

# GRUPPE GEOTECHNIK GRAZ



Herausgeber: M.Dietzel, S.Kieffer, W.Schubert, H.F.Schweiger, S.Semprich

---

Heft 38

**Beiträge zum 25. Christian Veder Kolloquium**

**25 JAHRE FORTSCHRITT  
IN DER GEOTECHNIK**

Neue Entwicklungen in Gerätetechnik,  
Ausführung und Berechnung

Redaktionelle Bearbeitung:  
Institut für Bodenmechanik und Grundbau

GRAZ, 08. und 09. April 2010

---

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ 2010

# **Der Impulsverdichter zur mitteltiefen Verdichtung und Verbesserung von Böden - Innovative Gerätetechnik, numerische und experimentelle Untersuchungen, Anwendung**

**F.-J. Falkner<sup>1)</sup>, C. Adam<sup>1)</sup>,**

**I. Paulmichl<sup>2)</sup>, D. Adam<sup>2)</sup>, J. Fürpaß<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup> Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

<sup>2)</sup> Geotechnik Adam ZT GmbH, Brunn am Gebirge

<sup>3)</sup> TERRA-MIX Bodenstabilisierung GmbH, Wettmannstätten

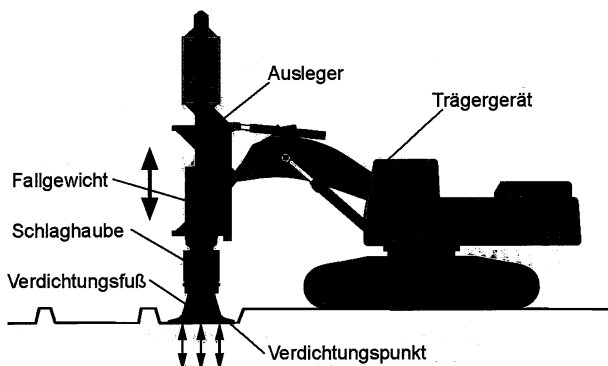
## **1 Einleitung**

Das innovative Gerät des Impulsverdichters dient zur Verdichtung und Verbesserung von Böden, die keine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen oder bei Belastung unzulässig große Setzungen erfahren. Dieses Gerät schließt die Lücke zwischen den Oberflächenverdichtungsverfahren und den Tiefenverdichtungsverfahren zur mitteltiefen Verdichtung von Böden. Im Rahmen eines von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten Forschungsprojektes wird die Verdichtungswirkung des Impulsverdichters grundlegend theoretisch und experimentell untersucht.

Der Impulsverdichter ist ein dynamisches Verdichtungsgerät, das die Technologie des hydraulischen Schlaghammers ausnutzt und zur Verbesserung der Untergrundeigenschaften mittels kontrollierter Schläge eingesetzt wird. Beim Impulsverdichter wird die Verdichtungsenergie bzw. -leistung durch die große Schlagfrequenz eines leichteren Fallgewichtes von einer relativ geringen Höhe auf eine Verdichtungsplatte erzeugt. Die Platte verbleibt dabei in ständigem Kontakt mit dem Untergrund, weshalb eine sichere und effiziente Energieeintragung möglich ist. Im Wesentlichen besteht der Impulsverdichter aus dem patentierten Verdichtungsfuß, der Schlaghaube und dem hydraulischen „Hammer“ mit dem Fallgewicht. Der Verdichtungsfuß ist eine Lastplatte aus Stahl mit einem Durchmesser von 1,5 m. Dieser ist mit der Schlaghaube lose verbunden, damit nur stoßartige Druckkräfte auf die Verdichtungsplatte übertragen werden. Verdichtungsfuß, Schlaghaube und Fallgewicht („Hammer“) werden auf den Ausleger eines 40 bis 48 t Trägergerätes montiert (Abb. 1).

Die derzeit verfügbaren Gerätetypen mit einer Fallmasse von 5, 7, 9 und 12 t ermöglichen bei einer maximalen Fallhöhe von 1,2 m das Einbringen von Verdichtungsenergien von 60 bis 144 kNm, sodass bei einer Schlagfrequenz von 40 bis 60 Schläge/min eine Verdichtungsleistung von 2,4 bis 8,6 MNm/min erzielbar ist (Adam & Paulmichl 2007).

Durch die Datenaufzeichnung während des Verdichtungsprozesses und der Online-Anzeige in der Fahrerkabine sind eine Steuerung der Verdichtung, ein ökonomischer Geräteeinsatz und eine arbeitsintegrierte Qualitätskontrolle möglich. Das Abbruchkriterium ist durch die Schlagzahl bzw. die Einsenkung der Platte definiert.



**Abb. 1:** Systemaufbau des Impulsverdichters

Mit dem Impulsverdichter ist eine mitteltiefe Verdichtung von 4 bis 7 m in effektiver und wirtschaftlicher Weise erzielbar. Der Vergleich mit anderen dynamischen Verdichtungsmethoden hinsichtlich Tiefenwirkung zeigt, dass der Impulsverdichter damit die Nische zwischen oberflächennaher Verdichtung (statische und dynamische Walzen) und Tiefenverdichtung (Rütteldruck- bzw. Rüttelstopfverdichtung, Dynamische Intensivverdichtung) in effizienter und wirtschaftlicher Weise ausfüllt.

Mit diesem Gerät können Kiese, Sande, Schluffe, industrielle Nebenprodukte, Abraummaterial aus dem Bergbau und Müll auf Deponien gleichermaßen erfolgreich verdichtet werden. Zu den Einsatzgebieten zählen die Erhöhung der Fundamenttragfähigkeit, die Verbesserung der Bettungsbedingungen für Bodenplatten, die Reduzierung des Verflüssigungsvermögens und die Stabilisierung von Abfallprodukten.

