



Dynamische Intensivverdichtung untersucht in
Theorie und Praxis – Feldversuche, Laborversuche
und numerische Simulation

Referent	Alexander Knut, M. Eng. HTWK Leipzig
Tagungsort	H4 Hotel Leipzig Schongauer Straße 29 04329 Leipzig Tel.: +49 341-2540
Termin	24./25. Januar 2019

1 Einführung

Dieser Beitrag thematisiert den Einfluss der physikalischen Fundamentalgrößen Impuls und kinetische Energie auf die Verdichtungsleistung dynamischer Verdichtungstechnologien. Dynamisch wirkende Bodenverdichtungstechnologien sind hierbei z.B. die DYNIV oder auch die Impulsverdichtung. Hauptmerkmal dieser Technologien ist das Heben und Fallenlassen schwerer Massen aus unterschiedlichen Fallhöhen (Kirstein et al. 2016). Physikalisch beschreiben lässt sich diese Form der Bodenverdichtung durch Stoßgesetze. Im speziellen handelt es sich um einen teilelastischen Stoßprozess. Der teilelastische Stoß wird durch das Gesetz der Energie- und Impulserhaltung beschrieben:

$$p = p' \quad (1)$$

$$E = E' + \Delta U \quad (2)$$

Der Impuls des Systems p (z.B. der des Fallgewichts) vor und während des Aufpralls entspricht immer dem Impuls des Stoßpartners p' (z.B. der Boden). Die eingebrachte Energie des Fallgewichts E wird zum Teil in den Boden in Form von Wellenausbreitung übertragen E' , ein anderer Teil geht in plastische Deformation und Wärme über ΔU . Die einzige konservative Größe (Erhaltungsgröße) in einem solchen teilelastischen Prozess ist der Impuls. Baupraktisch wird die Leistungsfähigkeit dieser Technologien allerdings in der Regel durch die potenzielle Energie des in eine bestimmte Höhe gehobenen Fallgewichts beschrieben (kNm). Da die Energie in solch einem Prozess nicht konservativ ist, wirft das die Frage auf, ob die Energie die richtige Größe ist, um die Leistung der Bodenverdichtung solcher Prozesse zu beschreiben.

Poran untersuchte die Wirktiefe dynamischer Bodenverdichtungstechnologien in skalierten Modellversuchen und unterstellt einen Zusammenhang zwischen der normierten potentiellen Energie und der normierten Wirktiefe. (Poran et al. 1992) Lukas wertet Felddaten aus und postuliert einen Zusammenhang zwischen der in (Menard et al. 1975) vorgestellten empirischen Formel zur Abschätzung der Wirktiefe $DI = \alpha\sqrt{WH}$ und der potentiellen Energie des Fallgewichts. (Lukas 1986), (Lukas 1995). Hajjalilue-Bonab bewertet das Verschiebungsfeld eines trockenen Feinsandes mit der PIV/DIC-Methode (Particle Image Velocimetry / Digital Image Correlation). Neben der Wirktiefe wird auch die Tiefe des Kraters untersucht. Die Tiefe des Kraters folgt demnach einem logarithmischen Funktional. Der Zusammenhang zwischen Wirktiefe und Kratertiefe ist linear. Darüber hinaus unterstellt er, dass die Tiefe des Kraters mit zunehmenden Energieeintrag in den Boden zunimmt. Diese These muss jedoch kritisch bewertet werden, da nicht nur die kinetische Energie, sondern auch der Impuls in seiner Studie variiert wurde. (Hajjalilue-Bonab et al. 2009)

Andere Arbeiten beschäftigen sich mit möglichen Indikatoren zur Messung der Bodenverdichtung am Fallgewicht während des Verdichtungsprozesses (Kopf und Paulmichl 2005), (Adam et al. 2011). Andere Feldstudien konzentrieren sich auf die Validierung numerischer Modelle (Kirstein et al. 2016).

Eine experimentelle Studie, die sich auf den Einfluss des Impulses und der kinetischen Energie des Fallgewichts in Bezug auf die Tiefe des Kraters konzentriert, ist noch nicht bekannt. In diesem Artikel werden die Ergebnisse skalierten Laboruntersuchungen mit der PIV/DIC-Methode Erdschwerefeld vorgestellt. Darüber hinaus wird eine begleitende Felduntersuchung zu dieser Frage präsentiert.

