

# **Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung - Bestimmung der dynamischen Bodeneigenschaften mit der seismischen Drucksonde**

Dipl.-Ing. Peter NAGY  
Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar ADAM  
Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien  
Dipl.-Ing. Ferenc SCHEURING  
Fugro Consult Kft.

## **KURZFASSUNG**

Eine aktuelle Forschungsarbeit am Institut für Geotechnik der TU Wien befasst sich mit der Untersuchung der dynamischen Wechselwirkung zwischen Tiefenrüttlern und dem zu verdichtenden Boden. Das dreidimensionale Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers während des Verdichtungsprozesses wurde in großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen auf einem Versuchsfeld messtechnisch beobachtet. Darüber hinaus wurde die Veränderung dynamischer Bodeneigenschaften zufolge Rütteldruckverdichtung mittels seismischer Drucksondierung (SCPTu) ermittelt.

Im vorliegenden Beitrag werden die Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde in den Vordergrund gestellt, es werden der Verfahrensablauf und die Auswertung der aufgezeichneten Messergebnisse gezeigt sowie die Veränderung der dynamischen Bodeneigenschaften zufolge Rütteldruckverdichtung und die Anwendbarkeit der Untersuchungsergebnisse zur Beurteilung des seismischen Standortrisikos diskutiert.

## **1. GRUNDLAGENORIENTIERTE UNTERSUCHUNG DER RÜTTELDRUCKVERDICHTUNG**

### **1.1. Qualitätskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung**

Der Rütteldruckverfahren (RDV) wird seit den 30er Jahren erfolgreich für die tiefreichende Verdichtung grobkörniger Böden angewendet. Der Tiefenrüttler ist ein horizontal schwingender zylindrischer Stahlkörper, der Schwingungsvorgang des Rüttlers wird durch die Rotationsbewegung der im Inneren des Rüttlers angeordneten Unwuchtmasse bewirkt.

Zufolge der durch die Rotation der Unwucht erzeugten Horizontalkraft wird eine Kornumlagerung herbeigeführt und als Folge des Rüttelvorganges wird der Untergrund um den Tiefenrüttler verdichtet. Die wesentlichen Vorteile der Rütteldruckverdichtung bestehen neben der Vorwegnahme von Setzungen und Homogenisierung des Untergrundes in der Erhöhung der Lagerungsdichte und der Steifigkeit des anstehenden Bodens.

Die Rütteldruckverdichtung ist zwar ein Bodenverbesserungsverfahren mit langjähriger Tradition, es stehen trotzdem bislang nur unzureichende Instrumente und Möglichkeiten zur Qualitätsprüfung von Rütteldruckverdichtung zur Verfügung. Der Wissensstand der ausführenden Firmen basiert primär auf Erfahrungen, jedoch nicht auf fundierten, grundlagenorientierten wissenschaftlichen Untersuchungen. Die praxismgerechte Qualitätssicherung bei der

Rütteldruckverdichtung ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Der Verdichtungserfolg wird vorwiegend durch laufende Aufzeichnung der Stromaufnahme des Rüttlermotors und der zugegebenen Schottermenge bzw. durch Rammsondierungen zwischen den Verdichtungspunkten beurteilt.

