

Ein optisch-sensorisches Verfahren zur Bewertung der Fallgewichtsverdichtung im Modellversuch

Vanessa Fock, Bénédicte Löwe, Felix Oertel, Ralf Thiele

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Karl-Liebknecht-Straße 132, 04277 Leipzig

1. Abstract

Fallgewichtsverdichtung (FGV) ist eine Methode zur Bodenverdichtung, bei der ein 5-30 Tonnen schweres Gewicht aus 10-30 m Höhe wiederholt fallen gelassen wird. Diese Technik wird weltweit zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Konsolidierung von Böden eingesetzt. Die Effektivität wird von verschiedenen Parametern beeinflusst. Die Planung und Ausführung von FGV-Maßnahmen stellt in der Praxis eine Herausforderung dar. Der vorgestellte methodische Ansatz kombiniert skalierte 1g-Modellversuche und numerische Simulationen, um die Verdichtungsleistung während des Bauprozesses zu bewerten. Die Ergebnisse tragen zum besseren Verständnis des Energieumwandlungsprozesses bei Aufprall und zur Verbesserung der Effektivität und Effizienz der FGV bei.

2. Einführung

Die Fallgewichtsverdichtung (FGV) ist ein dynamisches Bodenverdichtungsverfahren. Sie wird zur Vorwegnahme von Setzungen, zur Erhöhung der Tragfähigkeit und der Reduzierung des Verflüssigungspotentials im Baugrund eingesetzt. In Verbindung mit einer auf dem verbesserten Boden aufbauenden Flachgründung kann sie im Vergleich mit anderen geotechnischen Verfahren eine kosteneffiziente und nachhaltige Alternative darstellen. Die Anwendungsbereiche der FGV reichen von grobkörnigen bis zu gemischtkörnigen Böden. Sie wird zudem zur Abfallverdichtung auf Deponien sowie bei der Renaturierung der Bergbaufolgelandschaften eingesetzt (Lukas, 1995).

1970 wurde das Prinzip durch Louis Ménard als „dynamische Konsolidation“ in der Bautechnik eingeführt (Ménard & Broise, 1975). Das Wissen zur FGV wurde seitdem um die Anwendungsbereiche in sedimentären Böden (Feng et al., 2011), künstlichen Auffüllungen (Rollins & Kim, 2010) und Abfall (van Impe & Bouazza, 1996) erweitert. Bautechnisch basiert das Verfahren auf Fallgewichten (FG) die mit einer Masse von 5 bis 30 Tonnen aus Höhen bis zu 30 m an Verdichtungspunkten in einem definierten Raster mehrfach fallen gelassen werden (Mayne et al., 1984). Als Trägergeräte für die FG werden Seilbagger mit Freifallwinden eingesetzt. Die Vorbemessung erfolgt unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften nach analytischen Methoden (Lukas, 1995). Die relevanten Parameter Fallhöhe, Masse, Schlaganzahl und Verdichtungs raster werden auf Probefeldern insitu kalibriert. Zur Kontrolle der Wirksamkeit werden geotechnische Sondierverfahren (z. B. Ménard-Pressiometrie oder Drucksondierungen), Setzungsmessungen sowie Hebungs-Setzungs-Tests durchgeführt (Massarsch, 2019).

Das Verdichtungsprinzip beruht auf der Umwandlung der kinetischen Energie des fallenden Gewichtes in innere Energie des Bodensystems, welche als plastische und elastische Dehnungen, als Körperschall, sowie als Wärme auftritt (Souza & Pasqual, 2021).

Die plastischen Dehnungen können überwiegend auf eine Reduzierung des Porenanteils in der Kornmatrix des Bodens zurückgeführt werden, welche zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften führt (Jia et al., 2021). An der Bodenoberfläche können um das FG lokal Auflockerungen in Form von Hebungen durch dilatantes Bodenverhalten auftreten (Jia et al., 2018). In der phänomenologischen Betrachtung bleibt am Auftreffpunkt des FG ein Verdichtungskrater zurück (Souza & Pasqual, 2021).

Ein wesentlicher Teil der Forschung zur FGV beschäftigt sich mit Methoden zur Prognose der Wirtktiefe und dem Grad der durch die Verdichtung erreichten Bodenverbesserung. In der Praxis existieren dafür verschiedene analytische Ansätze welche überwiegend auf den Prozessgrößen Fallhöhe und FG, den Bodeneigenschaften sowie dem kumulierten Energieeintrag basieren (Ménard & Broise, 1975). Diese wurden im Rahmen von Feldversuchen (Feng et al., 2010) und Modellversuchen (Knut, 2022) entwickelt und sukzessive erweitert (Ghassemi et al., 2009). Durch die großen Fortschritte in der Rechentechnik haben Untersuchungen mittel Simulationsverfahren, insbesondere FEM und DEM (Jia et al., 2018) in der Forschung größere Bedeutung erlangt. Typischerweise basieren die Simulationen auf komplexen Stoffmodellen mit aufwendig zu kalibrierenden Parametern, was sie für den Einsatz in der Praxis weniger attraktiv macht.