2 Methode

2.1 Laborversuche

Der Aufbau der Laborversuche ist in Abbildung 1(a) schematisch dargestellt. Die Bodenprobe (880 x 620 x 400 mm (Länge x Höhe x Tiefe)) wurde aus regionalem trockenem Sand durch einrieseln hergestellt. Die Kornverteilung ist in Abbildung 1(c) dargestellt. Die verwendete Rieselmethode wird in (Trudeep et.al. 2012) näher erläutert. Die Ausgangslagerungsdichte des Probekörpers war für alle Versuche konstant mit $\rho_0 = 1,62 \text{ g/cm}^3$. Eine Scheibe aus PMMA (Acrylglas) angebracht auf einer Seite des Probenträgers ermöglicht es den Boden während der Verdichtung zu beobachten. Die Scheibe hat eine Dicke von 20 mm, um ausreichen Steifigkeit zu gewährleisten. Das halbrunde Fallgewicht fällt geführt, direkt an der Scheibe entlang. Die Masse, der Durchmesser und die Fallhöhe des Fallgewichts können variiert werden.

Die Verformung des Bodens wird optisch erfasst. Dazu zeichnet eine Hochgeschwindigkeitskamera (PCO.dimax HS4) den Einschlag mit 1600 fps (frames per second) auf. Die Kamera wird vor dem Versuch kalibriert, um die intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter zu bestimmen. Aus den Bilddaten wird mit der PIV-/DIC-Methode das Verschiebungsfeld des sichtbaren Probekörpers berechnet. Dazu werden diskrete Bildbereiche durch einen erweiterten Kreuzkorrelationsalgorithmus paarweise miteinander verglichen und so das Vektorfeld der Verschiebung errechnet (Abbildung 1(b)). Zur Datenaufbereitung wird die kommerzielle Software ISTR4D verwendet. Die Methode ist in der Analyse skaliertes Modellversuche für unterschiedlichste geotechnische Fragestellung weit verbreitet und z.B. in (White et al. 2003), (Take 2015) näher beschrieben. Ein uniaxialer Beschleunigungsaufnehmer erfasst das kinematische Verhalten des Fallgewichts vor und während des Aufpralls. Die Beschleunigung wird mit einer Abtastrate von 10 kHz gemessen. Anschließend wird das Signal mit einem Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz gefiltert. Da das Verhalten des Fallgewichts und des Bodens synchron gemessen wird, ist eine Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Fallgewicht und Boden möglich. Die Geschwindigkeit und die Verschiebung werden aus dem ungefilterten Signal mit Hilfe des Sehnentrapezverfahrens numerisch berechnet.

Die in diesem Artikel verwendete Ergebnisgröße der Laboruntersuchung ist die Tiefe des Kraters z_c^i (mm). Die Tiefe des Kraters wird mit der beschriebenen PIV/DIC-Methode gemessen und mit der aus dem Beschleunigungssignal berechneten Verschiebung des Fallgewichts validiert.