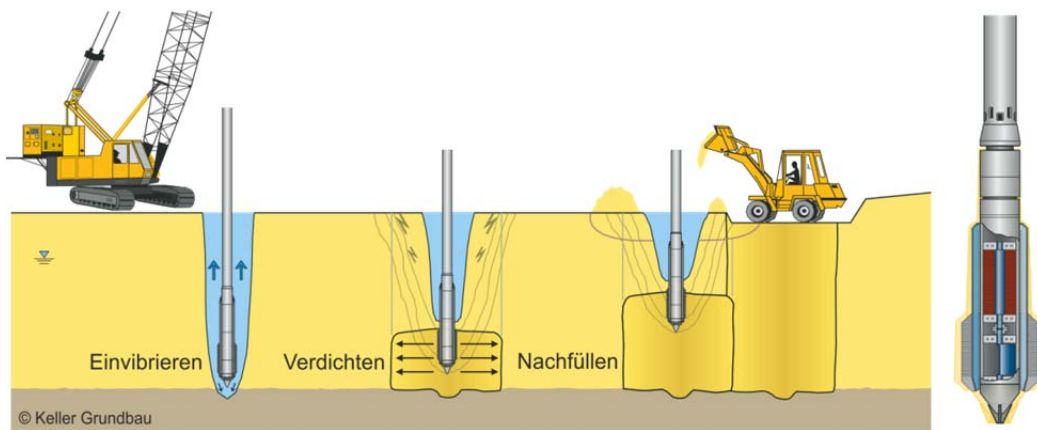


Abb. 1 Rütteldruckverdichtung, schematische Darstellung eines Tiefenrüttlers

## 1.2. Forschungsziele und Untersuchungsmethodik

Die ersten theoretischen Untersuchungen zum Bewegungsverhalten des Rüttlers von Fellin (2000, 2002) und Experimente im Modellmaßstab von Nendza (2006) zeigten, dass zwischen der dreidimensionalen Rüttlerbewegung und den aktuellen Eigenschaften des zu verbessernden Bodens Zusammenhänge erkennbar sind. Das Forschungsprojekt „Dynamische Verdichtung mit Tiefenrüttlern“ an der TU Wien setzte sich die Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen eines Systems zur Qualitätskontrolle für die Rütteldruckverdichtung auf Basis der dreidimensionalen Rüttlerbewegung zum Ziel. Sowohl großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen als auch numerische Simulationen auf Basis von Modellierung der dynamischen Wechselbeziehung zwischen Rüttler und Boden stellen die Instrumente für die grundlegenden Untersuchungen dar, die schlussendlich die Basis für die Entwicklung eines Systems zur Verdichtungskontrolle für das Tiefenrüttelverfahren bilden.

Das Forschungsprojekt wird von der TU Wien am Institut für Geotechnik, gemeinsam mit den Projektpartnern Universität Innsbruck, Institut für Grundlagen der Technischen Wissenschaften, Keller Grundbau Österreich Ges.mBH und VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, abgewickelt. Die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurden gemeinsam mit der Firma Keller Grundbau, mit einem von der Firma VCE messtechnisch ausgerüsteten Tiefenrüttler durchgeführt. An der Universität Innsbruck werden neue, theoretische und numerische Simulationsmodelle für das Rüttler-Boden-Interaktionssystem entwickelt. Die wissenschaftliche Auswertung und Interpretation der im Zuge der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen aufgezeichneten Messdaten sowie der numerischen Berechnungsergebnisse erfolgt an der TU Wien.

Die dreidimensionale Bewegung des Tiefenrüttlers während des Verdichtungsprozesses wurde in großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen messtechnisch beobachtet. Die Untersuchungen fanden auf einem Versuchsfeld bei Fischening in der Obersteiermark statt. Im Rahmen dieser experimentellen Untersuchungen konnte ein sehr umfangreiches Messprogramm umgesetzt werden; es ist damit weltweit zum ersten Mal gelungen, einen Tiefenrüttler mit einem Mess- und Datenübertragungssystem aufzurüsten und dauerhaft Messdaten aufzuzeichnen.

Die Untersuchungen auf dem Versuchsfeld beschränkten sich nicht nur auf die messtechnische Erfassung der Rüttlerbewegung, über die Untersuchung der Rüttlerbewegung hinaus wurde die Veränderung dynamischer Bodeneigenschaften zufolge Rütteldruckverdichtung auf dem Versuchsfeld bestimmt.



Abb. 2 Experimentelle Untersuchungen auf dem Versuchsfeld in Fischening

Indirekte Untergrunderkundungsverfahren zur Bestimmung bodendynamischer Kenngrößen haben nach Studer et al. (2007) generell den großen Vorteil, dass sie Messungen am ungestörten Untergrund erlauben. Der Boden wird nicht wie bei Laboruntersuchungen aus seinem Verband gelöst, sondern kann ohne wesentliche Veränderungen des Spannungszustandes untersucht werden. Feldversuche zur Bestimmung bodendynamischer Kenngrößen basieren auf dem Prinzip der elastischen Wellenausbreitung und liefern deshalb Kennziffern, die auf sehr kleine Verformungen beschränkt sind.

Die Bedeutung zerstörungsfreier Untersuchungen in der Geotechnik wurde früh erkannt, bereits Terzaghi (1954) weist auf die Anwendbarkeit von „Bodenuntersuchungen durch Sprengungen und mittels Schwingern“ zur Erkundung des Untergrundes hin. Indirekte Untergrunderkundungsverfahren gewannen jedoch besonders in den letzten Jahrzehnten durch die rasche Entwicklung der Mess- und Datenaufzeichnungssysteme an Bedeutung.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen auf dem Versuchsfeld kam die innovative Untergrunderkundungsmethode, die seismische Drucksondierung (SCPTu) zur Anwendung.