Untersuchungen zeigen, dass das globale Verhalten granularer Materialien bei einem Einschlag von der Dehnungsrate abhängig ist (Iskander et al., 2015). Bei hohen Dehnungsraten (HDR) wurden gegenüber quasi-statischen Prüfungen in Triaxialversuchen bis zu 30 % höhere Festigkeiten und 2 % geringere Bruchdehnungen festgestellt. In Ödometerversuchen wurden bei HDR bis zu 100 % höhere Steifigkeiten ermittelt (Iskander et al., 2015). Weitere Untersuchungen verweisen hierbei auf die mikro- und makroskopische Einflussfaktoren des Bodengefüges sowie den Einfluss der Geometrie und dem Masseverhältnis der Stoßpartner (Bless et al., 2015). Die bekannten analytischen und numerischen Prognoseverfahren berücksichtigen dies bislang unzureichend.

Die Auswirkung des ratenabhängigen Verhaltens auf das Penetrationsverhalten von Körpern bei einem Aufprall auf granulare Materialien zeigen Untersuchungen von Goldman & Umbanhowar (2008). In Versuchen wurde eine Bronzekugel aus definierter Höhe abwechselnd auf Glas-, Aluminiumkugeln sowie Hirse fallen gelassen und dabei die Beschleunigung an der Bronzekugel erfasst. Während des Einschlags stiegen die an der Kugel gemessenen Beschleunigung bis zu einem Maximalwert (a_{peak}) und zeigten am Ende der Bewegung einen abrupten Abfall der Beschleunigung (a_{stop}). Die Ergebnisse verdeutlichten, dass die maximale Eindringung der Bronzekugel linear und die Beschleunigungen a_{peak} und a_{stop} exponentiell von der der Eindringgeschwindigkeit abhängig sind.

3. Hintergrund und Zielstellung

Mit der FGV werden Flächen bis zu 1.000.000 m² verdichtet (Hamidi et al., 2011). Durch die Parametrisierung an Probefeldern werden Inhomogenitäten auf großen Flächen nicht berücksichtigt. Hierdurch kann es lokal zur Über- bzw. Unterverdichtung kommen. Um die Verdichtungsparameter dynamisch anzupassen, wurden durch verschiedene Autor:Innen Ansätze vorgeschlagen, den Verdichtungsgrad und die Wirtktiefe prozessbegleitend zu prognostizieren. Diese basieren auf numerischen Simulationen (Parvizi &

Qafari, 2012), Untersuchungen der Fallgewichtskinematik (Bo et al., 2009), Deep-Learning-Algorithmen (Ranasinghe et al., 2019) und Setzungsmessungen (Moyle & Airey, 2015). Diese Ansätze werden in der Praxis bislang nicht angewendet.

Der Beitrag präsentiert die ersten Schritte zur Entwicklung eines neuen Messverfahrens, mit dem sich Wirtiefe und Verdichtungsgrad während der FGV bewerten lassen. Das Messverfahren basiert auf einer baubegleitenden Messung der Fallgewichtskinematik sowie der an der Oberfläche auftretenden, plastischen Verformung. Die Modelluntersuchungen werden als Eingangsgrößen für einen numerischen Simulationsansatz genutzt.

4. Methoden

4.1 Physikalische Modellversuche

Modellversuche werden in der Geotechnik zur Veranschaulichung komplexer physikalischer Prozesse sowie zur Validierung numerischer Simulationen und Berechnungen eingesetzt (Al Heib et al., 2020). Aktuelle physikalische Modellversuche sind komplexer und können prinzipiell über die verwendeten Skalierungen klassifiziert werden (Wood, 2004). Ein besonders relevanter Faktor ist hierbei die Skalierung der Schwerebeschleunigung (ebd.). Hierbei wird in Modellversuchen unter Bedingungen der Erdbeschleunigung, 1g-Versuche, oder mittels Zentrifuge skaliertes Schwerebeschleunigung, ng-Versuche, unterschieden. Für die vorgestellten bodenmechanischen Modellversuche zur FGV wurden kleinmaßstäbliche 1g-Versuche in Sand (Abbildung 2) genutzt. Frühe Anwendungen von 1g-Modellversuchen zur Untersuchung von Dehnungszuständen in Sanden wurden durch Wetzels et al. (1970) durchgeführt. Unter anderem nutzten Mayne und Jones (1983) sowie Poran et al. (1992) 1g-Versuche frühzeitig zur Beschreibung der Dynamischen Bodenverdichtung. Ein weiterer historischer Abriss im Kontext dynamischer Bodenverdichtung ist bei Nazhat (2013) zu finden.

Kleinmaßstäbliche Modellversuche bieten insbesondere den Vorteil, komplexe Prozesse und physikalische Bedingungen kontrolliert, vereinfacht und kosteneffizient zu analysieren. Bei geeigneter Versuchsplanung können bodenmechanische Zusammenhänge aufgedeckt, Experimente flexibel erweitert sowie numerische Simulationen validiert werden (Al Heib et al., 2020). Der 1g-Versuch wird hingegen durch einige Einschränkungen gekennzeichnet. Bei diesem kann im Vergleich zum Modellversuch in der Zentrifuge nicht von einer vollständigen Skalierung ausgegangen werden, sodass Modelleffekte zu erwarten sind. Besonders das Spannungsniveau, von dem weitere Bodenkennwerte wie der Reibungswinkel abhängig sind, ist beim 1g-Modellversuch als geringer anzunehmen (Walz, 2006). Dennoch sind 1g-Versuche in der Bodenmechanik aufgrund ihrer Effizienz und guten Durchführbarkeit weit verbreitet (Al Heib et al., 2020; Nazhat, 2013). Die Übertragbarkeit von experimentellen Ergebnissen ist weiterhin gut möglich, wenn Maßstabeffekte über Skalenfaktoren für einzelne Kennwerte wie Dehnung, Spannung, Masse und weitere angepasst werden (Al Heib et al., 2020; Nazhat, 2013; Walz, 2006).