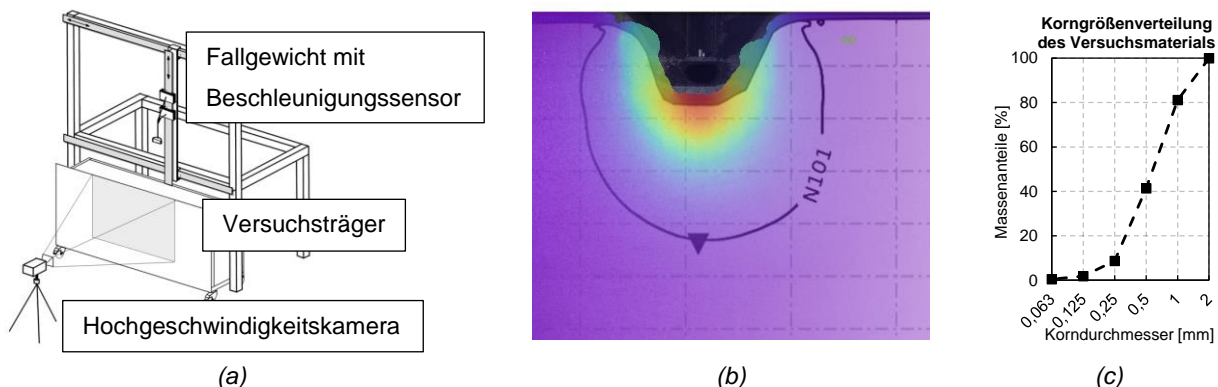


Abbildung 1: schematischer Aufbau des Laborversuchs (a). Beispielhaftes Verschiebungsfeld, errechnet mit der PIV-/DIC-Methode (b). Kornverteilung des verwendeten regionalen Sandes (c)

2.2 Feldversuche

Das Testfeld und der verwendete Seilbagger sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Testfeld wurde aus weitgestuftem Kies mit einem Wassergehalt von 5% und einer Mächtigkeit von 4m lagenweise aufgeschüttet. Die unterliegende Schicht war vorverdichteter Löss mit einer Mächtigkeit von mehr als 6m. Die erforderliche Höhe des Prüfkörpers wurde vorab mit einer numerischen Simulation abgeschätzt, um sicherzustellen, dass der Einfluss der Lössschicht vernachlässigbar gering ist. Das Material wurde speziell für diese Untersuchung möglichst locker aufgeschüttet. Während des Erdbaus wurden in jeder Schicht die Dichte und der Wassergehalt des Bodens gemessen. Die mittlere anfängliche Trockendichte des vorbereiteten Testgeländes betrug $\rho_0 = 1,58 \text{ g/cm}^3$.

Zwei triaxiale Beschleunigungsaufnehmer, wurden am Fallgewicht befestigt. Ebenso wie im Laborversuch wurde das Signal des Beschleunigungsaufnehmers mit 10kHz erfasst und mit einem Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 100Hz gefiltert. Die Aufprallgeschwindigkeit wurde aus den Signalen der Beschleunigungsaufnehmer mit dem Sehnentrapezverfahren berechnet. Wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, wurde die Fallhöhe nach jedem Schlag angepasst, um sicherzustellen, dass der Impuls und die kinetische Energie für jeden Einschlag konstant sind. Die Tiefe des Kraters z_c^i wurde nach dem sechsten und zwölften Einschlag mit einem Präzisionsnivelement gemessen

Für die Untersuchung wurden zwei rechteckige Fallgewichte aus Beton mit einer Masse von 3.800 kg und 7.100 kg verwendet. Die Kantenlänge beider Fallgewichte betrug jeweils 1,5 m. Somit konnten vier Konfigurationen, dargestellt in Abschnitt 2.3.2 untersucht werden.



K5 & K1 post compaction

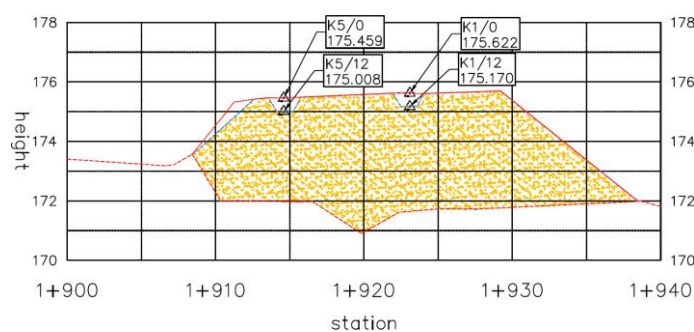


Abbildung 2: oben Testfeld mit Seilbagger und Fallgewicht. Unten: Längsschnitt durch das Testgelände

2.3 Randbedingungen der durchgeführten Experimente

2.3.1 Einfluss der Fallhöhe auf die Kratertiefe

Das Experiment soll untersuchen, welchen Einfluss die Fallmasse oder die Fallhöhe bei konstantem Impuls und konstanter kinetischer Energie auf die Tiefe des Kraters hat. Allerdings ist die getrennte Untersuchung der Masse und der Fallhöhe ist nicht ohne weiteres möglich, da nach den Gleichungen (3) und (4) beide Teil des Impulses p (Ns) und der kinetischen Energie E (J) sind.

$$p = m v \tag{3}$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2 m} \tag{4}$$

Die Fallhöhe kann jedoch durch aufbringen einer künstlichen Beschleunigung am Fallgewichts reduziert werden. Im Versuch wird die Beschleunigung durch eine vorgespannte Feder aufgebracht, die die Geschwindigkeit des Fallgewichts vor dem Einschlag erhöht. Um Trägheitseffekte des Fallgewichts während des Einschlags auszuschließen, muss die künstlich aufgebrachte Beschleunigung kurz vor dem Einschlag entfernt werden.

