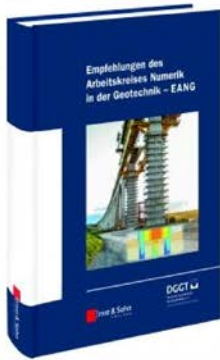


Abbildung 3. Vergleich Einflusstiefe über definierte Fallhöhen in Abhängigkeit der Berechnungsverfahren für eine Fallmasse $m_G = 16,3 \text{ t}$

2.3 Numerische Verfahren in der Geotechnik und Abbildung großer Bodenverformungen



In der Geotechnikpraxis werden numerische Verfahren wie die Finite Elemente Methode (FEM) vor allem zur Berechnung von Verformungen u.a. für komplexe Gründungen, Verbau- und Baugrundverbesserungsmaßnahmen im Lockergestein und auch für Festgestein eingesetzt. Dabei können Herstellungsprozess und die Auswirkungen von Strukturelementen (Wand, Anker, Steifen) bewertet werden. Aktuelle Hinweise zu diesen Themen sind in den Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. zu finden (Obmann / Stellvertreter: Prof. Dr.-Ing. habil. P.-A. von Wolffersdorff, Dresden / Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. I. Herle, Dresden).

Abbildung 4. Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik, 2014

Gegenüber anderen Fachdisziplinen, wie z.B. dem konstruktiven Ingenieurbau mit industriellen Werkstoffen, gelten bei Berechnungsansätzen zum Bodenverhalten einige Besonderheiten, besonders hinsichtlich Festigkeits- und Steifigkeitsverhalten. Diese müssen in Abhängigkeit der zu bewertenden Fragestellungen bekannt sein und müssen hinreichend genau berücksichtigt werden. 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 präzise 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. Bei der Simulation von Impact-Ereignissen aus dem Bereich der Kurzzeitdynamik entstehen bei hohen Energieeinträgen stark entartete Elemente im Kontaktbereich. In ABAQUS können diese Grenzen durch Methoden wie dem Coupled Eulerian-Lagrangian Ansatz (CEL) oder dem Arbitrary Lagrangian-Eulerian Ansatz (ALE) auch für relativ große Bodenverformungen erweitert werden. Mit der ALE Methode können diese Entartungen im Finiten Elemente Netz vom Gleichungslöser (implizit/explicit) durch eine kontinuierliche Neuvernetzung besser kontrolliert werden (s. ABAQUS, 2013 und Aubram, D., 2013).

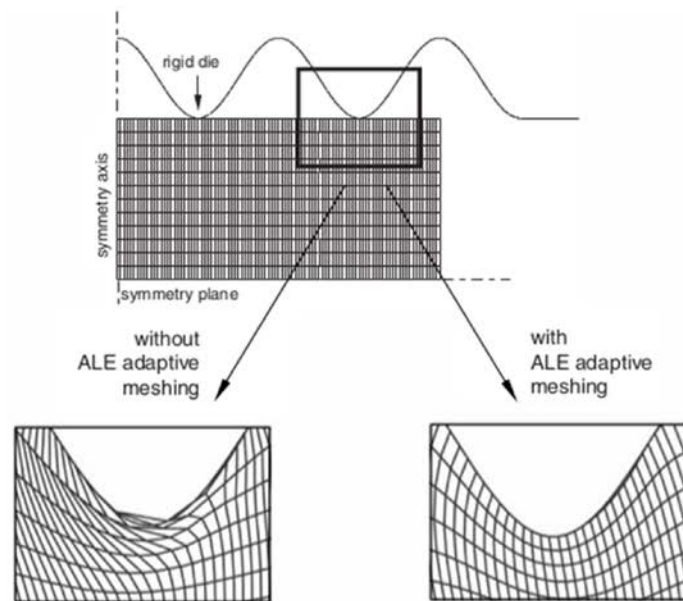


Abbildung 5. Nutzung von ALE mit adaptiver Vernetzung zur Kontrolle von Elemententartungen, ABAQUS (2013)

2.4 Kleinskalige Modelle zur Untersuchung dynamischer Bodenverdichtung

Parallel zur Entwicklung numerischer Modelle wurden im Projekt Ansätze für technische Versuche im Modellmaßstab zur Untersuchung dynamischer Bodenverdichtung recherchiert, geprüft und weiterentwickelt. Die Versuche sollten geeignet sein, Ansätze und Ergebnisse der eigenen numerischen Modelle zu validieren, aber im Idealfall auch Teilaspekte abzubilden, die mit den numerischen Methoden nur ungenügend beschrieben werden können. Die Konzepte für dynamische Messungen müssen in einen gerätespezifischen und einen bodenspezifischen Teil aufgegliedert werden. Das Bewegungsver-

halten der Gerätesysteme kann mit Beschleunigungsmessungen präzise erfasst werden und wird dabei gleichzeitig aufgrund vergleichsweise vernachlässigbarer Masse der Sensoren nicht beeinflusst. Bodenspezifisch werden in der Literatur verschiedene Messmethoden bei kleinskaligen Versuchsaufbauten erläutert. Häufig wurde dabei die Messsensorik (z.B. Beschleunigungssensoren, Druckaufnehmer) im Boden in definierter Position z.B. analog Beine, R. A. (1986) oder Jafarzadeh, F. (2006) eingebaut.