Bei hoher bodenmechanischer Prozesskomplexität wie im Falle der FGV, ist für die numerische Simulation als auch für den physikalischen Modellversuch eine Reduktion auf zwei räumliche Dimensionen sinnvoll. Dies ermöglicht, Muster in der Bodenbewegung sowohl numerisch zu simulieren als auch optisch-sensorisch im Modellversuch zu erfassen, da von einem ebenen Dehnungszustand (plane-strain state, PSS) im Boden ausgegangen werden kann. Derart ist eine iterative Validierung der Numerik mit Daten aus

Experimenten, als auch eine Vorhersage von Zuständen im Modellversuch durch numerische Simulationen möglich.

4.2 Versuchsstand S

Der Modellversuchsaufbau (Abbildung 1, links) umfasst mehrere Elemente: Einen sandgefüllten Versuchsbehälter für PSS (1), einen sandgefüllten Versuchsbehälter für dreidimensionale Versuche (2), ein FG (7) mit Beschleunigungssensor sowie einen Geräteträger (3). Der Versuchsbehälter PSS (1) hat eine Dimension von 880 x 620 x 190 mm, der Versuchsbehälter (2) von 800 x 450 x 800 mm. Durch eine transparente PMMA-Scheibe (8) ist der Versuchsbehälter (1) im Schnitt einsehbar. Das FG ist rechteckig und wird über eine Linearführung parallel (4) zum Versuchsbehälter (1) und orthogonal (5) zur Sandoberfläche geführt. Die Fallhöhe kann durch einen höhenverstellbaren Elektromagneten (6) entlang der Linearführung variiert werden. Masse und Geometrie des FG sind durch zusätzliche Gewichtsscheiben variabel einstellbar. Die Kinematik des FG wird durch einen triaxialen, kapazitiven Beschleunigungssensor +/- 100 g (7) mit einer Abtastrate von 16000 Hz und einer Abtasttiefe von 16 Bit erfasst. Die Versuche erfolgen unter Annahme, dass sich der Sand im PSS verformt.

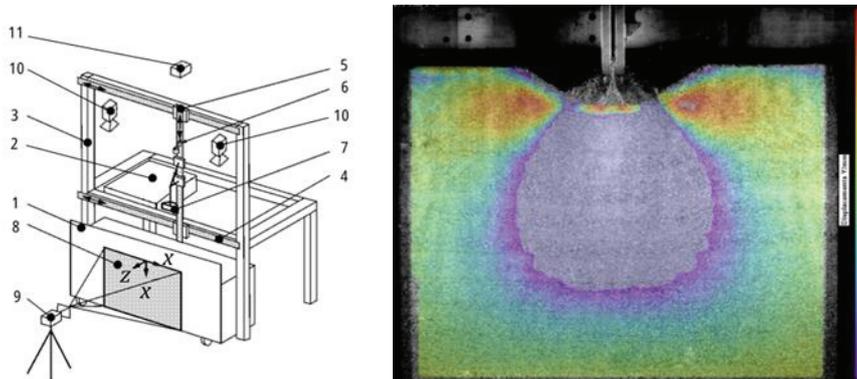


Abbildung 1: (links) Modellversuchsstand (Abbildung nach Knut 2022, eigene Ergänzungen). (rechts) Wirktiefe der Verdichtung nach Schlag 4 im PSS-Modellversuchsstand.

In den Versuchen wurde ein enggestufter Quarzsand (0/2), nachfolgend als Quarzsand 1 (QS1) bezeichnet, mit mittlerem Korndurchmesser von $d_{50} = 0,482$ mm verwendet. Die Kornverteilung wurde durch Siebanalysen und lasergranulometrische Messung bestimmt (Abbildung 2). Der Einbau des Versuchssandes erfolgte lagenweise durch die Methode der Air Pluviation (Einrieselung). Die Lagerungsdichte des Sandes hängt von der Fallhöhe und dem Volumenstrom bei der Einrieselung ab. Eine gleichmäßiges Einrieselverhalten des Sandes wird am Versuchsstand durch einen zwei-axialen Linearantrieb gewährleistet. Die Führung erlaubt sowohl eine lagegenaue Ausrichtung des Vorhaltebehälters in vertikaler Achse als auch eine konstante Verfahrgeschwindigkeit entlang des Versuchsbehälters. Der Volumenstrom wird dabei durch die Anordnung eines Lochbleches am Auslass des Behälters bestimmt. In Vorversuchen wurden mit einer Fallhöhe von 250 mm, einer Verfahrgeschwindigkeit von 100 mm/s und einem rechteckigen Lochblech mit Öffnungsweite 20 x 20 mm eine bezogene Lagerungsdichte von ca. $I_D = 0,3$ festgestellt. Die Reproduzierbarkeit der Einbaumethode ist durch Messun-

gen des Bodeneindringwiderstandes mittels Penetrometer, welches mit konstanter Geschwindigkeit von 20 mm/s am vertikalen Linearantrieb in den Boden eingedrückt wurde, bestätigt.