## 2. GRUNDPRINZIP DER SEISMISCHEN DRUCKSONDIERUNG

Bei der herkömmlichen CPTu Drucksondierung (Cone Penetration Test with pore pressure  $u$ ) wird eine zylindrische Messsonde weggesteuert, mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit von 20 mm/s, in den Boden gepresst. Dabei werden kontinuierlich Spitzendruck  $q_c$ , Mantelreibung  $f_s$ , lokaler Porenwasserdruck  $u$  und die Abweichung der Sondierspitze von der Vertikalen gemessen. Die Drucksondierung ist optimal einsetzbar in bindigen oder organischen Böden bzw. in locker gelagerten grobkörnigen Böden. Große Blöcke oder Findlinge können Erschwernisse beim Abteufen der Sonde darstellen, da ein viel zu großer Spitzenwiderstand beim Antreffen eines Hindernisses im Untergrund mit Ausknicken der Sondierstange und dadurch mit Verlust der

Sondierspitze droht. Um den Verlust der Sondierspitze zu vermeiden, werden Abbruchkriterien für den Sondiervorgang festgelegt. Die folgenden Abbruchkriterien erwiesen sich in der Praxis als sinnvoll:

- Spitzenwiderstand  $q_c > 60 \text{ MPa}$
- Abweichung von der Vertikalen  $> 15^\circ$
- plötzlicher Anstieg der Abweichung von der Vertikalen  $> 3^\circ$

Bei der seismischen Drucksondierung SCPTu (Seismic Cone Penetration Test with pore pressure u) wird zusätzlich zur herkömmlichen CPTu Drucksondierung nach dem Prinzip des Down-Hole Tests das Scherwellengeschwindigkeitsprofil des Untergrundes ermittelt. Durch Hammerschlag an der Geländeoberfläche werden seismische Wellen erzeugt und Messsignale mit Beschleunigungsaufnehmern in der Sondierspitze registriert. Die Versuchsdurchführung ist wesentlich einfacher sowie schneller und kostengünstiger als bei der Downhole-Untersuchung, da bei der seismischen Drucksondierung kein Bohrloch notwendig ist bzw. die Aufnehmer in der Sondierspitze eingebaut sind und mit der Sonde bewegt werden. Die während des Abteufens kontinuierlich aufgezeichneten Messdaten enthalten, über dem ermittelten Scherwellengeschwindigkeitsprofil hinaus, zusätzliche wertvolle Informationen über die Untergrundeigenschaften (Campanella und Robertson, 1984).