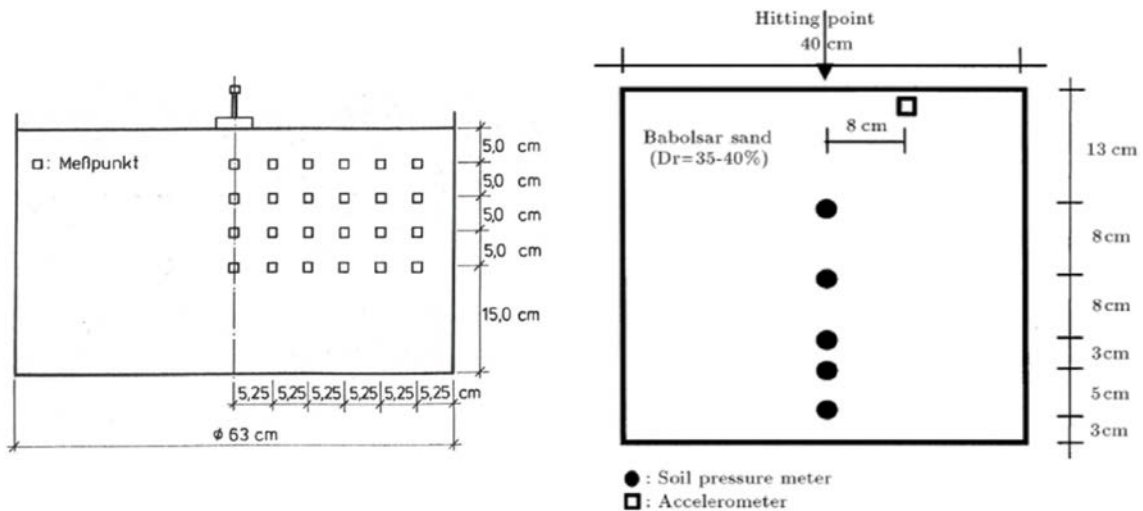


Abbildung 6. Schematische Darstellung der Versuchsaufbauten von Beine, R. A. (1986, linkes Bild) und Jafarzadeh, F. (2006, rechtes Bild)

Alternativ werden zunehmend berührungslose Verfahren wie die PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) für dynamische Betrachtungen genutzt. Dieses optische Messverfahren wird 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. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Messeinbauten wird so verhindert. Gemäß White, D. J. et al. (2000, 2003) kann diese Möglichkeit auch zur Beurteilung des Verschiebungsfeldes im Boden eingesetzt werden. Die Genauigkeit dieser Messmethode ist abhängig vom jeweiligen Versuchsaufbau. Für eine definierte Verschiebung von 0,1 mm wird in White, D. J. et al. (2000) eine Standardabweichung von 6 μm (6 %) auf Sand und 7,5 μm (7,5 %) auf Ton angegeben.

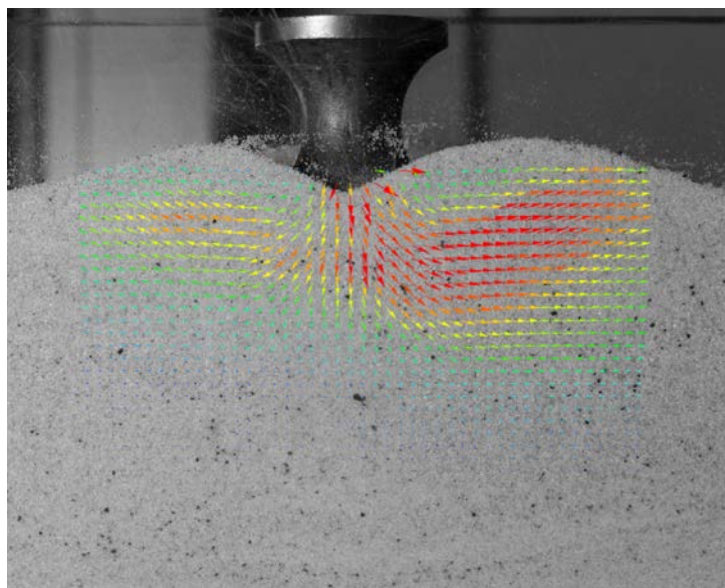
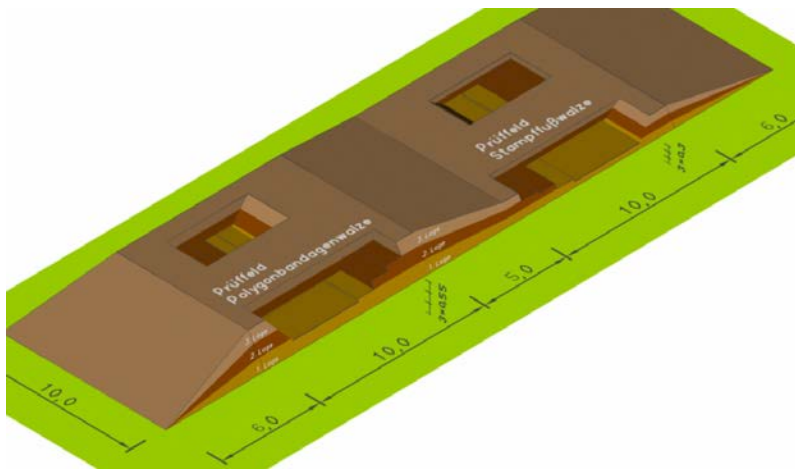


Abbildung 7. Vorversuche zur Eignung der PIV-Methode mit nichtbindigen Böden, Software JPIV

In Hajjalilue-Bonab, M. und Rezaei, A. H. (2009) wird die angepasste PIV-Methode von White, D. J. et al. (2000, 2003) angewandt, um den Energieeintrag von Fallgewichten im Boden zu bestimmen. Dazu wird ein Probenbehälter einseitig mit transparentem Material verschlossen. In dieser Schnittebene fällt ein halbrundes Gewicht. Durch die Auswertung von zwei Bildern (vor und nach dem Einschlag) kann anschließend Rückschluss auf die relative Dichte im Boden genommen werden. Chow, Y. K. et al. (2000) zeigen zudem, dass es durch Einsatz einer Hochgeschwindigkeits-Kamera möglich ist, die Veränderungen im Boden auch während des Energieeintrages zu erfassen.