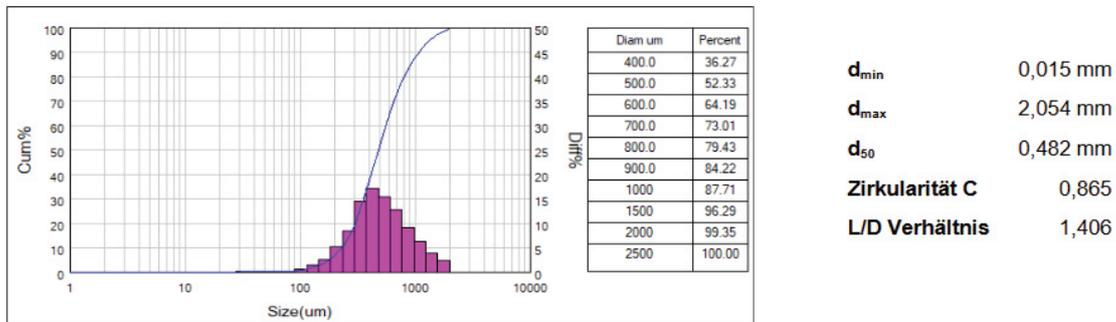


Abbildung 2: Korngrößenverteilung des verwendeten Sandes QS1, lasergranulometrischen Messung.

4.3 Optisch-Sensorische Verfahren

Der Modellversuchsstand wird durch ein integriertes optisch-sensorisches Messverfahren während und nach jedem Versuch eingemessen. Durch eine Hochgeschwindigkeitskamera (Abbildung 1, links 9) wird die Bodenverformung beim Aufprall mit einer Abtastrate von 1000 Hz durch die PMAA-Scheibe aufgezeichnet. Aufbauend auf einer internen Kalibrierung der Kamera werden die Bilddaten nach der Methode der Digital Image Correlation (DIC) ausgewertet (Borg et al., 2017). Ziel dieser Aufzeichnung ist es, einen visuellen Zugang zu den Verformungen des Sandes im Längsschnitt während des Aufpralls zu erhalten. Ein wesentlicher Aspekt der bildbasierten Erfassung ist die Orientierung der Kamera zur PMAA-Scheibe und die Belichtung des Sichtfeldes (Field of View). Die Kamera wurde orthogonal zur PMAA-Scheibe ausgerichtet und extern kalibriert. Vier LED-Lichtquellen wurden lageversetzt angeordnet, um eine hohe Reflektivität der Sandkörner zu gewährleisten und dabei Spiegelungen (Bright Spots) im Sichtfeld zu verhindern. Als Ergebnis dieser DIC wird es möglich, die Prozesse während jedes Schlags und vergleichend zwischen verschiedenen Schlägen umfangreich quantitativ zu beschreiben und zu visualisieren (Abbildung 1, rechts). Die Messungen der DIC im Längsschnitt werden durch photogrammetrische Messungen (Abbildung 1, links 10) nach jedem Schlag ergänzt. Ziel dieser zweiten Aufzeichnung ist es, ein präzises digitales Oberflächenmodell zu erzeugen und damit Bodenverformungen orthogonal zum Längsschnitt zu erfassen. Damit können Eigenschaften des Einschlagkraters, Hebung und Setzung der Oberfläche sowie plastische Verformungen quantifiziert und vergleichbar gemacht werden. Zur externen räumlichen Referenzierung und Validierung wird der gesamte Modellversuchsstand mit industrieller, hochpräziser Photogrammetrie (Abbildung 1, links 11) und alternativ mittels terrestrischem Laserscanning erfasst.

4.4 Versuchsplanung

Die geplanten Versuchsreihen basieren auf der Methode des Design of Experiments (DoE). DoE ist eine statistische Methode zur Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten. Sie untersucht systematisch Effekte verschiedener Faktoren auf Ergebnisse und hilft damit den Aufwand der durchzuführenden Modellversuchsreihen zu optimieren. Die Planung beinhaltet Auswahl von Faktoren und Stufen, Anzahl der Versuchsdurchläufe und Durchführungsreihenfolge. Die Versuchsreihen werden analysiert,

um den Einfluss spezifischer Faktoren auf das Ergebnis zu bestimmen (Mohamed El Ghazi, 2019). Aufgrund der Annahme linearer Abhängigkeiten der Ergebnisgrößen von den Faktoren besitzt das klassische DoE mit zweistufigen Versuchsplänen Einschränkungen bei der Anwendung bodenmechanischer Fragestellungen. Zur Anwendung kommt daher das Central-Composite-Design (CCD), welches auf einem zweistufigen Versuchsplan basiert und Systeme mit fünf Stufen untersucht (Siebertz et al., 2017).