Die untersuchten Konfigurationen, sind in Tabelle 1 dargestellt. Der zugehörige Geschwindigkeitsverlauf ist in Abbildung 3 dargestellt. In der Tabelle entspricht m (kg) der Masse des Fallgewichts, h (m) dessen Fallhöhe und v (m/s) der Aufprallgeschwindigkeit.

Mit dieser Methode ist es möglich, die Fallhöhe losgelöst bei sonst konstantem Impuls und kinetischer Energie zu variieren. Die Aufprallgeschwindigkeit ist trotz der geringeren Fallhöhe konstant. Damit ist es möglich, einen technischen Parameter mit ansonsten konstanten kinematischen Randbedingungen zu untersuchen.

Tabelle 1 Konfigurationen aus Masse und Fallhöhe zur Untersuchung des Einflusses eines technischen Parameters auf die Kratertiefe

m (kg)	h (m)	v (m/s)	P (Ns)	E (J)
4,80	0,50	3,23	15,50	25,03
4,96	0,30	3,13	15,50	24,30
4,96	0,00	3,13	15,50	24,30

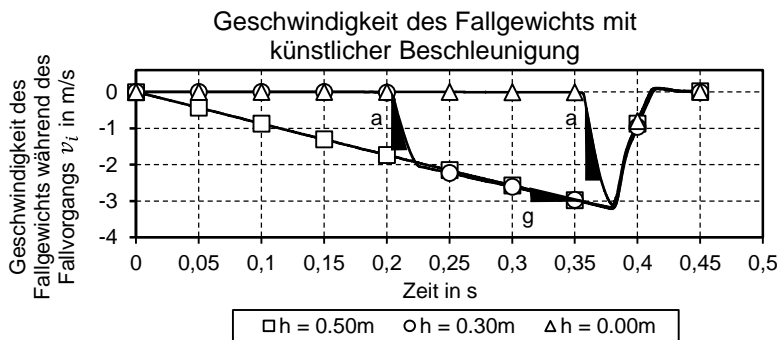


Abbildung 3 Geschwindigkeitsverlauf der unterschiedlichen Konfigurationen entsprechend Tabelle 1 vor dem Einschlag

2.3.2 Einfluss des Impulses und der kinetischen Energie auf die Kratertiefe

Nachdem mit den Versuchen, vorgestellt im Abschnitt 2.3.1 die technologischen Randbedingungen geprüft wurden, wird mit dieser Studie der Einfluss des Impulses und der kinetischen Energie losgelöst voneinander mit einer Labor- und Feldstudie untersucht.

Die entsprechenden Konfigurationen aus Fallhöhe und Masse des Fallgewichts sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Aufprallgeschwindigkeit wurde unter Verwendung der Methode, dargestellt im Abschnitt 2.1 berechnet. Aufgrund von Reibungseinflüssen und anderen Verlustmechanismen (entweder an der Führung im Labor oder am Seil im Feld) ist die gemessene Aufprallgeschwindigkeit geringer als diejenige, die sich aus der potentiellen Energie ergeben würde. In Tabelle 2 ist der Parameter (Impuls oder Energie), der konstant gehalten wird, fett markiert. Die geometrischen Randbedingungen (Durchmesser bzw. Kantenlänge) waren konstant. Somit wird nur der Einfluss des Impulses und der kinetischen Energie des Fallgewichts auf die Kratertiefe untersucht.