## 2 Theoretische Untersuchungen

### 2.1 Mechanische Modellbildung

Für die numerische Simulation des Verdichtungsvorganges wird das Gesamtsystem aus dem Impulsverdichter und dem Untergrund in zwei Teilsysteme unterteilt. Ein Teilsystem besteht aus der Fallmasse, welche während des Verdichtungsvorganges über die Schlaghaube auf den Verdichtungsfuß fällt und anschließend hydraulisch wieder auf die ursprüngliche Fallhöhe gehoben wird. Das zweite Teilsystem umfasst den zu verdichtenden Boden und den darauf stehenden Verdichtungsfuß mit Schlaghaube, auf den die Fallmasse auftrifft.

Die Fallmasse wird als Punktmasse  $m_G$  modelliert, die aus der Fallhöhe auf den Verdichtungsfuß fällt. Die Geschwindigkeit der Fallmasse  $m_G$  in der Fallhöhe ist Null. Wird mit  $h_0$  die Fallhöhe bezeichnet, berechnet sich die Auftreffgeschwindigkeit  $v$  bei Vernachlässigung aller Reibungsverluste gemäß der Beziehung

$$v_G = \sqrt{2gh_0} \quad (1)$$

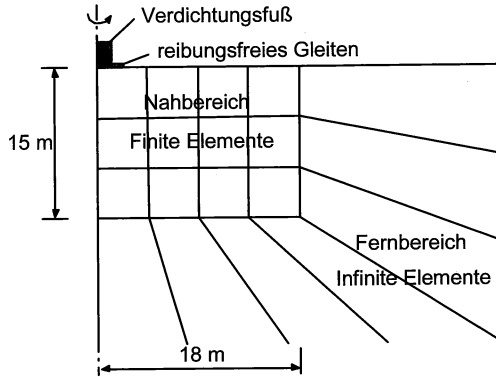
Die Auftreffgeschwindigkeit hängt damit nur von der Fallhöhe  $h_0$  und der Fallbeschleunigung  $g$  ( $= 9,81 \text{ m/s}^2$ ) ab. Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen beruhen auf einer Fallhöhe von  $h_0 = 1,2 \text{ m}$  und einer Fallgewichtmasse von  $m_G = 9.000 \text{ kg}$ . Die Geschwindigkeit des Verdichtungsfußes  $v_F$  unmittelbar nach dem Auftreffen wird gemäß der Theorie des vollkommen elastischen Stoßes (Ziegler, 1998) berechnet,

$$v_F = \frac{2m_G v_G}{m_G + m_F} \quad (2)$$

$m_F$  ist dabei die Masse des Verdichtungsfußes, die mit  $m_F = 4.000 \text{ kg}$  angesetzt wird.

Das mechanische Verhalten des zu verdichtenden Untergrundes wird dreidimensional mit Hilfe der Kontinuumsmechanik modelliert. Die Darstellung des Untergrundes als linear-elastischer isotroper Halbraum ist die einfachste Möglichkeit der Modellierung, die jedoch nur für Vergleichszwecke mit analytischen Lösungen brauchbar ist. Bei den vorliegenden Untersuchungen wird inelastisches Materialverhalten gemäß ratenunabhängiger Plastizitätstheorie berücksichtigt. Dadurch kann der Verdichtungsvorgang näherungsweise simuliert werden. Dem Verdichtungsfuß mit kreisförmiger Aufstandsfläche (Durchmesser 1,5 m) werden die Kennwerte von linear elastischem Stahl zugeordnet. Zwischen dem Fuß und dem Boden wird in Horizontalrichtung reibungsfreies Gleiten zugelassen. Bei der Diskretisierung für die numerischen Berechnungen wird die Rotationssymmetrie

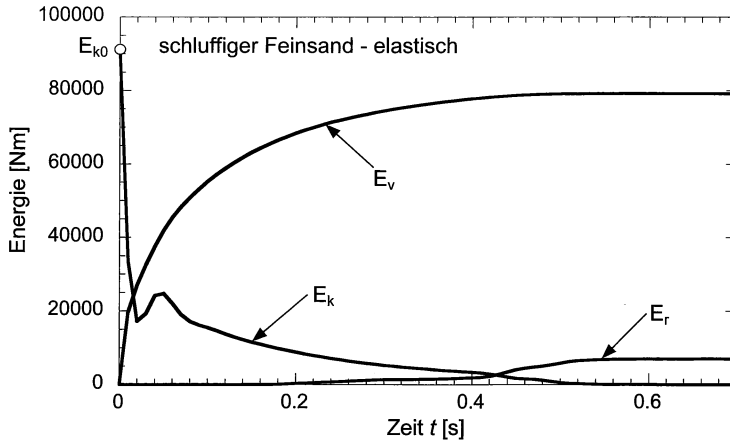
des dynamischen Interaktionssystems ausgenutzt. Das zweidimensionale rotationssymmetrische Modell wird bei der Diskretisierung in einen Nah- und Fernbereich unterteilt. Im Nahbereich und für den Verdichtungsfuß kommen Finite Elemente zur Anwendung. Um im Übergangsbereich zwischen Nah- und Fernbereich Wellenreflexionen zu vermeiden und eine ungehinderte Energieausbreitung im Halbraum zu ermöglichen, wird der Fernbereich mit Infiniten Elementen diskretisiert. In Abb. 2 ist das numerische Modell schematisch dargestellt.



**Abb. 2:** Numerisches Rechenmodell für den Untergrund und den Verdichtungsfuß

Für die genaue Erfassung der großen Spannungsgradienten während des Verdichtungsvorganges ist eine feine Diskretisierung erforderlich. Das Rechenmodell setzt sich daher aus 31.078 Elementen zusammen. Die Anzahl der Freiheitsgrade beläuft sich auf 186.578. Es wird angemerkt, dass die verwendeten Finiten und Infiniten Elemente einen quadratischen Verschiebungsansatz besitzen.