Faktor	Stufe					Einheit
	--	-	0	+	++	
Fallhöhe	0,20	0,60	1,00	1,40	1,80	m
Fläche	148	185	222	259	333	cm ²
Masse	4,5	6,0	7,50	9,0	11,5	kg

Tabelle 1: Zusammenfassung der relevanten Faktoren und deren Stufen im CCD-Versuchsplan. 0 entspricht der mittleren Stufeneinstellung und -- / ++ den maximalen / minimalen Einstellungen.

Durch die Erweiterung zum CCD können quadratische Effekte und nichtlineare Zusammenhänge erfasst werden, was eine umfassendere Analyse und Optimierung im hier behandelten Kontext ermöglicht. In den Versuchsreihen soll die Abhängigkeit der Kinetik sowie der plastischen Verformungen vor dem Hintergrund des Bodenverhaltens unter HDR-Belastung untersucht werden. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind die Fallhöhe, die Masse, die Fläche, die Bodenart und die Zustandsgrößen des Bodens (Tabelle 1). Der Beschreibung des reproduzierbaren Bodeneinbaus aus Kapitel 4.2 entsprechend werden die Bodenart und die Zustandsgrößen als Konstanten betrachtet.

4.5 Numerik

Mithilfe der FE-Softwarepakete ABAQUS/Standard und ABAQUS/Explicit und unter Verwendung des hypoplastischen Stoffgesetzes mit intergranularen Dehnungen (HSM) werden in Solver FEM-Simulationen zur Analyse der FGV durchgeführt.

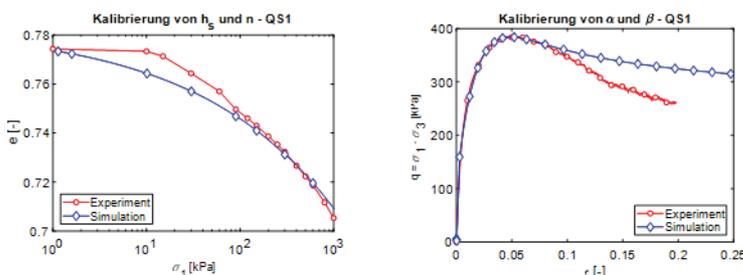


Abbildung 3: Kalibrierung von (links) h_s und n an lockerem KD-Versuch, (rechts) α und β am dichten Triaxialversuch.

Materialmodell des Bodens

Während das FG in den Simulationen als sog. rigid body (starr) angenommen wird, erfordert die Modellierung des Bodens, in diesem Fall des Sandes, aufgrund seines komplexen Materialverhaltens ein hochwertiges Stoffgesetz. Das HSM (Niemunis & Herle, 1997; Wolffersdorff, 1996) stellt ein solches dar und zeichnet sich sowohl durch die Abbildung wesentlicher mechanischer Eigenschaften von Sanden, als auch durch seine mathematische Einfachheit und Implementierung in FE-Programme aus (Kolymbas, 2019). Eine detaillierte Beschreibung des Stoffmodells ist u. a. in Mašin (2019) gegeben. Die Kalibrierung der acht Stoffparameter des Grundmodells (Tabelle 2; Abbildung 3) des

Versuchssandes QS1 erfolgte analog zu Fock (2021) in Anlehnung an Mašin (2019). m_R , m_T , R , β_r und χ wurden für QS1 in früheren Untersuchungen an einem sehr ähnlichen Material kalibriert und hier angenommen. Das Stoffgesetz wird über eine UMAT-Subroutine in ABAQUS integriert (SoilModels, 2018).

φ_c [°]	e_{c0}	e_{d0}	e_{i0}	h_s [MPa]	n	α	β	m_R	m_T	R	β_r	χ
35,0	0,76	0,50	0,912	2800	0,31	0,065	0,7	5	2	6,5e-5	0,5	6

Tabelle 2: Hypoplastische Stoffparameter - QS1

Numerisches Modell

Zur Simulation der Modellversuche wird der Boden unter Nutzung der Symmetrieeigenschaften des Problems mit einem $B/2 \times H = 0,95 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ - FE-Netz (3570 CPE4R-Elemente) in 2D sowie im PSS modelliert. Die Modellränder werden am rechten Rand horizontal bzw. am unteren Rand vertikal unverschieblich angenommen. Das FE-Netz des Bodens besteht aus einem $0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ großen Bereich uniformer Elemente mit einer Kantenlänge von 1,18 cm, gefolgt von einem Bereich mit hin zum Modellrand größer werdenden Elementen. Das Fallgewicht wird mit den Realmaßen $0,15 \text{ m} \times 0,01 \text{ m}$ aufgrund der deutlich größeren Steifigkeit als rigid body und somit starr angenommen.

Zu Beginn der Simulation wird die initiale Porenzahl e_0 über die initial conditions Formulierung definiert und der geostatische Anfangszustand als initialer Zustand mit ABAQUS/Standard ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Modellierung eines vollständigen impact-Vorgangs in zwei sub steps – dem impact step (IMP) und dem pull up step (PU). Die Lastaufbringung im IMP resultiert aus der Beschleunigung des FG über die Fallhöhe ($t_{sim} = 3 \text{ s}$) infolge von Gravitationskräften, wobei IMP mittels einer smooth step amplitude eingeleitet wird. Der Kontakt zwischen dem FG und dem Boden wird als reibungslos angenommen und über den contact pair algorithm definiert. Anschließend wird das FG im PU ($t_{sim} = 1 \text{ s}$) um eine definierte Höhe angehoben. Diese nichtlinearen Berechnungen werden mit ABAQUS/Explicit durchgeführt.