2.5 Feldversuche mit Großgeräten zur Bodenverdichtung

Zur Bewertung der gewählten Modellansätze und Ergebnisse sind Messungen an Großgeräten im 1:1 Maßstab sehr wichtig. Gegenüber technischen Versuchen im Modellmaßstab können so Grenzen und Fehler durch die Skalierung vermieden werden. Zu Ungenauigkeiten bei Feldversuchen und der Arbeit an Bestandsböden führen neben den Einflüssen durch Witterungsbedingungen oft Inhomogenitäten im Baugrundaufbau. An gesondert erstellten Prüffeldern lässt sich die geleistete Verdichtungsarbeit von



Großgeräten an der Änderung bodenmechanischer Parameter mit indirekten und direkten statischen Messmethoden jedoch gut bewerten. Hierzu sind z.B. Sondierungen über die Tiefe sowie Aufgrabungen mit lagenweiser Beprobung/Messung geeignet (z.B. nach Thiele, R und Kloubert, H. J., 2006/2011).

Abbildung 8. Aufbau eines Prüffeldes zum Nachweis der Verdichtungsarbeit Thiele, R. und Kloubert, H. J., 2006

Für Aussagen zum Geräte- und Bodenverhalten während der Verdichtung sind dynamische Messungen notwendig. Bei integrierten Verdichtungskontrollen wird das Verdichtungsgerät gleichzeitig für Messungen genutzt, um direkt Hinweise zum Verdichtungserfolg zu erhalten (Adam, D. et al., 2011). Ergänzende Messungen, z.B. mit Beschleunigungssensoren, können dabei Aussagen zum Schwingungs-/Dämpfungsverhalten bei der Verdichtung liefern und bieten somit zusätzliche Möglichkeiten zur Validierung numerischer Modelle.

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 und Geometrien der Geräte sowie Bodeneigenschaften in geeigneter Näherung teilweise mathematisch und dann im Computermodell zu beschreiben. In den eigenen Modellen wurde eine Beschreibung von dynamischer Verdichtung durch Fallgewichte in Anlehnung an das System DYNIV weiterverfolgt. Darüber hinaus wurden auch numerische Modelle für die Systeme Impulsverdichter und Impact Roller entwickelt.



Abbildung 9. Dynamische Intensivverdichtung, www.dyniv.de (2014, linkes Bild), Impuls-Verdichtung, www.terra-mix.com (2014, mittleres Bild), 3-Seiten 25 kJ Impact Roller, www.landpac.com (2014, rechtes Bild)

3.2 Stoffgesetz, Bodenparameter, Modellaufbau und Ergebnisse

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 ermittelt. Problematisch ist 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, D., 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 Ergebnisrelevanz auch auf der Optimierung von Rechenzeiten der Modelle. Wesentliche Stoffparameter und Kenndaten bisheriger Simulationen sind nachfolgend zusammengestellt:

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

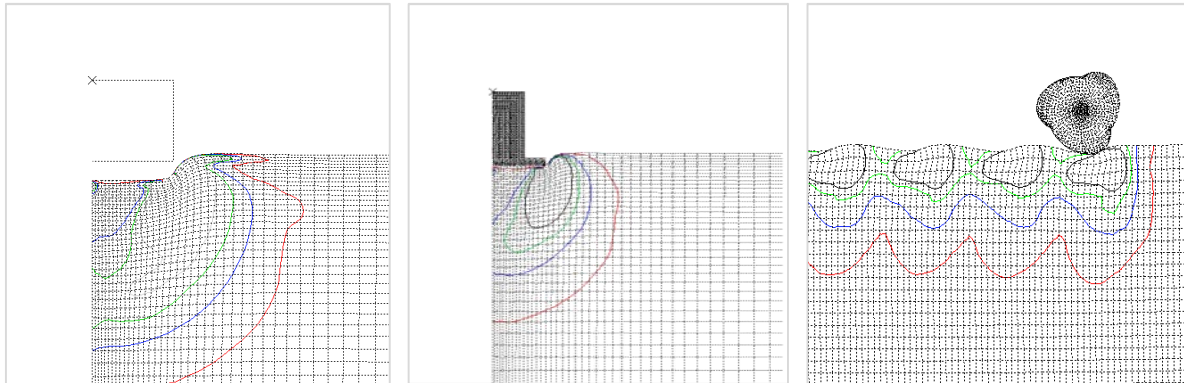


Abbildung 10. Simulation DYNIV, Impulsverdichter sowie Impact Roller (exemplarisch, PEQC2)

Die Verifikation und Validierung der numerischen Modelle stellt einen wichtigen Schwerpunkt innerhalb des Forschungsprojektes dar. Im Rahmen erster Untersuchungen erfolgte daher eine Nach-Simulation der Modelldaten eines Impact-Zentrifugentests an trockenem Sand nach Oshima, A. und Takada, N. (1998). Sowohl die Eingangswerte als auch die Ergebnisse dieses Tests wurden bereits von Gu, Q. und Lee, F.-H. (2002) für eine Simulation verwendet und konnten zum Vergleich herangezogen werden.