Die Verdichtungswirkung wurde an einem Boden aus schluffigem Feinsand simuliert. Die zugehörigen Bodenkennwerte wurden wie folgt angesetzt: Elastizitätsmodul  $E = 10 \text{ MN/m}^2$ , Querdehnzahl  $\nu = 0,30$ , Dichte  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ , Kohäsion  $c = 5 \text{ N/m}^2$ , Reibungswinkel  $\phi = 26^\circ$ , Dilatanz  $\psi = 8^\circ$ . Die Parameter  $c$ ,  $\phi$ ,  $\psi$  werden für die inelastische Modellierung des Bodens nach dem *Mohr-Coulomb*'schen Versagenskriterium (Mang & Hofstetter 2008) benötigt. Die materielle viskose Dämpfung des Untergrundes wurde gemäß *Rayleigh* (Chopra 2006) mit 5 % bei der Grundfrequenz und bei 70 Hz angesetzt.



**Abb. 3:** Zeitverlauf der kinetischen Energie  $E_k$ , der durch viskose Dämpfung dissipierten Energie  $E_v$ , und der am Rand absorbierten Energie  $E_r$ ; elastischer Boden

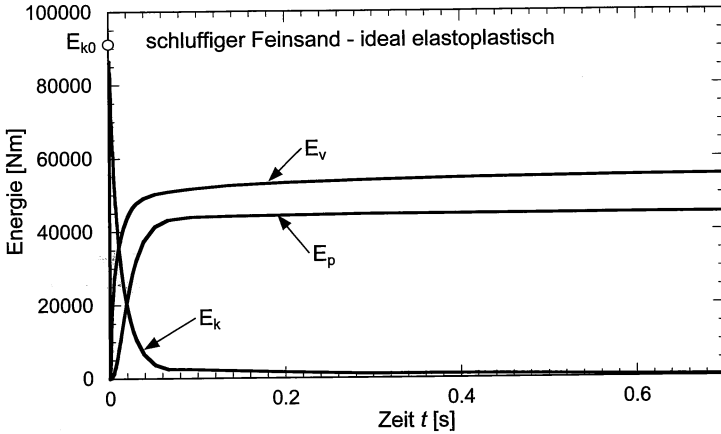
## 2.2 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden charakteristische Ergebnisse aus den numerischen Simulationen vorgestellt. Im Speziellen wird die durch die Verdichtungsstöße induzierten Geschwindigkeiten, die Verdichtungswirkung, welche über die Ausdehnung der plastischen Zonen beurteilt wird, und der Energieeintrag in den Boden diskutiert.

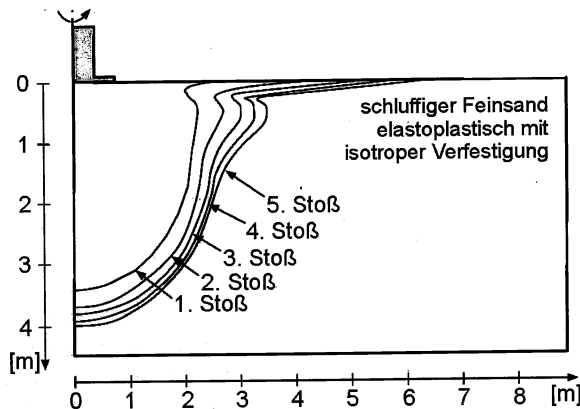
### 2.2.1 Verdichtungswirkung

Die globalen dynamischen Vorgänge im Untergrund nach einem Verdichtungsstoß sind aus den zeitlichen Verläufen der einzelnen Anteile der Energie des Nahbereiches im Teilsystem „Boden-Fuß“ ersichtlich. Abb. 3 zeigt für einen elastischen Boden (schluffiger Feinsand) nach dem ersten Stoß den Verlauf der kinetischen Energie  $E_k$ , die Energieabstrahlung  $E_r$  über den Rand hinaus in den Fernbereich, und die durch viskose Dämpfung dissipierte Energie  $E_v$ . Zum Stoßzeitpunkt  $t = 0$  entspricht die Gesamtenergie der kinetischen Energie  $E_{k0}$  des Verdichtungsfußes mit der Geschwindigkeit  $v_F$  unmittelbar nach dem elastischen Stoß. Die kinetische Energie  $E_k$  klingt durch die geometrische und materielle Dämpfung rasch ab. Die durch viskose Dämpfung dissipierte Energie bleibt nach ca. 0,4 s beinahe konstant. Nach ca. 0,2 s treffen die ersten Wellen (Primärwel-

len) auf den Rand des Nahbereiches. Ab diesem Zeitpunkt wird durch die unendlichen Elemente Energie absorbiert, was eine Zunahme von  $E_r$  bewirkt. Die energiereicheren Scher- und Rayleigh-Wellen (Studer et al. 2007) treffen zum Zeitpunkt  $t = 0,4$  s auf den Rand. Man erkennt dies durch einen unmittelbar größeren Gradienten beim Verlauf von  $E_r$ . Zum Zeitpunkt  $t = 0,55$  s ist das System in Ruhe ( $E_k = 0$ ) und  $E_v$  und  $E_r$  konstant. Die Summe aus  $E_v$  und  $E_r$  am Beobachtungsende ergibt  $E_{k0}$ .



**Abb. 4:** Zeitverlauf der kinetischen Energie  $E_k$ , der durch viskose Dämpfung dissipierten Energie  $E_v$  und der durch plastische Deformationen dissipierten Energie  $E_p$ ; elastoplastischer Boden



**Abb. 5:** Ausbreitung der äquivalenten plastischen Verzerrungen im Untergrund. Fünf aufeinander folgende Verdichtungsstöße.