Tabelle 2 Konfigurationen aus Masse und Fallhöhe zur Untersuchung des Einflusses von kinetischer Energie und Impuls auf die Kratertiefe

Laborversuch					Feldversuch				
m (kg)	h (m)	v (m/s)	p (Ns)	E (J)	m (t)	h (m)	v (m/s)	p (kNs)	E (kJ)
7,09	0,85	3,60	26,15	48,22	3,80	3,80	5,33	20,27	54,00
4,96	1,20	4,40	21,87	48,21	7,10	3,00	3,75	26,63	49,92
7,09	1,00	3,77	26,73	50,38	7,10	3,80	4,47	31,74	70,95
6,12	1,35	4,38	26,81	58,70	3,80	9,50	8,09	30,72	124,20
4,96	2,00	5,40	26,78	72,32					

3 Ergebnisse

3.1 Einfluss der Fallhöhe auf die Kratertiefe

Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Fallhöhe bei konstanten kinematischen Randbedingungen, entsprechend Tabelle 1 sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Tiefe des Kraters z_c^i wurde gemäß den Empfehlungen aus (Poran 1992) auf den Durchmesser des Fallgewichts bezogen, um Skalierungseffekte zu reduzieren. Obwohl die Fallhöhe um 0,5m variiert, ändert sich die Tiefe des Kraters nicht wesentlich. Die Streuung der Ergebnisse liegt mit $\pm 1,75\%$ im Bereich des Messfehlers des Verfahrens (Knut et al. 2017).

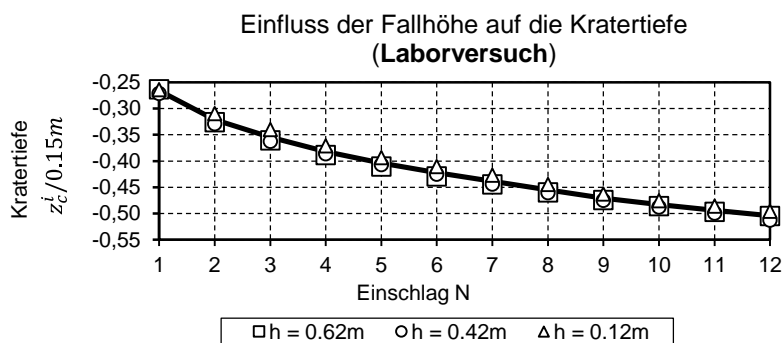


Abbildung 4 Entwicklung der bezogenen Kratertiefe bei unterschiedlicher Fallhöhen und sonst konstanten Randbedingungen entsprechend Tabelle 1

3.2 Einfluss des Impulses und der kinetischen Energie

Die Ergebnisse der Laborversuche und der Feldversuche gemäß Tabelle 2 sind in Abbildung 5 dargestellt. Als Ergebnisgröße wurde die bezogene Änderung der Tiefe des Kraters nach 12 Einschlägen entsprechend Gleichung (5) gewählt. Dabei ist rz_c^i (%) die relative Änderung der Tiefe des Kraters z_c^i (m) bezogen auf den kleinsten Krater der Konfiguration z_c^{min} (m). Die Normierung wurde durchgeführt, um den qualitativen Einfluss von Impuls und Energie zu diskutieren und nicht die absolute Tiefe des Kraters.

$$rz_c^i = \frac{z_c^i}{z_c^{min}} \tag{5}$$

Die Diagramme zeigen die Kurven für ein konstantes Energie- bzw. Impulsniveau. Die durchgezogenen Linien zeigen den Einfluss des Impulses auf die relative Tiefe des Kraters bei einer konstanten kinetischen Energie. Die gestrichelten Linien zeigen den Einfluss der kinetischen Energie auf die relative Tiefe des Kraters bei konstantem Impuls.

Sowohl im Labor als auch im Feld kann beobachtet werden, dass die Tiefe des Kraters mit zunehmendem Impuls zunimmt. Im Labor ändert sich die Kratertiefe um 25% bei einer Steigerung des Impulses um 4,3 Ns. In der Felduntersuchung wurde eine 65% größere Kratertiefe, bei einer Erhöhung des Impulses um 6,35 kNs gemessen.

Wird der Impuls konstant gehalten und die kinetische Energie erhöht wird, ist das Ergebnis umgekehrt. Im Labor erhöht sich die Kratertiefe um 3% trotz einer Steigerung der kinetischen Energie um 21,86. Dieses Ergebnis liegt im Bereich des Messfehlers der Methode (Knut et.al. 2017).