5. Erste Ergebnisse und Ausblick

In Vorbereitung der in Kapitel 4.4 dargestellten Versuchsreihen wurden Versuche durchgeführt um Messergebnisse aus dem Modellversuch mit denen der numerischen Simulation zu vergleichen. In den Modellversuchen wurde ein 10 kg-FG mit einer Fallhöhe von 1,0 m verwendet. Insgesamt wurden vier aufeinanderfolgende Schläge durchgeführt, wobei die Fallhöhe nach jedem Schlag auf 1,0 m zur Kratersohle korrigiert wurde. Bei den Versuchen wurde die am Fallgewicht auftretende Beschleunigungen gemessen, mithilfe derer ein anschließender Vergleich der Fallgewichtskinematik mit dem Simulationsergebnis möglich ist. Zur Bestimmung des Weges aus dem Beschleunigungssignal wurde dieses korrigiert und zweifach integriert.

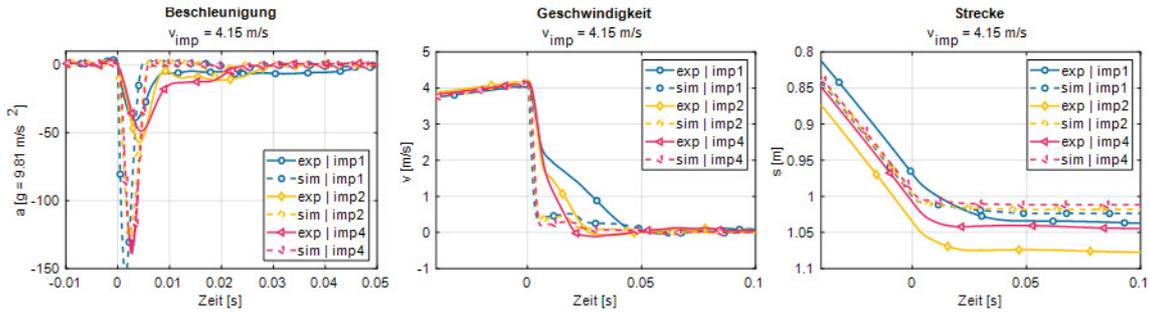


Abbildung 4: Beschleunigungssignale a (links), Geschwindigkeiten v (mittig) und Weg s (rechts) des FG in vertikale Richtung während der Einschläge $imp1$, $imp2$ und $imp4$. Die durchgezogenen Graphen stellen das Messsignal aus den Modellversuchen bzw. die Integration dessen dar, während die gestrichelten Graphen die Simulationsergebnisse der FE-Simulationen abbilden. Alle Signale werden bezogen auf den Zeitpunkt des impacts ($t = 0$ s) bei maximaler Geschwindigkeit dargestellt.

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, zeigen die Ergebnisse aus der Messung der Fallgewichtskinetik mittels der Beschleunigungsmessung vergleichbare Ergebnisse zu denen der Simulation. Die experimentell am FG bestimmten Signalverläufe der Beschleunigungsmessung weichen jedoch von den in der Simulation berechneten Beschleunigungen ab. Charakteristische Signalverläufe der Beschleunigung beim Auftreffen von Körpern auf granulare Oberflächen kennzeichnen sich durch einen anfänglich rapiden Anstieg der Beschleunigung auf einen Maximalwert (a_{peak}) sowie eine darauffolgende Plateaubildung während derer die Beschleunigung annähernd konstant bleibt (Transitions-Zone), bis es zu einem abrupten Abfall vom Plateauwert kommt (a_{stop}) (Goldman & Umbanhowar, 2008). Der charakteristische Verlauf wird durch die Experimente, nicht aber durch die Simulation abgebildet.

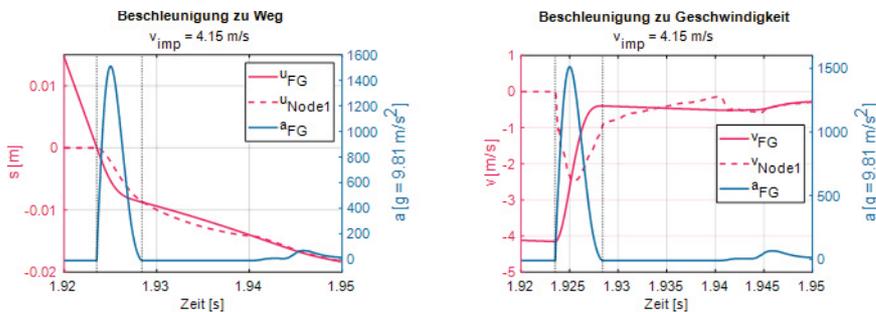


Abbildung 5: Beschleunigungssignal des FG in der Simulation zum Weg (links) und zur Geschwindigkeit (rechts) des FG und des Node 1 am linken oberen Modellrand (GOK der Symmetrieachse).