Die kinetische Energie  $E_k$  und die durch viskose Dämpfung und plastische Deformationen dissipierte Energie  $E_v$  und  $E_p$  eines elastoplastischen Bodens sind in Abb. 4 dargestellt. Im Gegensatz zum rein elastischen Boden nimmt die kinetische Energie mit der Zeit kontinuierlich ab.  $E_p$  und  $E_v$  sind von ähnlicher Größenordnung. Die zusätzliche Energiedissipation zufolge plastischer Deformationen ist so groß, dass die Wellen kaum noch Energie an den Rand transportieren.  $E_p$  ist damit vernachlässigbar klein. Die durch plastische Deformationen dissipierte Energie  $E_p$  steht in Relation zur Verdichtungsarbeit. Gemäß dieser Abbildung wird damit weniger als die Hälfte der eingebrachten Energie in Verdichtungsarbeit umgewandelt. Den Rest dissipiert die für den Verdichtungsprozess bedeutungslose materielle Dämpfung.

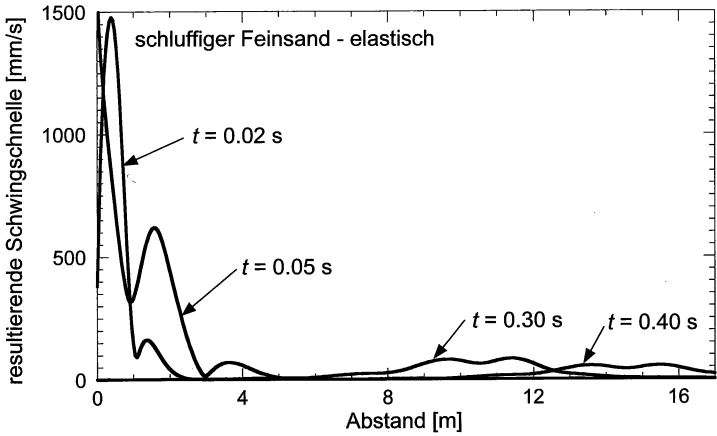
Anschließend wird die Tiefenwirkung des Impulsverdichters diskutiert. Als Maß werden dafür die äquivalenten plastischen Verzerrungen (die aber tatsächlich eine dimensionslose Arbeit der Spannungen entlang der plastischen Verzerrungen darstellt, ABAQUS 2004) herangezogen. Der gewählte Grenzwert der äquivalenten plastischen Verzerrungen zwischen verdichtetem und nichtverdichtetem Boden beträgt 0,02. Nach jedem Verdichtungsstoß ändern sich im Verdichtungsbereich die Bodeneigenschaften. Mit Hilfe isotroper Verfestigung kann dieses Verhalten näherungsweise berücksichtigt werden. Abb. 5 zeigt die Ausbreitung des Verdichtungsbereiches durch aufeinander folgende Stöße. Mit diesem Ergebnis kann eine Tiefenwirkung des Impulsverdichters in homogenen Böden aus schluffigem Feinsand von mindestens 4 m bestätigt werden.

## 2.2.2 Erschütterungsausbreitung im Untergrund

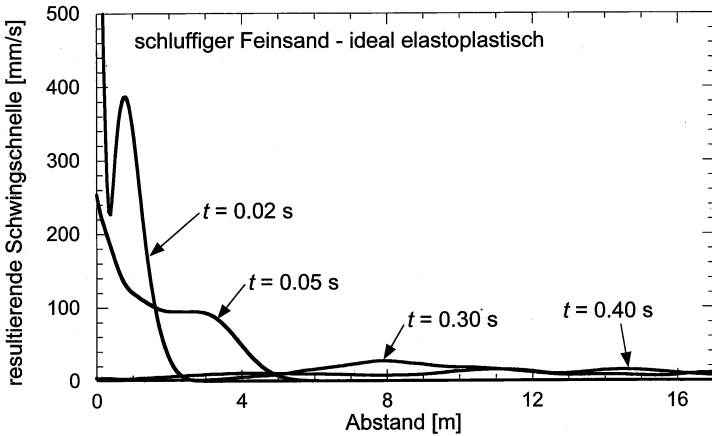
Für die Beurteilung der Erschütterungswirkung an angrenzenden Objekten ist die Kenntnis der maximalen resultierenden Schwingschnelle  $v_{R,max}$  in Abhängigkeit vom Abstand zum Verdichtungsgerät von essentieller Bedeutung. Zuerst wird ein rein elastischer Boden mit den Kennwerten eines schluffigen Feinsandes betrachtet. Abb. 6 zeigt zu diskreten Zeitpunkten nach Aufbringen eines Verdichtungsstoßes den Verlauf der resultierenden Schwingschnelle an der Oberfläche. Unmittelbar nach dem Stoß zum Zeitpunkt  $t = 0,02$  s tritt das Maximum der Schwingschnelle im Abstand von ca. 0,5 m vom Fußrand auf und beträgt ca. 1450 mm/s. Ein weiteres lokales Maximum von 150 mm/s tritt im Abstand von 1,30 m auf. Durch die Wellenausbreitung verschieben sich mit zunehmendem Zeitabstand diese Maxima immer weiter weg von der Verdichtungsstelle. Die geometrische und materielle Dämpfung führt zu einem raschen Abklingen der Schwingschnelle. So beträgt zum Beispiel die maximale Schwingschnelle zum Zeitpunkt  $t = 0,40$  s nur noch ca. 50 mm/s. Diesen Ergebnissen werden Resultate aus Simulationen unter Berücksichtigung des inelastischen Untergrundverhaltens gegenübergestellt. Wie aus Abb. 7 ersichtlich ist, reduziert die zusätzliche Ener-