Tabelle 3. Wesentliche Stoffparameter des Modellbodens für die Simulation

Formel	E (isotrop)	ν	ρ_{d0}	$\rho_{d,max}$	$\rho_{d,min}$	φ	c'	e_0	$I_{D,0}$
Einheit	N/m ²	-	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	°	N/m ²	-	-
Sand, trocken	33.600.000	0,30	1.489	1.720	1.400	30	200	0,78	0,35

Zur Abbildung der hydrostatischen Kappe des Stoffgesetzes wird die aus Laborergebnissen bekannte Ödometerkurve nach Oshima, A. und Takada, N. (1998) mit Hilfe des analytischen Verfestigungsansatzes von Sandler, I. S. und Rubin, D. (1979) mathematisch korreliert. Die so erhaltene Beziehung zwischen der hydrostatischen Druckfestigkeit und der plastischen Dehnung kann genutzt werden, um das Verfestigungsverhalten auch unter größeren Spannungsbereichen zu quantifizieren.

Tabelle 4. Fallgewichtparameter

Formel	m_G	h_0	A_F	E
Einheit	kg	m	m ²	t*m
Sand, trocken	20.000	20,0	4,0	400

Um netzbasierte Fehlereinflüsse zu vermeiden, wurden verschiedene Netzfeinheiten (~3.000/~6.000/~24.000 Elemente) für den aus Finiten und Infiniten Elementen bestehenden Bodenkörper gewählt. Das Fallgewicht setzt sich ebenfalls aus einer definierten Anzahl von Finiten Elementen zusammen und wird als Starrkörper abgebildet. Für die Abstraktion des Fallkörpers hat sich eine Vernetzung gegenüber einer analytischen Starrkörperoberfläche als geeigneter erwiesen, da der Kontaktbereich genauer diskretisiert werden kann.

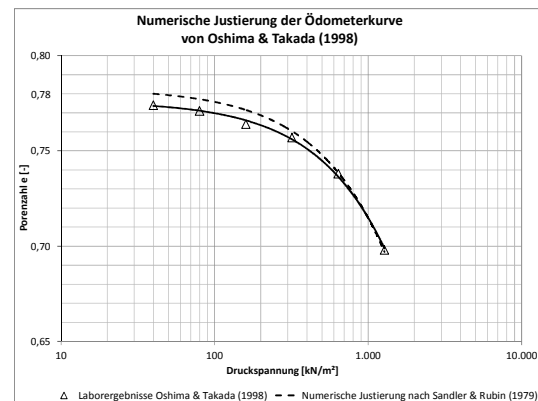


Abbildung 11. Korrelation der Ödometerkurve nach Oshima, A. und Takada, N. (1998)

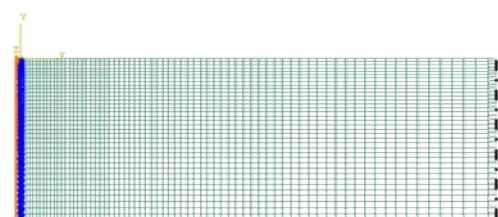
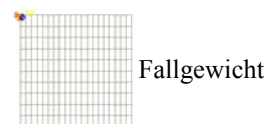


Abbildung 12. FE-Modell ABAQUS (vergrößerter Ausschnitt)

Die Simulationen der verschiedenen Netzfeinheiten erfolgten zunächst unter der reinen geostatischen Auflast im Standard-Löser von ABAQUS. Anschließend konnte der generierte Output als vordefiniertes Feld für die Weiternutzung im expliziten-Löser verwendet werden. Zusätzlich wurde die Netzadaption mit der ALE-Methode angewandt, um Elemententartungen zu vermeiden. Zur Bewertung der Ergebnisse wurde die Ausgabegröße der plastischen Dehnungsanteile des verfestigungswirksamen Anteils an der Kappenfließfläche (PEQC2, Grenzwert=0,02) ausgegeben.

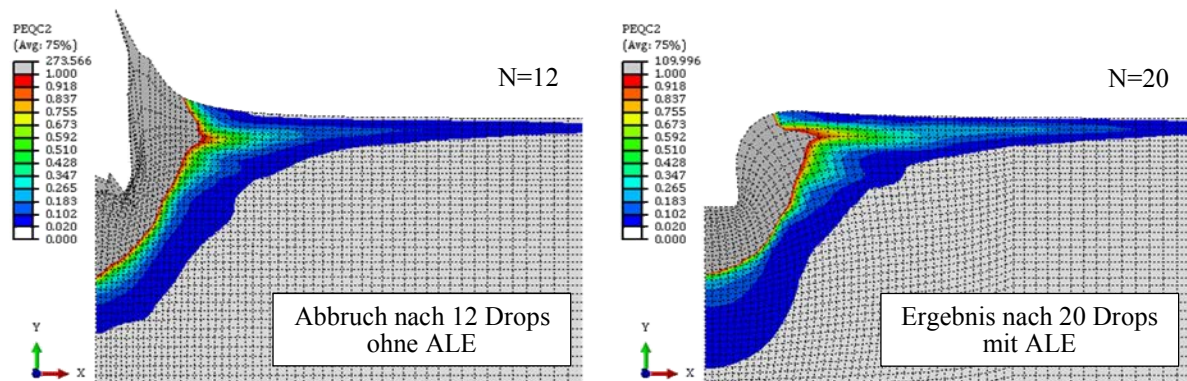
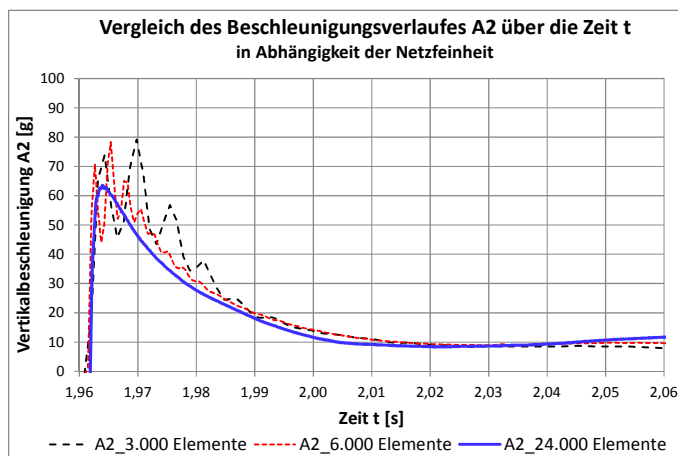