Eine mögliche Ursache liegt in einem Kontaktverlust der FE-Netzgeometrie zum FG, welcher während des Aufpralls durch unterschiedliche Verformungsgeschwindigkeiten beider Netze (Abbildung 5, rechts) resultiert. Hierdurch verschwinden in der Simulation die auf das FG wirkenden Beschleunigungen und das FG bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit, bis es durch die Geschwindigkeitsabnahme des Bodennetzes erneut zu einem Kontakt kommt. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Sensitivität des numerischen Modells auf die dynamischen Einflüsse hin zu analysieren.

Neben dem Vergleich der Kinetik des Fallgewichtes mit den numerischen Simulationsergebnissen wurden auch die Ergebnisse der Simulation zur Bodenverformungen mit den DIC-Setzungsmessungen des PSS-Modellversuches in einer ersten Betrachtung

tion validiert (Abbildung 6). Die Simulation liefert hier im Kraterbereich nach vier Schlägen eine vertikale Setzung von bis zu 7 cm zur ursprünglichen GOK (links). Weiter kann sie die zu erwartenden Hebungen an der Oberfläche und im oberflächennahen Bereich bereits im ersten Durchlauf mit den oben genannten Modellparametern gut nachbilden. Beim Vergleich mit den DIC-Messungen zeigt sich bereits in dieser frühen Phase des mehrstufigen Validierungsprozesses eine hohe strukturelle Übereinstimmung.

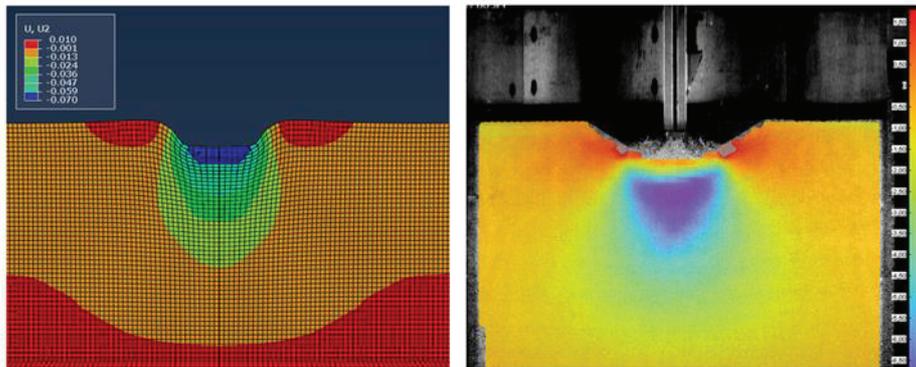


Abbildung 6: (links) Ergebnisse der FE-Simulation: Vertikale Setzung U_2 nach Schlag vier, gespiegelt in YZ -Achse. (rechts) Evaluation am $1g$ -Modellversuch: Vertikale Setzung nach Schlag vier, bestimmt mittels DIC. (beide) Einschlaggeschwindigkeit $v_{imp} = 4,15 \text{ m/s}$.

Verlauf und Lage der Bodenverformungen, insbesondere vertikale Hebung und Setzung (rechts), weisen eine hohe räumliche Korrelation mit den Ergebnissen der numerischen Simulation auf. Lediglich die nach Schlag vier noch geringe plastische Verformung der Oberfläche kann mittels DIC nicht ausreichend präzise erfasst werden. Eine Gesamtbeurteilung der Bodenverformung ist so erst unter Hinzunahme eines digitalen Oberflächenmodells im nächsten Verfahrensschritt ganzheitlich sinnvoll.

Literaturverzeichnis

Al Heib, M., Emeriault, F. & Nghiem, H.-L. (2020). On the use of $1g$ physical models for ground movements and soil-structure interaction problems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.006>

Bless, S., Omidvar, M. & Iskander, M. (2015). High-Speed Penetration of Granular Geomaterials. In M. Iskander, S. Bless & M. Omidvar (Hrsg.), *Rapid penetration into granular media: Visualizing the fundamental physics of rapid earth penetration* (S. 93–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800868-3.00004-3>

Bo, M. W., Na, Y. M., Arulrajah, A. & Chang, M. F. (2009). Densification of granular soil by dynamic compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 162(3), 121–132. <https://doi.org/10.1680/grim.2009.162.3.121>

Borg, J. P., Sable, P., Sandusky, H. & Felts, J. (2017). In situ characterization of projectile penetration into sand targets. In *AIP Conference Proceedings* (S. 120014). Author(s). <https://doi.org/10.1063/1.4971696>

Feng, S.-J., Shui, W.-H., Gao, L.-Y., He, L.-J. & Tan, K. (2010). Field studies of the effectiveness of dynamic compaction in coastal reclamation areas. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(1), 129–136. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0242-x>

Feng, S.-J., Shui, W.-H., Tan, K., Gao, L.-Y. & He, L.-J. (2011). Field Evaluation of Dynamic Compaction on Granular Deposits. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 25(3), 241–249. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000160)

Fock, V. (2021). Standardisierte Vorgehensweise zur Parametrisierung von sandigen Böden für das hypoplastische Stoffgesetz [Masterthesis]. Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur, Leipzig. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:l189-qucosa2-778542>

Ghassemi, A., Pak, A. & Shahir, H. (2009). Validity of Menard relation in dynamic compaction operations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 162(1), 37–45. <https://doi.org/10.1680/grim.2009.162.1.37>

Goldman, D. I. & Umbanhowar, P. (2008). Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 77(2 Pt 1), 21308. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.021308>

Hamidi, B., Serge, V. & Nikraz, H. (2011). Dynamic Compaction for Treating Millions of Square Meters of Sand. In M. A. Shahin (Hrsg.), *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering, ICAGE: Perth, Australia, November 7 - 9, 2011*.