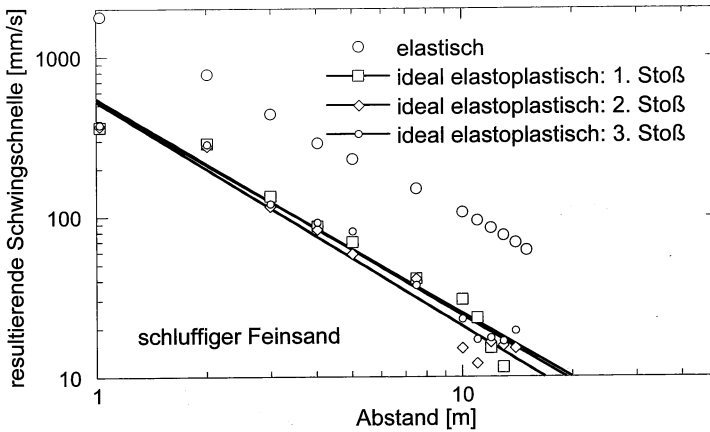
gedissipation durch plastische Deformationen die Maxima der resultierenden Schwingschnelle wesentlich.



**Abb. 6:** Resultierende Schwingschnelle  $v_{R,max}$  im Abstand vom Verdichtungsfuß zu verschiedenen Zeitpunkten nach Aufbringen des ersten Verdichtungsstoßes; elastische Antwort



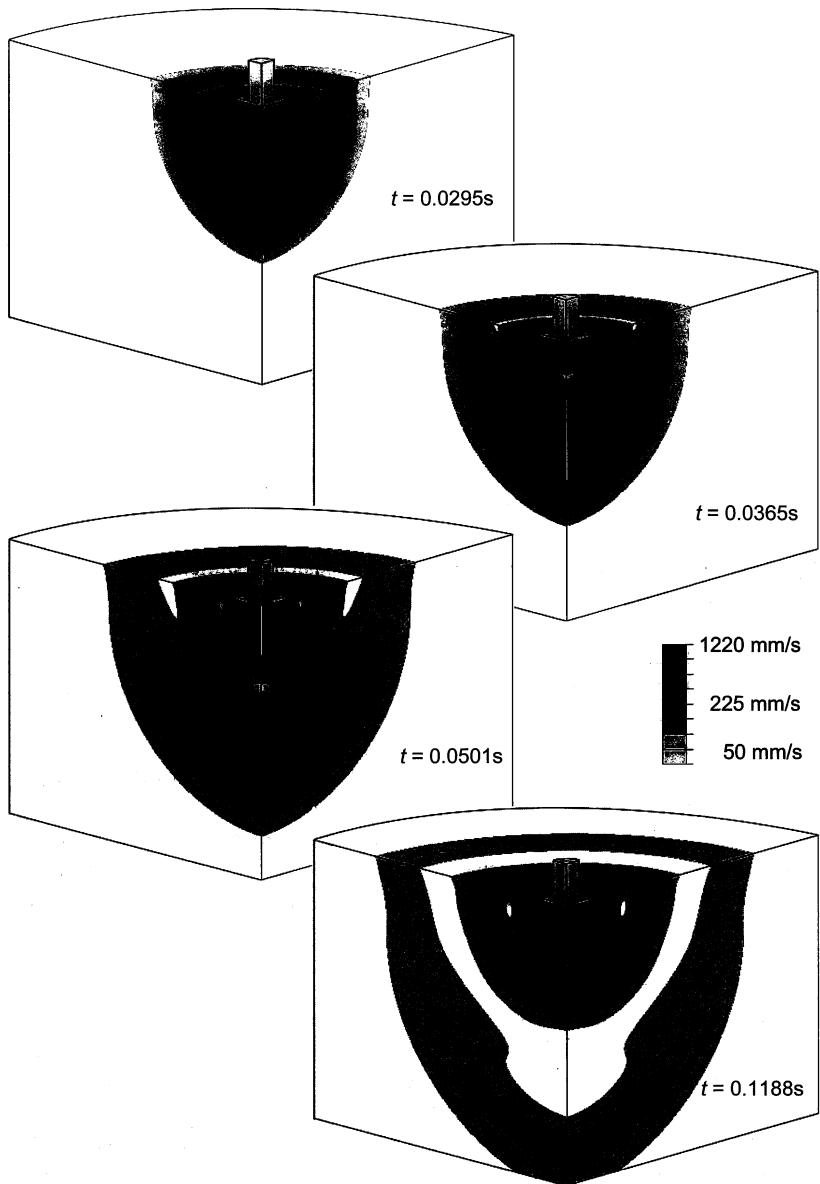
**Abb. 7:** Resultierende Schwingschnelle  $v_{R,max}$  im Abstand vom Verdichtungsfuß zu verschiedenen Zeitpunkten nach Aufbringen des ersten Verdichtungsstoßes; elastoplastische Antwort



**Abb. 8:** Maximale resultierende Schwingschnelle  $v_{R,max}$  im Abstand vom Verdichtungsfuß; elastische und elastoplastische Antwort; Numerisch ermittelte Abstandsbeziehung

Einen Überblick über das Abklingen der maximalen resultierenden Schwingschnelle  $v_{R,max}$  als Funktion von der Entfernung vom Verdichtungspunkt erhält man aus Abb. 8. Der Maximalwert ist an diskreten Oberflächenpunkten doppellogarithmisch aufgetragen. Diese Darstellung führt dazu, dass die Werte in guter Übereinstimmung durch eine lineare Ausgleichsgerade approximiert werden können. Es wird dabei die elastische Antwort der inelastischen gegenübergestellt. Eine deutliche Reduktion der elastoplastischen Antwort ist ersichtlich: So nimmt z.B. im Abstand von 1,0 m die resultierende Schwingschnelle von 1790 mm/s auf 360 mm/s ab. Zusätzlich sind in dieser Abbildung die maximalen Schwingschnellen des ideal elastoplastischen Bodens nach einem bzw. zwei weiteren Stößen eingetragen. Der Unterschied zur Antwort nach dem ersten Stoß ist jedoch marginal. Das bedeutet, dass bei einem Verdichtungsverfahren von bis zu 60 Stößen wiederkehrend mit derselben resultierenden Schwingschnelle zu rechnen ist.