Abbildung 13. Ergebnisse zur Simulation von 20 Aufprallvorgängen mit einem 20 t Fallgewicht aus einer Höhe von jeweils 20 m mit und ohne Einsatz der ALE-Methode (linkes Bild ohne ALE, rechtes Bild mit ALE)



Der Einfluss der Netzfeinheit des Bodenkörpers wird mit der Ausgabe der maximalen Beschleunigung der Fallmasse zum Zeitpunkt des Aufpralls untersucht. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Größe der vertikalen Beschleunigung A2 erst mit zunehmender Netzfeinheit den erwarteten Verlauf annimmt (s. Adam, D. et al., 2012). Eine Hauptursache hierfür liegt in der Abbildung der Kontaktfläche. Je feiner dieser Bereich vernetzt ist, desto genauer wird die Kraftübertragung beschrieben.

Abbildung 14. Beschleunigungsverlauf A2 für verschiedene Netzfeinheiten

Tabelle 5. Ergebnisse der erreichten Wirtktiefen (DI) im Vergleich

Formel	m_G	h_0	E	DI	Δ
Einheit	kg	m	t·m	m	%
Zentrifugentest Oshima & Takada (1998)	20.000	20,0	400	10,9	-
Simulation Q. Gu & Lee, F.-H. (2002)	20.000	20,0	400	11,0	0,9 %
Simulation ECompact (2014)	20.000	20,0	400	9,0	-17,4 %

Im Rahmen der aktuellen Nachsimulation wurde ein Genauigkeitsgrad von ca. 82% erreicht. Eine weitere Steigerung dieser Größe soll unter Berücksichtigung zusätzlicher Einflussfaktoren, wie z.B. der Material- oder viskosen Dämpfung, erfolgen. Neben dieser Studie erfolgten bereits weitere Validierungen zu den Systemen DYNIV und RIC. Unter anderem konnte in Anlehnung an ein Praxisbeispiel einer DYNIV-Maßnahme (mehrschichtiger Baugrund) der erreichte Wirtktiefenbereich numerisch mit einer Genauigkeit von >90% nachgewiesen werden. Zusätzlich werden derzeit Studien zum Einfluss von unterschiedlichen Geometrien des Fallkörpers und des Verdichtungsfußes durchgeführt.

3.3 Theorie zum Bewegungsverhalten der Großgeräte

Bei den impulsartigen Bodenverdichtern sind für die erzeugte Verdichtungsenergie unter Ausnutzung der Gravitationskraft vor allem die Masse eines Fallgewichtes (m_G) und die Fallhöhe (h_0) maßgebend. Alternativ zur Simulation des gesamten Fallweges wurde die Aufprallgeschwindigkeit dem Fallkörper nah am Kontaktbereich als Initialbedingung aufgeprägt:

$$v_e = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0} \quad (4)$$

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 auch bei Walzenzügen z.B. analog Pistol, J., 2013 als Feder – Dämpfersystem harmonisiert werden kann. Wesentlich ist eine geeignete Kontaktbeschreibung zwischen Gerät und Boden, um auch Bewegungszustände der Bandage wie Gleiten und Kontaktverlust bzw. Springen zu beschreiben. Für die geplante 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 (5) ergeben sich die in Tabelle 3 zusammengefassten kinematischen Randbedingungen zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens dynamischer Bodenverdichtungsgeräte:

$$a = A_0 + \sum_{n=1}^N \{A_n \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot (t - t_0)) + B_n \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot (t - t_0))\} \quad (5)$$

Tabelle 6. 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	$\dot{s}_k = \Omega^2 r (\lambda \cos 2\Phi - \sin \Phi)$
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 zu Tiefenwirkung und Verdichtungsqualität

Grundsätzlich können im Rahmen der numerischen Berechnungen eine große Anzahl von Ausgabeparametern aufgezeichnet und ausgegeben werden. Bei den Untersuchungen der Wirkweisen unterschiedlicher Bodenverdichter lag ein Hauptinteresse auf der Tiefenwirkung der Verfahren. 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. Unter Annahme des theoretischen Ansatzes der ödometrischen Kompression kann gemäß (6) und (7) 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_i , 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).