Im Feld wird eine scheinbare Erhöhung der Kratertiefe trotz Reduktion der kinetischen Energie beobachtet. Eine Reduktion um 53,25 kJ führt zu einer Erhöhung der Kratertiefe um 14 %. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, war der Impuls der Konfigurationen jedoch nicht exakt gleich. Die entsprechende Konfiguration hatte einen 1,02 kNs größeren Impuls als die Vergleichskonfiguration. Aufgrund der hohen Sensitivität des Impulses auf die Kratertiefe wird angenommen, dass der tiefere Krater durch diese Abweichung begründet ist.

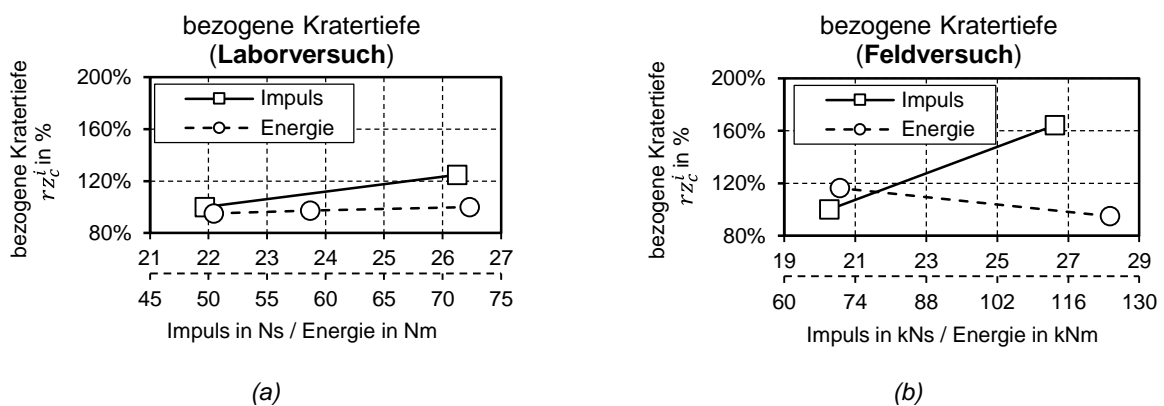


Abbildung 5: bezogene Kratertiefe im Labor- und Feldversuch (a – b). Die durchgehende Linie zeigt den Einfluss des Impulses bei konstanter kinetischer Energie, die gestrichelte Linie zeigt den Einfluss der Energie bei konstantem Impuls

4 Diskussion

4.1 Einfluss der Fallhöhe auf die Kratertiefe

Die experimentelle Studie zum Einfluss der Fallhöhe auf die Tiefe des Kraters zeigt zwei Ergebnisse. Zum einen ist offensichtlich, dass die Fallhöhe keinen Einfluss auf die Tiefe des Kraters hat, solange der Impuls und die kinetische Energie verschiedener Konfigurationen gleich sind. Dies führt zu der zweiten Schlussfolgerung: alle Maßnahmen zur Erreichung eines bestimmten Energie- oder Impulsniveaus vor dem Einschlag führen zur gleichen Kratertiefe nach dem Einschlag. Das bedeutet, dass weder die Fallhöhe noch die Masse des Fallgewichts geeignete Beschreibungsgrößen für die Effizienz der dynamischen Verdichtung sind, da sowohl der Impuls als auch die kinetische Energie davon abhängig sind. Im folgenden Abschnitt wird diskutiert, ob der Impuls oder die kinetische Energie einen größeren Einfluss auf die Tiefe des Kraters hat.

4.2 Einfluss des Impulses und der kinetischen Energie

Sowohl im Labor als auch in einer Felduntersuchung konnte gezeigt werden, dass die Tiefe des Kraters stark vom Impuls abhängt. Die These, dass die Effizienz der dynamischen Verdichtung in Bezug auf den Impuls beschrieben werden sollte (da dies eine konservative Systemgröße bei Stoßprozessen ist), wird durch die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Ergebnisse unterstützt. Eine Variation der kinetischen Energie mit konstantem Impuls zeigt keine signifikante Erhöhung der Tiefe des Kraters, weder im Labor noch im Feld.