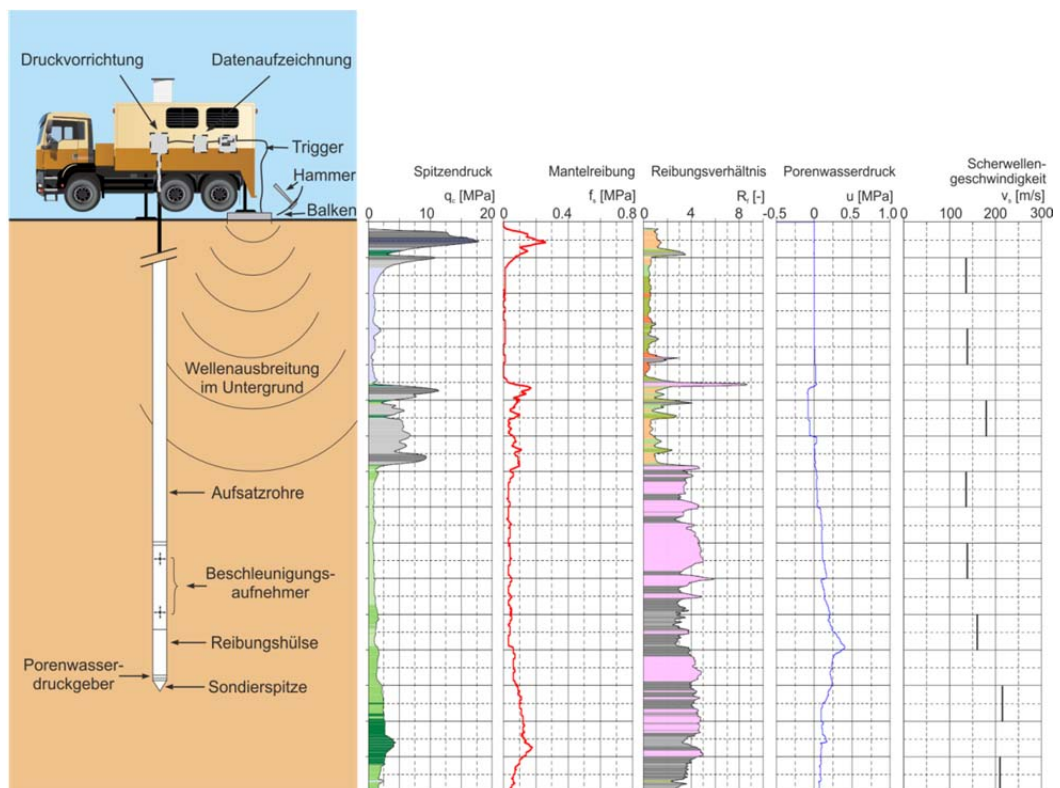


Abb. 3 Grundprinzip der seismischen Drucksondierung (SCPTu) mit qualitativer Darstellung der aufgezeichneten Messdaten und des Scherwellengeschwindigkeitsprofils (adaptiert nach Fugro, 2016)

Oberhalb der Sondierspitze sind in der Regel zwei Beschleunigungsaufnehmer in einem Abstand von 50 cm voneinander angeordnet. Aufgrund der sehr kleinen Dehnungsamplituden der

seismischen Wellen sind sehr hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit gestellt, es kommen in den seismischen Sondierspitzen besonders empfindliche Messsensoren zur Anwendung. Aufgrund der Empfindlichkeit der Messsensorik sollen jegliche Erschütterungseinwirkungen zufolge Verkehr oder Betrieb von Maschinen während der Versuchsdurchführung soweit wie möglich minimiert werden. Gemäß Erfahrungen aus der Ausführungspraxis ist die Aufzeichnung seismischer Messsignale bis zu einer Tiefe von mindestens 70 m problemlos möglich. Die wichtigste Voraussetzung für eine große Messtiefe ist eine erschütterungsarme Umgebung.

### 3. SEISMISCHE DRUCKSONDIERUNG AUF DEM VERSUCHSFELD

#### 3.1. Untergrundsituation

Vor der Durchführung der Verdichtungsversuche wurde auf dem Versuchsfeld ein umfangreiches Untergrunderkundungsprogramm durchgeführt, die Vorerkundung erfolgte mit Kernbohrungen und Rammsondierungen. Bis zur Erkundungstiefe wurden weitgestufte Kies-Sand-Gemische mit überwiegendem Kiesanteil und mit einem Feinkornanteil < 5%, vereinzelt aber auch Steine und Blöcke, vorgefunden. Der Grundwasserspiegel wurde in einer Tiefe von 2 m unter GOK angetroffen. Anhand der durchgeführten Rammsondierungen konnte bis zu einer Tiefe von etwa 10 m auf eine lockere bis mitteldichte Lagerung des anstehenden Bodens geschlossen werden.

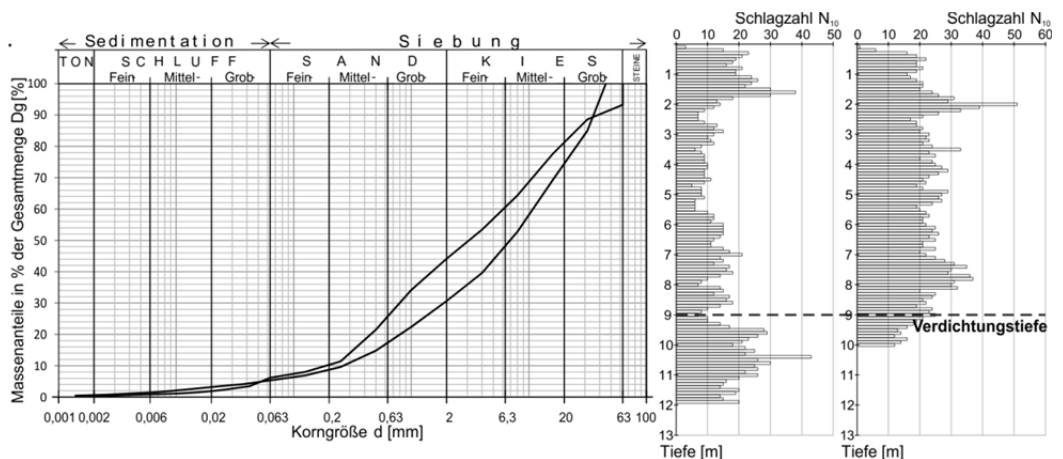


Abb. 4 links: Kornverteilung des zu verdichtenden Bodens  
rechts: Rammsondierung auf dem Versuchsfeld vor und nach der Verdichtung