$$\rho_{d,i} = \rho_s / (1 + e_i) \quad (6)$$

$$e_i = e_0 - \varepsilon_i \cdot (1 + e_0) \quad (7)$$

$$D_i = \rho_{d,i} / \rho_{Pr} \quad (8)$$

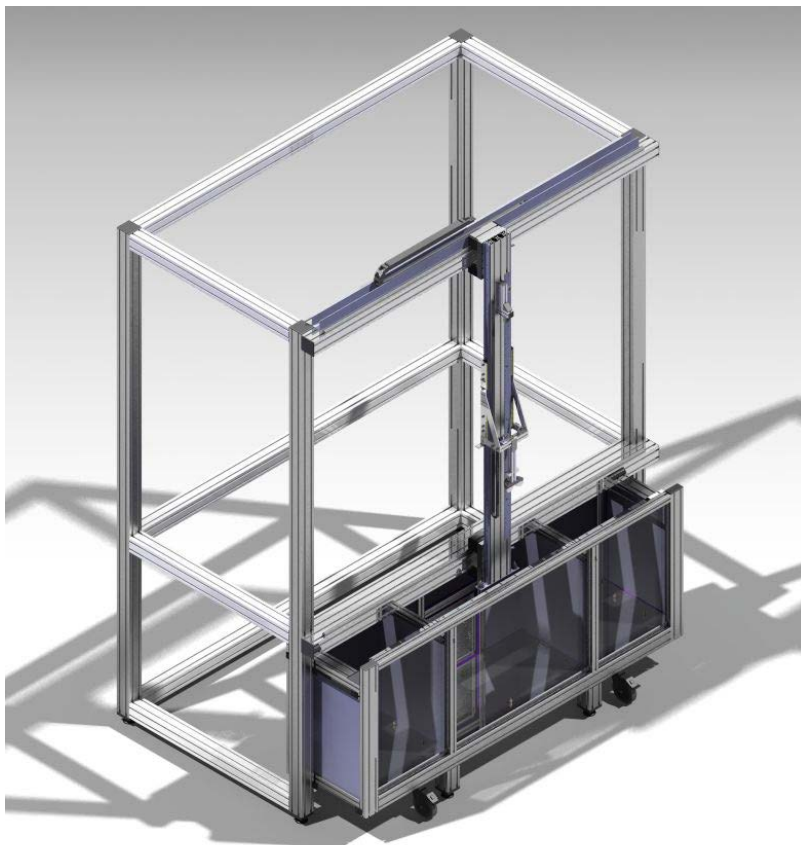
$$I_{D,i} = (e_{max} - e_i) / (e_{max} - e_{min}) \quad (9)$$

$$I_{r,i} = (I_{D,i} - I_{D,0}) / I_{D,0} \quad (10)$$

4 MESSTECHNISCHE VALIDIERUNG

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

Seit Ende 2013 wurde im Rahmen des FuE-Projektes ein Versuchsstand zur Verwendung der PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) für die dynamische Bodenverdichtung stehender und fahrender kleinskaliger Modelle am digitalen Modell geplant, konstruiert und auf dem Gelände der HTWK Leipzig in Betrieb genommen. Der Probenr ager besitzt eine Gesamtbreite von 2 m, so dass neben der Untersuchung stehender Systeme auch Überfahrten bspw. mit dynamisch angeregten Modellen möglich sind. Die Fallvorrichtung wurde mittels ABAQUS auf ihre Steifigkeit und ihr Eigenschwingverhalten untersucht und bemessen.



Seit Abschluss der Planungen im Mai 2014 wurde die technische Dokumentation erstellt und alle notwendigen Bauteile beschafft. Neben den Hauptkomponenten (Probenr ager und Fallvorrichtung) bedarf es einem adäquaten Gerät zum definierten Bodeneinbau. Hierfür wurde in Anlehnung an Trudeep, N. D. und Dasaka, S. M. (2012) eine Einbauvorrichtung bestehend aus einem Trichter, einem Plattenschieber und einem Siebturm entwickelt und mit einem Materialf orderschlauch miteinander verbunden. Die Vorrichtung erlaubt es, durch die Variation der Durchflussmenge an Sand und der freien Fallhöhe ausgehend vom Siebturm reproduzierbar verschiedene Lagerungsdichten herzustellen.

Abbildung 15. Probenr ager und Fallvorrichtung zur Untersuchung dynamischer Bodenverdichtung mit kleinskaligen Modellen unter Einsatz der PIV Methode

Neben einer Erfassung und Auswertung des Verschiebungsfeldes vor und nach einer Verdichtung soll mit diesem Versuchsstand das dynamische Boden- und Ger ateverhalten erfasst werden. Bei zu großem

zeitlichen Abstand (Bildsprung) eines verglichenen Bildpaares, z.B. mit Beschränkung auf eine Vorher/Nachher-Betrachtung eines Verdichtungsvorganges, können Bereiche mit besonders starken Bodendeformationen in der Regel nur ungenügend bewertet werden. Daher wurde der Einsatz einer Hochgeschwindigkeits-Kamera (1000 Hz bei Auflösung 1280x1024) vorbereitet und getestet. Erst durch den Einsatz dieser Kamera konnten ausreichend hohe Korrelationen für die Erstellung von Verschiebungsfeldern auch für hochdynamische Prozesse erhalten werden. Somit ist es nun möglich, das Geräteverhalten, die Interaktion Boden/Gerät sowie das dynamische Verformungsverhalten mit Hilfe der PIV-Methode auszuwerten und mit Ergebnissen numerischer Simulationen zu vergleichen. Die Genauigkeit dieser Messmethode wurde erfolgreich durch vergleichende Messungen mit einem Tachymeter und anhand der Kennwerte eines dynamisch angeregten Systems geprüft. Ergänzend zu den aktuellen Arbeiten mit dem Versuchsstand für kleinskalige Modelle laufen auch Planungen für einen mittelgroßen Versuchsstand auf dem Gelände der HTWK Leipzig u.a. zum Einsatz handgeführter Verdichter und Fallgewichten bis 100 kg.

4.2 Statische und dynamische Messungen an Großgeräten

Seit dem Frühjahr 2014 werden Versuche an Verdichtungsgrößgeräten durchgeführt. Begonnen wurde mit Messungen an einer 32 t Polygonwalze BW 332 DI auf Probefeldern nahe Leipzig. Der Schwerpunkt dieser Feldversuche liegt in einer umfassenden Dokumentation der Bodenverdichtungsarbeit und des Bewegungsverhaltens der Walze. Ziel der Feldversuche ist die Sammlung von Messergebnissen zum Geräteverhalten und zur Tiefenwirkung als Bewertungsgrundlage für numerische Simulationen. Im Rahmen einer ersten Versuchsphase wurden auf einem anstehenden Baugrund Untersuchungen zusammen mit Studenten der HTWK Leipzig durchgeführt. Neben vor- und nachbereitenden Sondierungen (CPT, DPH, DPL) erfolgten in Einzel-Messbereichen mit unterschiedlicher Anzahl von Überfahrten schichtenweise Aufgrabungen für weitere Feldversuche und zur Entnahme von Bodenproben für ergänzende Laborversuche (u.a. Proctor-, Scher- und Ödometerversuche). Darüber hinaus wurden Querprofile vor und nach den Überfahrten eingemessen.