Iskander, M., Omidvar, M. & Bless, S. (2015). Behavior of Granular Media Under High Strain-Rate Loading. In M. Iskander, S. Bless & M. Omidvar (Hrsg.), *Rapid penetration into granular media: Visualizing the fundamental physics of rapid earth penetration* (S. 11–63). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800868-3.00002-X>

Jia, M., Cheng, J., Liu, B. & Ma, G. (2021). Model tests of the influence of ground water level on dynamic compaction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(4), 3065–3078. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02110-y>

Jia, M., Yang, Y., Liu, B. & Wu, S. (2018). PFC/FLAC coupled simulation of dynamic compaction in granular soils. *Granular Matter*, 20(4). <https://doi.org/10.1007/S10035-018-0841-Y>

Knut, A. (2022). Die Fallgewichtsverdichtung als unelastischer Stoß -Prozessoptimierung und Abschätzung der Wirtktiefe. In 17. Erdbaufachtagung: „Erd- und Grundbau bei Infrastrukturmaßnahmen“.

Kolymbas. (2019). *Geotechnik*. Springer Berlin Heidelberg.

Lukas, R. (1995, 1. März). *Geotechnical Engineering Circular No. 1 - Dynamic Compaction (FHWA-SA-95-037)*. United States. Federal Highway Administration. Office of Technology Applications. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/40768>

Mašin, D. (2019). *Modelling of soil behaviour with hypoplasticity: Another approach to soil constitutive modelling*. Springer series in geomechanics and geoen지니어ing. Springer.

- Massarsch, K. R. (2019). Das Setzungsverhalten von vibrationsverdichteten, rolligen Böden. *geotechnik*, 42(3), 134–150. <https://doi.org/10.1002/gete.201900001>
- Mayne, P. W. & Jones, J. S [Jones S.] (1983). Impact Stresses During Dynamic Compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(10), 1342–1346. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:10\(1342\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:10(1342))
- Mayne, P. W., Jones, J. S [John S.] & Dumas, J. C. (1984). Ground Response to Dynamic Compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6), 757–774. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:6\(757\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:6(757))
- Ménard, L. & Broise, Y. (1975). Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation. *Géotechnique*, 25(1), 3–18. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.1.3>
- Mohamed El Ghazi. (2019). Statistische Versuchsplanung für Einsteiger. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31748.68487>
- Moyle, R. & Airey, D. (2015). Monitoring of dynamic compaction using topographic survey. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 168(1), 66–76. <https://doi.org/10.1680/grim.13.00034>
- Nazhat, Y. (2013). Behaviour of sandy soil subjected to dynamic loading. <http://hdl.handle.net/2123/9435>
- Niemunis, A. & Herle, I. (1997). Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 2(4), 279–299. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199710\)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199710)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8)
- Parvizi, M. & Qafari, M. A. (2012). Numerical method to determine soil stiffness by cyclic load. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 48(6), 266–271. <https://doi.org/10.1007/s11204-012-9157-9>
- Poran, C. J., Heh, K.-S. & Rodriguez, J. A. (1992). Impact Behavior of Sand. *Soils and Foundations*, 32(4), 81–92. https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.4_81
- Ranasinghe, R., Jaksa, M. B., Pooya Nejad, F. & Kuo, Y. L. (2019). Genetic programming for predictions of effectiveness of rolling dynamic compaction with dynamic cone penetrometer test results. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(4), 815–823. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.10.007>
- Rollins, K. M. & Kim, J. (2010). Dynamic Compaction of Collapsible Soils Based on U.S. Case Histories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(9), 1178–1186. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000331](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000331)
- Siebertz, K., van Bebbber, D. & Hochkirchen, T. (2017). *Statistische Versuchsplanung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3>
- SoilModels. (2018, 24. Juli). UMAT Implementation of Sand Hypoplasticity by UIBK - SoilModels. <https://soilmodels.com/download/umat-hyposand-uibk/>
- Souza, T. F. de & Pasqual, R. P. S. (2021). New Method to Predict Crater Depth Obtained in Dynamic Compaction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(5), 3981–3993. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01726-x>

van Impe, W. F. & Bouazza, A. (1996). Densification of domestic waste fills by dynamic compaction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(6), 879–887.
<https://doi.org/10.1139/t96-118>

Walz, B. (2006). Möglichkeiten und Grenzen bodenmechanischer 1g-Modellversuche. In F. Rackwitz (Hrsg.), *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik* (S. 63–78). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27438-3_5

Wetzel, R. A. & Vey, E. (1970). Axisymmetric Stress Wave Propagation in Sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1763–1786.
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001464>

Wolffersdorff, P.-A. von (1996). A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1(3), 251–271.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199607\)1:3<251::AID-CFM13>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199607)1:3<251::AID-CFM13>3.0.CO;2-3)

Wood, D. M. (2004). *Geotechnical modelling. Applied geotechnics: v. 1*. Spon Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315273556>