Die Annahme, dass die Tiefe des Kraters durch die kinetische Energie beeinflusst wird (Hajjalilue-Bonab et al. 2009), konnte nicht bestätigt werden. Da der Impuls in der vorgestellten Studie (Hajjalilue-Bonab et al. 2009) nicht konstant war, wird auf Basis der vorgestellten Ergebnisse angenommen, dass nicht die Energie, sondern der Impuls die Zunahme der Tiefe des Kraters verursacht. Diese Annahme soll folgend durch die Vorstellung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Kratertiefe und Impuls weiter untermauert werden.

Es ist möglich die bezogene Kratertiefe aller Labor- bzw. Feldversuchsvarianten der Tabelle 1 und 2 durch einen Polynomansatz mit der Randbedingung $rz_c^i(p=0) = 0$ zu approximieren. Der Ansatz ist in Gleichung (6) dargestellt.

$$rz_c^i(p) = m p^n \quad (6)$$

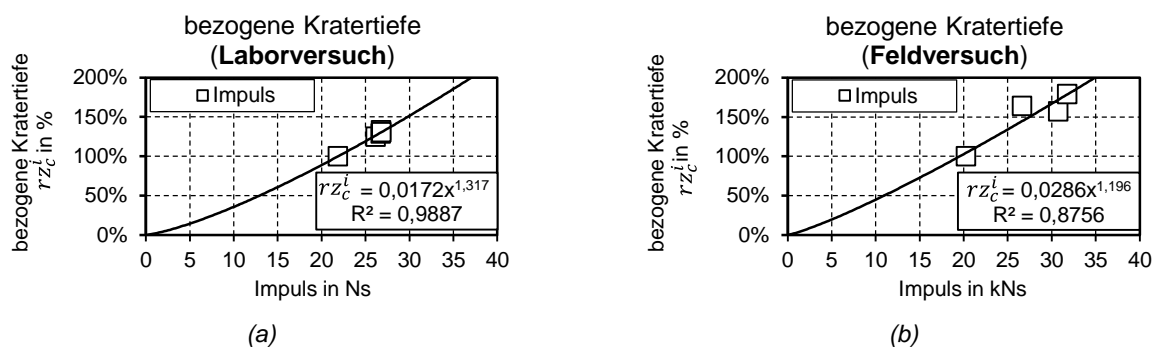


Abbildung 6: Approximation der bezogenen Kratertiefen mit dem Ansatz aus Gleichung (6) gezeigt für Labor (a) und Felddaten (b) mit unterschiedlichen kinetischen Energien beim Einschlag.

Das Ergebnis der Approximation ist in Abbildung 6 dargestellt. Der Bestimmtheitsmaßstab für den funktionalen Ansatz, sowohl für die Laboruntersuchung als auch für die Felduntersuchung ist hoch. Ungeachtet der Tatsache, dass die Stützstellen teilweise signifikant unterschiedliche Energieniveaus aufweisen kann die Tiefe des Kraters mit der einfachen Polynomfunktion in Abhängigkeit vom Impuls abgeschätzt werden. Dies untermauert die Annahme, dass die Tiefe des Kraters empfindlicher auf den Impuls reagiert als auf die kinetische Energie des Fallgewichts.

4.3 Praxisbezug

An einem praktischen Beispiel soll die Relevanz des Beitrags beleuchtet werden. Ein schweres Fallgewicht mit einer Masse $m_0 = 10 t$ wird aus einer Höhe $h_0 = 20,4 m$ fallen gelassen. Der Energiebedarf zum Anheben des Fallgewichts beträgt ca. 2000 kJ. Der Impuls beim Aufprall des Fallgewichts beträgt ohne Reibungsverluste 200 kNs. Gemäß der Annahme, dass die Tiefe des Kraters durch den Impuls bestimmt wird, müssen andere Fallgewichte mit der Masse m die gleiche Tiefe des Kraters erreichen, wenn sie auf die Höhe h entsprechend Gleichung (7) gehoben werden.

$$h = \left(\frac{m_0}{m}\right)^2 h_0 \quad (7)$$

Um die gleiche Tiefe des Kraters zu erreichen, muss ein Fallgewicht mit einer Masse $m = 20 t$ nur auf eine Höhe von $h = 5,1 m$ angehoben werden. Der energetische Aufwand für das Anheben des Fallgewichts reduziert sich auf 1000 kJ. Die Tatsache, dass das schwere Fallgewicht um 15 m weniger angehoben werden muss, erhöht den Wirkungsgrad noch weiter.