Das Bewegungsverhalten der Walze sollte mit Beschleunigungsmessungen an der Bandage als Ergänzung zur walzeninternen Dokumentation der Bodensteifigkeit (E_{vib}) erfasst werden. Hierzu wurden zwei uniaxiale Beschleunigungssensoren an der Bandage normal bzw. tangential zur Bandage orientiert. Abgetastet wurden die Sensoren mit einem batteriebetriebenen Datenlogger in einer Abtastrate von 1 kHz. Die vertikale Amplitude der Beschleunigung ergab im Peak zu ca. +/- 5 g (ca. 50 m/s²). Die Ergebnisse sollen nun zur Prüfung und Verbesserung der Randbedingungen in den numerischen Modellen verwendet werden. Ein typischer Beschleunigungsverlauf ist zusammen mit dem zugehörigen Frequenzgang Abbildung 16 dargestellt und zeigt keine nennenswerten Oberschwingungen höherer Ordnung oder anderer Hinweise auf einen Kontaktverlust der Bandage.

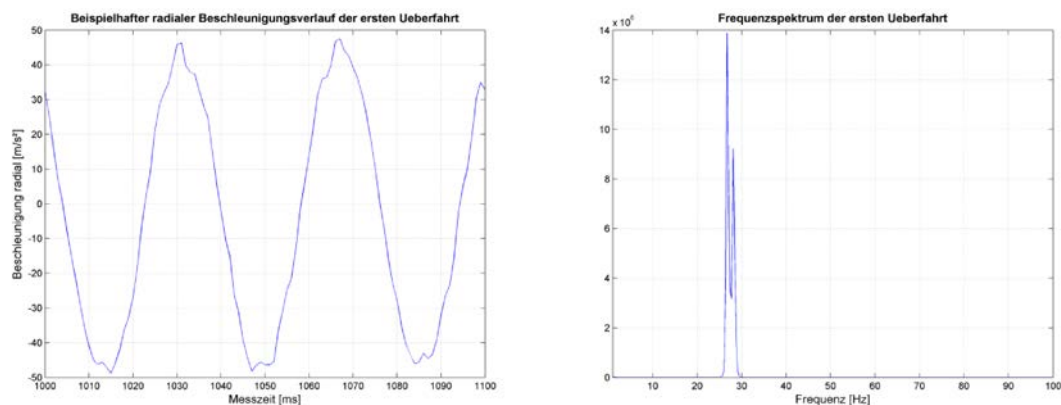


Abbildung 16. Beschleunigungsverlauf der 1. Überfahrt (Bild links) und das zugehörige Frequenzspektrum (Bild rechts)



Abbildung 17. Messspuren am Versuchsfeld nahe Leipzig (Bild oben), Messtechnik (Sensoren, Spannungsversorgung, Datenlogger) (Bild unten links) und lagenweises Aufgraben eines Messbereich (Bild unten rechts)

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der bisherigen Arbeiten in dem vom BMBF finanzierten Projekt ECOMpact ist es gelungen, numerische Modelle in ABAQUS® zur Simulation verschiedener Verdichtungs- und Großgeräte mit transientem Energieeintrag zu entwickeln. Dabei wurde belegt, dass das Verformungsverhalten von Boden sowie auch Wirkprinzipien von Bodenverdichtungsgeräten numerisch geeignet beschrieben und somit besser verstanden werden können. Für präzise Ergebnisse ist eine hohe Qualität der Eingangsparameter sowie der Validierungen und Verifikationen mit Sensitivitätsstudien erforderlich. Zur Vermeidung von Elemententartungen bei großen Bodenverformungen kann eine Netzadaption mit der ALE-Methode angewandt werden.

In den vorgestellten Arbeiten wurden für die notwendige Validierung und Verifikation u.a. Modelldaten eines Impact-Zentrifugentests sowie Felddaten zu den Großgeräten genutzt. Sensitivitätsstudien dienen zur Bestimmung u.a. von Einflüssen der Netzfeinheit, des Verfestigungsansatzes und der Kontaktbedingungen. Zur Prüfung und Weiterentwicklung der numerischen Modelle wurden im Rahmen von Feldversuchen statische und dynamische Messungen zur Wirkweise des BW 332 DI durchgeführt. Darüber hinaus wurden kleinskalige Versuchsstände für hochdynamische Messungen entwickelt, um mit der PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) berührungslos und ohne zusätzliche Einbauten Messungen in hoher Genauigkeit durchführen zu können. Neben der Nutzung zur Validierung der

numerischen Modelle sollen mit diesen Versuchen Besonderheiten der dynamischen Verdichtungsprozesse für Detailfragestellungen unter Laborbedingungen untersucht werden. Vorteile einer kleinskaligen Versuchsanordnung gegenüber Versuchen im 1:1 Maßstab u.a. hinsichtlich Kosten- und Zeiterparnis sowie der Reproduzierbarkeit von Messergebnissen sind noch mit Nachteilen durch den Modellfaktor zu bewerten. Erste Ergebnisse zur PIV-Methode belegen die Möglichkeiten, Verschiebungsfelder im Boden sowie auch die Interaktion zwischen Fallkörper bzw. Verdichtungsgerät und Boden präzise zu erfassen und beschreiben zu können. Somit wurden wesentliche Voraussetzungen geschaffen, um Ansätze zur Optimierung, Weiter- und Neuentwicklung von innovativen Verdichtungsgeräten zu prüfen und zu verknüpfen.