Bis zu einer Tiefe von 1,5 – 2,0 m unter GOK war eine dicht bis sehr dicht gelagerte Deckschicht vorzufinden. Die dicht bis sehr dichte Lagerung der Deckschicht ist auf die oberflächennahe Verdichtung zufolge Geräte- und LKW-Verkehrs in der Kiesgrube zurückzuführen. Im Zuge der Verdichtungsversuche wurde der Untergrund bis zu einer Tiefe von 9 m unter GOK mit dem Tiefenrüttler verdichtet.

### 3.2. Adaptierte Versuchsdurchführung zur gleichzeitigen Überprüfung des verdichteten und unverdichteten Bodens

Die Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde wurden nach dem Abschluss der Verdichtungsversuche durchgeführt.

Bei der Rütteldruckverdichtung werden die Verdichtungspunkte in bestimmten Verdichtungsmustern, in der Regel in Dreieck- und Rechteckrastern angeordnet. Der Rasterabstand wird abhängig von den Untergrundeigenschaften und vom angewendeten Verdichtungsgerät gewählt. Durch die räumliche Ausbreitung der Verdichtungswirkung werden homogene verdichtete Bereiche erzeugt.

Im Zuge der seismischen Drucksondierung wurden keine zusammenhängenden verdichteten Bereiche, sondern einzelne Verdichtungspunkte untersucht. Dadurch war es möglich, die dynamischen Eigenschaften des Ausgangsbodens und des verdichteten Bodens lokal zu vergleichen. Das Versuchsfeld in Fisching wurde in 4 Testfelder mit unterschiedlichen Verdichtungsrastern unterteilt (s. Abb. 2), die Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde wurden auf dem SCPT Testfeld durchgeführt.

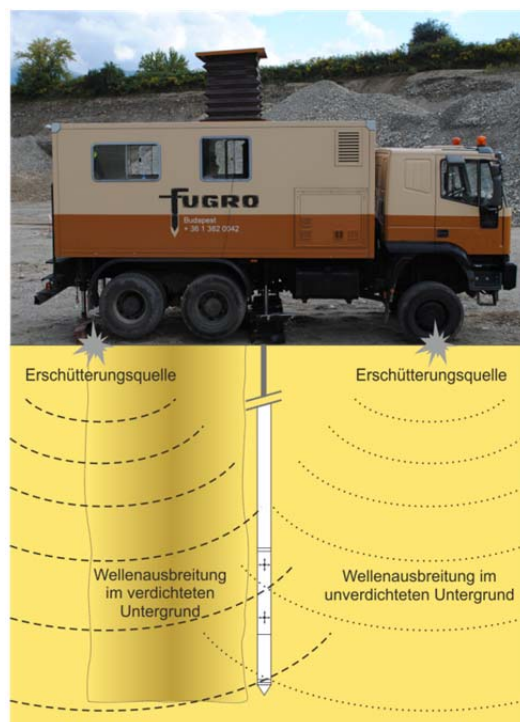


Abb. 5: Seismischen Drucksondierung SCPTu, Versuchsprinzip bei der seismischen Drucksondierung zur Überprüfung einzelner Verdichtungspunkte auf dem Versuchsfeld

Erfahrungen aus den Verdichtungsversuchen auf den Testfeldern A, B und C zeigten, dass bei den vorliegenden Untergrundverhältnissen mit dem angewendeten Tiefenrüttler eine Verdichtungswirkung von etwa 1,5 m in radialer Richtung um den Tiefenrüttler erreicht werden kann. Aus diesem Grund wurden die Verdichtungspunkte auf dem SCPT Testfeld in einem Rechteckraster in einem Abstand von 5 m voneinander angeordnet, damit eine gegenseitige Beeinflussung benachbarter Verdichtungspunkte ausgeschlossen werden kann.