5 Fazit

Der Beitrag untersucht den Einfluss der Erhaltungsgrößen Impuls und kinetische Energie auf die Kratertiefe einer dynamischen Intensivverdichtung. Folgende Erkenntnisse konnten aus den experimentellen Studien abgeleitet werden:

- Alle Maßnahmen zur Erreichung eines bestimmten Energie- und Impulsniveaus führen, unabhängig von der Fallmasse und der Fallhöhe zur gleichen Kratertiefe auf granularem trockenem Material.
- Mit einem einfachen Polynom-Ansatz konnte gezeigt werden, dass die Kratertiefe auf granularem trockenem Material maßgeblich vom Impuls abhängig ist.

Auf Basis dieser Erkenntnisse lässt sich folgendes Fazit ziehen: Die Energie ist ein geeigneter Parameter, um den mechanischen Prozess des Anhebens des Fallgewichts zu beschreiben und ermöglicht so eine Abschätzung der mechanischen Auslastung des Seilbaggers (z.B. Kraftstoffverbrauch, Hubzeit). Sobald das Fallgewicht jedoch den Boden berührt, ist der Impuls, als konservative Größe eines Stoßprozesses, die bessere Beschreibungsgröße.

Nachfolgend müssen weitere Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Tiefe des Kraters und der Wirtiefe durchgeführt werden. Ferner sollte die hier vorgestellte Theorie durch weitere Felduntersuchungen untermauert werden.

6 Danksagung

Die in der Arbeit berichtete Forschung wurde vom BMWi (MF150157) und von den Autoren durch das vom ESF finanzierte Promotionsstudium gefördert.

7 Literatur

- Adam, D., Paulmichl, I., Kopf, F., Erdmann, P. 2011. Integrierte Verdichtungskontrollen bei dynamischen Verdichtungsverfahren. *Baugrundverbesserung in der Geotechnik* (Eds. Adam D., Herrmann R. A.). 135–159 Eigenverl. des Inst. für Geotechnik, Siegen.
- Hajjalilue-Bonab, M., Rezai, A.H. 2009. Physical Modelling of Low-Energy Dynamic Compaction. *Journal of Physical Modelling in Geotechnics* **3**: 21–32.
- Kirstein, J., Grabe, J., Chmelnizkij, A. 2016. Numerische Berechnung und messtechnische Begleitung zur Dynamischen Intensivverdichtung. *34. Baugrundtagung*, 297–394.
- Knut, A., Pankrath H., Ocaña Atencio R. E., Thiele, R. 2017. Modellversuche zur Ein-grenzung von Verdichtungsindikatoren bei impulsartig wirkenden Bodenverdichtungstechnologien. *11. Österreichische Geotechnik-tagung: Baugrund Risiko & Chance* (Eds. ÖIAV). 251–260
- Kopf, F. Paulmichl, I. 2005. Die dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) - Verdichtungskontrolle mittels dynamischer Messungen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ)* **150**, 149–159.
- Lukas, R. G. 1986 Dynamic Compaction for Highway Construction: Volume 1: Design & Construction Guidelines. FHWA Report, FHWA/RD-86/133
- Lukas, R. G. 1995. Geotechnical Engineering Circular No. 1: Dynamic Compaction. FHWA Report, FHWA-SA-95-037
- Ménard L., Broise, Y. 1975. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation. *Géotechnique* **25**, 3–18
- Poran, C. J., Heh, K-S., Rodriguez, J.A. 1992. Impact Behaviour of Sand. *Soils and Foundations* **32**, 81–92.
- Take, W. A. 2015. Thirty-Sixth Canadian Geotechnical Colloquium: Advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation. *Canadian Geotechnical Journal* **52**, 1199–1220.
- Trudeep, N. D., Dasaka, S. M. 2012. Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens. *Geomechanics and Engineering* **4**, 79–90.
- White, D. J., Take, W. A., Bolton, M.D. 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique* **53**, 619–631.