Die Abb. 9 zeigt den räumlichen Verlauf der resultierenden Schwingschnellen zu vier verschiedenen Zeitpunkten nach dem ersten Stoß für einen elastoplastischen schluffigen Feinsand. Man erkennt sehr deutlich die räumliche Ausbreitung und das zeitliche Abklingen der Wellen im Halbraum. Es wird darauf hingewiesen, dass der gesamte mittels Finiten Elemente diskretisierte Nahbereich dargestellt ist. In der untersten Abbildung sieht man, dass die Wellen am Rand zum Fernbereich durch die Infiniten Elemente nicht reflektiert werden. Gemäß den beiden unteren Abbildungen treten die maximalen Schwingschnellen an der Oberfläche auf. Die Rayleigh-Wellen besitzen damit auch im elastoplastischen Boden anteilmäßig die größte Energie.



**Abb. 9:** Räumliche Verteilung der maximalen resultierenden Schwingschnelle  $v_{R,max}$  zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem ersten Stoß; elastoplastische Antwort eines schluffigen Feinsandes

## 3 Experimentelle Untersuchungen

Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen, die auf verschiedenen Versuchsstrecken mit unterschiedlichen Bodenaufbauten durchgeführt werden, dienen zur Verifikation der theoretischen Untersuchungen. Dazu werden dynamische Messaufnehmer sowohl in den Untergrund eingebaut als auch auf das Gerät montiert, um das Bewegungsverhalten des Gesamtsystems messtechnisch erfassen und mit den theoretischen Simulationen vergleichen zu können.

Parallel zu den dynamischen Messungen sind Bodenuntersuchungen im Feld und im Labor zur Bestimmung der maßgebenden Bodeneigenschaften durchgeführt worden. Wesentlich ist die Analyse der Wellenabstrahlung, die sich in Form von Oberflächen- und Raumwellen (Kompressions- und Scherwellen) ausbreitet. Damit kann die durch den Emittenten ausgesandte Wellenenergie am Ort der Immission im Zusammenhang mit der Erschütterungswirkung auf Mensch und Gebäude untersucht werden. Dies stellt im Zusammenhang mit der Anwendung von Bauverfahren mit dynamischer Anregung bzw. Wirkung insbesondere im Nahbereich von Bauwerken und Ansiedlungen eine zentrale Frage dar. In Abhängigkeit von den Bodenarten und den eingestellten Geräteparametern sind folglich Abstandsgesetze zu formulieren, welche als Grundlage für die Dimensionierung der Bodenverbesserungsarbeiten herangezogen werden können (Paulmichl & Fürpaß 2009).

### 3.1 Überprüfung des Verdichtungserfolges

Optimierung und Kontrolle der Impulsverdichtung erfolgen durch folgende Maßnahmen bzw. Einhaltung der im Folgenden angegebenen Kriterien:

- Einhaltung der Abbruchkriterien
- GPS basierte Verdichtung mit arbeitsintegrierter Dokumentation der Herstellungsparameter für jeden Verdichtungspunkt
- Durchführung von Druck- und/oder Rammsondierungen) vor und nach der Impulsverdichtung

Die Verdichtung wird mit folgenden Abbruchkriterien durchgeführt, die im Vorfeld auf einem Probefeld verifiziert bzw. optimiert werden:

- Abbruchkriterium 1: Gesamtsetzung (Krater- bzw. Trichtertiefe) z.B. > 80 cm
- Abbruchkriterium 2: Schlagzahl pro Verdichtungspunkt z.B. > 50
- Abbruchkriterium 3: Setzung letzter Schlag z.B. < 10 mm

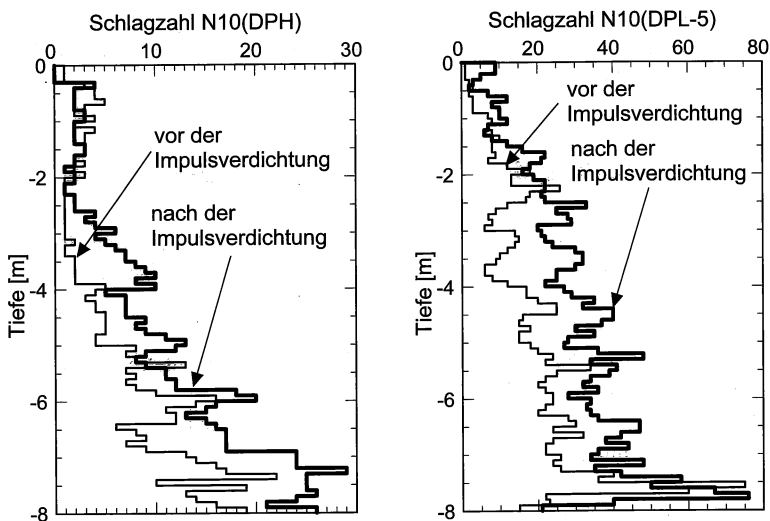
### Die Verdichtungsparameter

- Schlagzahl,
- Setzung beim letzten Schlag,
- Gesamtsetzung (Trichtertiefe),
- eingebrachte Energie (als Verdichtungsenergie bezeichnet) und
- durchschnittliche Schlagzahl

sowie die Punktkoordinaten, Datum und Uhrzeit werden für jeden Verdichtungs-  
punkt im Zuge der Verdichtung elektronisch aufgezeichnet und automatisch do-  
kumentiert (GPS gesteuerte Datenerfassung).