6 AUSBLICK

Schwerpunkte der weiteren Tätigkeiten liegen auf interaktiven und prüfenden Methoden zwischen numerischen Simulationen in ABAQUS, Versuchen mit der PIV-Methode (Particle Image Velocimetry) sowie statischen und dynamischen Messungen bei Feldversuchen mit Großgeräten. Neben der Verbesserung der numerischen und technischen Modelle zur dynamischen Bodenverdichtung mit transientem Energieeintrag sollen die Untersuchungen an dynamisch angeregten Verdichtern u.a. in Anlehnung an die Arbeiten von Kröber, W. (1988), Grabe, J. (1992) und Adam, D. (1996) intensiviert werden. Hierfür wird die Einbindung benutzerdefinierter Stoffgesetze in ABAQUS® über Subroutinen (UMAT, VUMAT) vorbereitet. In Anlehnung an Kelm, M. (2004) soll hierfür die Verwendung der Hypoplastizität nach von Wolffersdorff, P.-A. von (1996) mit Berücksichtigung intergranularer Dehnungen nach Niemunis, A. und Herle, I. (1997) geprüft werden. Neben Elementversuchen u.a. mit einem dynamischen Triaxialprüfgerät werden die Konstruktion eines großskaligen PIV-Versuchsstandes auf dem HTWK Gelände sowie weitere Feldversuche mit Walzenzügen verschiedener Gewichtsklassen vorbereitet.

LITERATUR

- ABAQUS (2013): ABAQUS Dokumentation, V. 6.13, ANALYSIS MANUAL, Abschnitt 12.1.1-2.
- Adam, D. (1996): Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen, Dissertation TU Wien, Institut für Grundbau und Bodenmechanik.
- Adam, D.; Paulmichl, I.; Kopf, F.; Erdmann, P. (2011): Integrierte Verdichtungskontrollen bei dynamischen Verdichtungsverfahren. In: Adam und Herrmann (Hg.): Baugrundverbesserung in der Geotechnik. Siegen, 14.-15.09.2010: Eigenverl. des Inst. f. Geotechnik.
- 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.
- Aubram, D. (2013): An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method for Penetration into Sand at Finite Deformation. Dissertation. Technische Universität, Berlin. Grundbauinstitut.
- Beine, R. A. (1986): Verdichtungswirkung der Fallmasse und Lastausbreitung in nichtbindigem Boden bei der dynamischen Intensivverdichtung. Dissertation, Bochum.
- 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.
- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2014): Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik - EANG. 1. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.
- Gu, Q.; Lee, F.-H. (2002): Ground response to dynamic compaction of dry sand, *Géotechnique* 52, No. 7, p. 481-493.
- Gudehus, G. (1981): *Bodenmechanik*. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart.
- Grabe, J. (1992): Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1991. Karlsruhe: Karlsruhe : Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik (Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Friedericiana in Karlsruhe).

- 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 Rüttel-druckverfahren. In: Adam und Herrmann (hrsg.): *Baugrundverbesserung in der Geotechnik*; 13.09.-14.09.2012, Wien, Österreich, 18 Seiten.
- Jafarzadeh, F. (2006): Dynamic Compaction Method in Physical Model Tests. *Scientia Iranica* Vol. 13 (2), S. 187–192.
- Jumo, I.; Geldenhuys J. (2004): Impact Compaction of Subgrades - Experience on the Trans-Kalahari Highway Including Continuous Impact Response (CIR) as a Method of Quality Control. In: CAPSA '04. 8th conference on asphalt pavements for southern Africa : roads, the arteries of Africa : proceedings, final. Pretoria, South Africa: CSIR Transportek, Asphalt Academy.
- Kelm, M. (2004): Numerische Simulation der Verdichtung rolliger Böden mittels Vibrationswalzen. Hamburg-Harburg: Techn. Univ., Arbeitsbereich Geotechnik und Baubetrieb.
- Kröber, W. (1988): Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden. Dissertation. Technische Universität, München. Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, zuletzt geprüft am 30.01.2013.
- Niemunis, A, Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2: pp. 279-299.
- Oshima, A.; Takada, N. (1998): Evaluation of compacted area of heavy tamping by cone point resistance. *Proc. Centrifuge 98*, Tokyo, p. 813-818.
- 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.
- Poran, C. J.; Heh, K-S; Rodriguez J. A. (1992): Impact Behavior of Sand. In: *Soils and Foundations* 1992 (32), S. 81–92.
- Sandler, I.S. & Rubin, D. (1979): An Algorithm and a Modular Subroutine for the Cap Model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3, p. 173-186.
- Thiele, R.; Kloubert, H-J (2006): Erfahrungen im Einsatz eines Walzenzuges mit Polygonbandage zur Tiefenverdichtung. In: Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. (FVB) (Hg.): Heft Nr. 34 - 3. Fachtagung Baumaschinentechnik 2006. Ideen, Konzepte, Lösungen. 3. Fachtagung Baumaschinentechnik 2006 Ideen, Konzepte, Lösungen. Dresden, 05.-06.10.2006, S. 315–326.
- 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.
- Trudeep, N. D.; Dasaka, S. M. (2012): Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens. In: *Geomechanics and Engineering* 2012 (4 No. 2), S. 79–90.
- White, D. J.; Take, W. A.; Bolton, M. D. (2000): Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis. In: D. Contractor, C.S. Desai, S. Harpalani, J. Kemeny und T. Kundu (Hg.): *Computer Methods and Advances in Geomechanics. Proceedings of the 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Rotterdam: Taylor & Francis, S. 997–1002.
- 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.
- Wolffersdorff, P.-A. von (1996): A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1: pp. 251-271.