Dadurch besteht die Möglichkeit, örtliche Inhomogenitäten des Untergrundes  
klar zu erkennen und die Impulsverdichtung gezielt anzupassen. Im Bedarfsfall  
werden zusätzliche Verdichtungsübergänge ausgeführt.

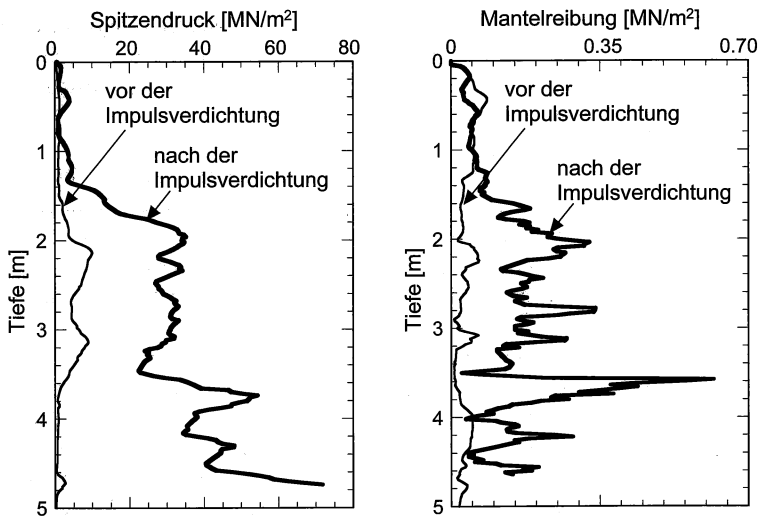
Zur Ermittlung der Verdichtungstiefe werden in Abhängigkeit von den Unter-  
grundverhältnissen vor und nach der Impulsverdichtung Drucksondierungen  
(CPT) bzw. Leichte, Mittelschwere oder Schwere Rammsondierungen (DPL,  
DPM oder DPH) durchgeführt.



**Abb. 10:** links: schwere Rammsondierung DPH in nicht bindigem Boden  
rechts: leichte Rammsondierung DPL-5 in bindigem Boden  
Vergleich der Schlagzahlen N10 vor und nach der Impulsverdichtung

In Abb. 10 sind die Schlagzahlen  $N_{10}$ , ermittelt mit der Schweren (links) bzw. Leichten Rammsonde (rechts), vor und nach der Impulsverdichtung über die Tiefe aufgetragen. Die Schwere Rammsondierung erfolgte in nicht bindigem, primär sandig kiesigem Boden, die Leichte Rammsondierung in bindigem Boden bestehend aus (Au-)Schluffen und (Au-)Sanden. Daraus ist ersichtlich, dass die Tiefenwirkung des Impulsverdichters in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen bis rund 7 (8) m (Sand-Kies-Gemische) betragen kann.

Grundsätzlich ist zu bedenken, dass mit der Schweren Rammsonde (DPH) in bindigen Böden weicher bis steifer Konsistenz unabhängig vom Verdichtungszustand nur geringe Schlagzahlen erzielbar sind. Aus diesem Grund empfehlen sich zum Nachweis der Verdichtungswirkung in derartigen Böden entweder Leichte Rammsondierungen (DPL) oder Drucksondierungen (CPT). In Abb. 11 ist das Ergebnis einer Drucksondierung dargestellt, die vor und nach der Impulsverdichtung einer vorrangig schluffigen Deckschicht (Auschluffe), die in einer Tiefe von ca. 4 m unter dem Arbeitsplanum von Donauschottern unterlagert wird, durchgeführt wurde. Gemäß dem Verlauf des Spitzendrucks (Abbildung 11, links) ist beim genannten Bodenaufbau mit einer Tiefenwirkung von rund 4,5 bis 5 m zu rechnen. Bei stärker sandigen Böden ist die Tiefenwirkung erfahrungsgemäß höher als bei vorrangig schluffigen Böden. Aus Abb. 11 (links) ist weiters zu erkennen, dass die oberen Donauschotter unterhalb der Auböden ebenfalls eine deutliche Verdichtung erfahren.



**Abb. 11:** Drucksondierungen CPT in bindigem Boden  
Vergleich des Spitzendrucks (links) und der Mantelreibung (rechts)  
vor und nach der Impulsverdichtung

Die geringe Lagerungsdichte in den obersten 1 bis 1,5 m ist darauf zurückzuführen, dass die Verdichtungskrater des Impulsverdichters nach dem letzten Übergang mit Fremdmaterial verfüllt wurden, ohne dieses zu verdichten. Üblicherweise folgt nach der Auffüllung der Verdichtungskrater mit Fremdmaterial eine Verdichtung mit einer entsprechend schweren Vibrationswalze.

### 3.2 Erschütterungsmessungen

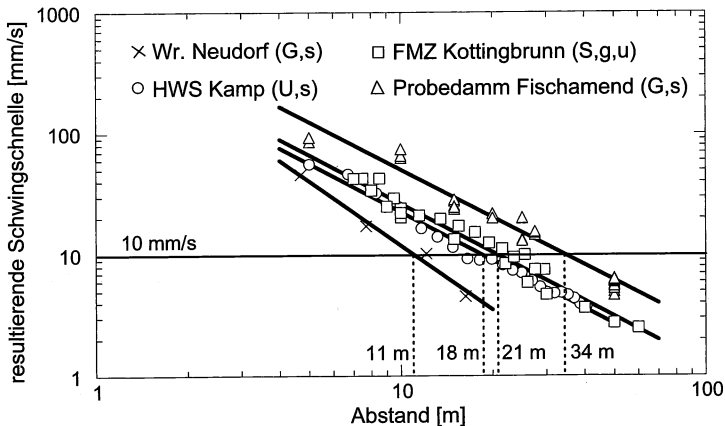
Zur Ermittlung der Reichweite der Erschütterungen (Abstandsbeziehungen) infolge der Impulsverdichtung wurden auf zahlreichen Versuchsstrecken Schwingungsmessungen durchgeführt.

Für die Messung der Erschütterungen wurde das Aufzeichnungssystem MR2002DIN-CE (RED BOX) der Fa. SYSCOM eingesetzt. Die Schwinggeschwindigkeiten wurden mit einem triaxialen Geschwindigkeitsaufnehmer nach DIN 45669 (Fa. SYSCOM, Typ MS2003 A3HV 315/1) gemessen und mit einem Recorder (Fa. SYSCOM, Typ MR2002 DIN-CE) in-situ aufgezeichnet. An den Messpunkten wurde die Schwinggeschwindigkeit in x-, y- und z-Richtung im Frequenzbereich von 1 bis 315 Hz gemessen. Die anschließende Messdatenauswertung erfolgte mit Hilfe des Softwarepaketes VIEW 2002 (Fa. Ziegler Consultants).

Mittels Regressionsanalyse der in unterschiedlichen Abständen zum Verdichtungspunkt aufgezeichneten maximalen Messwerte wurde die Abhängigkeit zwischen der maximalen resultierenden Schwingschnelle  $v_{R,max}$  und der Distanz von der Erschütterungsquelle abgeleitet.

In Abb. 12 sind ausgewählte messtechnisch ermittelte Abstandsgesetze für unterschiedliche Untergrundverhältnisse dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sich die niedrigsten Schwingschnellen bei der Verdichtung von locker gelagerten sandigen Kiesen (Linie mit Kreuzen in Abb. 12) ergaben. Diesbezüglich sei angemerkt, dass nur ein Verdichtungsübergang erfolgte und das Erschütterungsniveau erfahrungsgemäß mit den Übergängen zunimmt (Paulmichl & Fürpaß 2009). Die stärksten Erschütterungen wurden bei der Impulsverdichtung von dicht gelagerten sandigen Kiesen gemessen (Linie mit Dreiecken in Abbildung 12). Dazwischen liegen die Schwingschnellen infolge der Verdichtung von sandigen Schluffen (Linie mit Kreisen in Abb. 12) und kiesig schluffigen Sanden (Linie mit Quadraten in Abb. 12). Weiters ist zu erkennen, dass für die drei letzt genannten Fälle der Abklingkoeffizient praktisch gleich ist und gemäß linearer Regressionsanalyse bei rund 1,3 liegt. Im erst genannten Fall ist der Abklingkoeffizient mit 1,8 etwas größer.

Der für Bauwerke der Gebäudeklasse III gemäß ÖN S 9020 einzuhaltende Grenzwert von zul  $v_{R,max} = 10$  mm/s wird in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen ab einer Distanz vom Verdichtungsfuß von 11 bis 34 m unterschritten. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen liegt der erforderliche Mindestabstand für Bauwerke der Gebäudeklasse III bei rund 20 m. Im Vergleich dazu wurden bei der Dynamischen Intensivverdichtung bei vergleichbaren Verhältnissen Schwingschnellen von 10 mm/s noch in 30 m Entfernung gemessen.



**Abb. 12:** Maximale resultierende Schwingschnelle  $v_{R,max}$  im Abstand vom Verdichtungsfuß. Messtechnisch ermittelte Abstandsbeziehungen für unterschiedliche Untergrundverhältnisse.

## 4 Zusammenfassung

Im gegenständlichen Beitrag werden numerische und experimentelle Untersuchungen mit dem Impulsverdichter diskutiert und verglichen, deren Ergebnisse eine gute Übereinstimmung zeigen. Die bei den theoretischen Untersuchungen exemplarisch an schluffigem Feinsand gefundene Tiefenwirkung von etwas mehr als 4 m bestätigt die bei den Feldversuchen aufgetretene Tiefenwirkung von zumindest 4.5 bis 5 m, die je nach Bodenart bis zu 7 (8) m betragen kann. Die für schluffigen Feinsand mit Hilfe von numerischen Berechnungen und Feldmessungen getrennt ermittelten Abstandsgesetze, die das Abklingen der durch den Verdichtungs Vorgang indizierten maximalen resultierenden Schwingschnellen an der Oberfläche mit zunehmender Distanz zum Verdichtungs punkt angeben, liegen in derselben Bandbreite. Damit konnte die für die numerischen Simulationen vorgenommene mechanische Modellbildung für den Parameterbereich der vorliegenden Untersuchungen verifiziert werden.



## 5 Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Dynamische Bodenverdichtung mit dem Impulsverdichter - IMPULS“ durchgeführt. Für die Förderung dieses Projekts bedanken sich die Autoren bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG).

## 6 Literaturverzeichnis

ABAQUS Theory Manual, Version 6.5-1 (2004).

Adam, D.; Paulmichl, I. (2007)

Impact Compactor – an innovative dynamic compaction device for soil improvement. Tagungsband 8th International Geotechnical Conference, Slovak University of Technology, Bratislava, Slowakei, 183-192.

Chopra, A.K. (2006)

Dynamics of Structures. Dritte Auflage. Prentice Hall, New Jersey.

Mang, H.A.; Hofstetter, G. (2008)

Festigkeitslehre. Dritte, aktualisierte Auflage. Springer, Wien-New York.

Paulmichl, I.; Fürpaß J. (2009)

Mitteltiefe Bodenverbesserung mit dem Impulsverdichter – Fallbeispiele aus der Praxis. Tagungsband der 7. Österreichischen Geotechniktagung, Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Wien, 341-352.

Studer, J.A.; Laue, J.; Koller, M.G. (2007)

Bodendynamik. Dritte, völlig neu bearbeitete Auflage. Springer, Berlin-Heidelberg.

Ziegler, F. (1998)

Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper. Dritte, verbesserte Auflage. Springer, Wien-New York.