Die seismische Drucksonde wurde bei sämtlichen Verdichtungspunkten in einem Abstand von 1,5 m vom jeweiligen Rüttleransatzpunkt abgeteuft. Die Sondierspitze wurde in Tiefenintervallen von 1,0 m positioniert, auf der Geländeoberfläche wurden Erschütterungen mittels horizontalen Hammerschlags auf einen Stahlbalken ausgelöst und die Messsignale in der Sondierspitze aufgezeichnet. Die Versuchsdurchführung wurde gegenüber der standardmäßigen seismischen Drucksondierung leicht modifiziert, es wurden Erschütterungen nicht auf einer, sondern auf zwei Positionen an der Geländeoberfläche ausgelöst. Die Erschütterungsquellen wurden so angeordnet, dass die Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeit im verdichteten und im unverdichteten Boden bei der jeweiligen Messtiefe möglich war. Abb. 5 zeigt schematisch das Versuchsprinzip bei der seismischen Drucksondierung auf dem Versuchsfeld zur Überprüfung einzelner Verdichtungspunkte. Es wurden im Zuge der seismischen Drucksondierung insgesamt 11 ausgewählte Verdichtungspunkte untersucht.

Die Untergrundsituation auf dem Versuchsfeld stellte aufgrund des zu erwartenden viel zu hohen Spitzenwiderstands in der 1,5 – 2,0 m mächtigen dicht bis sehr dicht gelagerten Deckschicht und aufgrund der großen Blöcke im Untergrund grundsätzlich keine optimalen Randbedingungen für die Drucksondierung dar. Die obere Deckschicht wurde vor der Durchführung der seismischen Drucksondierung punktuell, an den Stellen der geplanten Sondieransatzpunkten aufgelockert. Es war geplant die seismische Drucksonde bei sämtlichen Sondieransatzpunkten mindestens bis zur Verdichtungstiefe von 9 m abzuteufen und dynamische Bodeneigenschaften über der gesamten Verdichtungstiefe zu ermitteln. Obwohl die geplante Sondiertiefe nicht bei allen Sondieransatzpunkten erreicht wurde, konnten seismische Messungen in zahlreichen Messtiefen durchgeführt werden. Trotz Erschütterungen aus dem laufenden Abbaubetrieb in der Kiesgrube, konnten seismische Messdaten in hoher Qualität gesammelt werden, die in weiterer Folge eine äußerst wertvolle Grundlage für die Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeitsprofile im Untergrund darstellten.

### **3.3. Auswertung der Versuchsergebnisse**

Beim Auslösen einer transienten Anregung an der Geländeoberfläche mittels horizontalen Hammerschlags auf den Stahlbalken breiten sich sowohl Kompressions- als auch Scherwellen im Untergrund aus und werden von den Beschleunigungsaufnehmern in der Sondierspitze aufgezeichnet. Die Scherwellen sind aufgrund ihrer größeren Amplitude in den Messsignalen deutlich stärker ausgeprägt und einfacher identifizierbar als die Kompressionswellen. Aus diesem Grund werden bei der Auswertung der Messdaten einer seismischen Drucksondierung bevorzugt die Scherwellen betrachtet.

Bei einer bestimmten Messtiefe wird der Hammerschlag auf den Balken mehrfach wiederholt, die Messsignale werden während der Versuchsdurchführung an Ort und Stelle auf Plausibilität geprüft, damit eventuelle Messfehler oder Störungen eliminiert werden können. Dadurch wird die Auswertbarkeit der aufgezeichneten Messsignale gewährleistet. Im Zuge der Datenauswertung werden entsprechende Mittelwerte aus den aufgezeichneten Messsignalen gebildet und zur Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeit verwendet. Die seismischen Messsignale der beiden Beschleunigungsaufnehmer werden paarweise analysiert, es werden Interwallgeschwindigkeiten bei den einzelnen Messtiefen bestimmt.

Bei der Datenauswertung wurden die Messsignale beim jeweiligen Verdichtungspunkt im unverdichteten und im verdichteten Untergrund gesondert ausgewertet. Anschließend wurden die beiden Scherwellengeschwindigkeitsprofile gegenübergestellt. Abb. 6 zeigt exemplarisch die ermittelten Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten und im verdichteten Boden bei einem ausgewählten Verdichtungspunkt. Zuzufolge der Rütteldruckverdichtung erhöhte sich die

Scherwellengeschwindigkeit im Untergrund deutlich, bei allen untersuchten Verdichtungspunkten konnte ein signifikanter Anstieg beobachtet werden. Bei den meisten Messtiefen konnte eine Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit um den Faktor 1,30 bis 1,80, bei manchen Messtiefen sogar um 2,30 ermittelt werden.

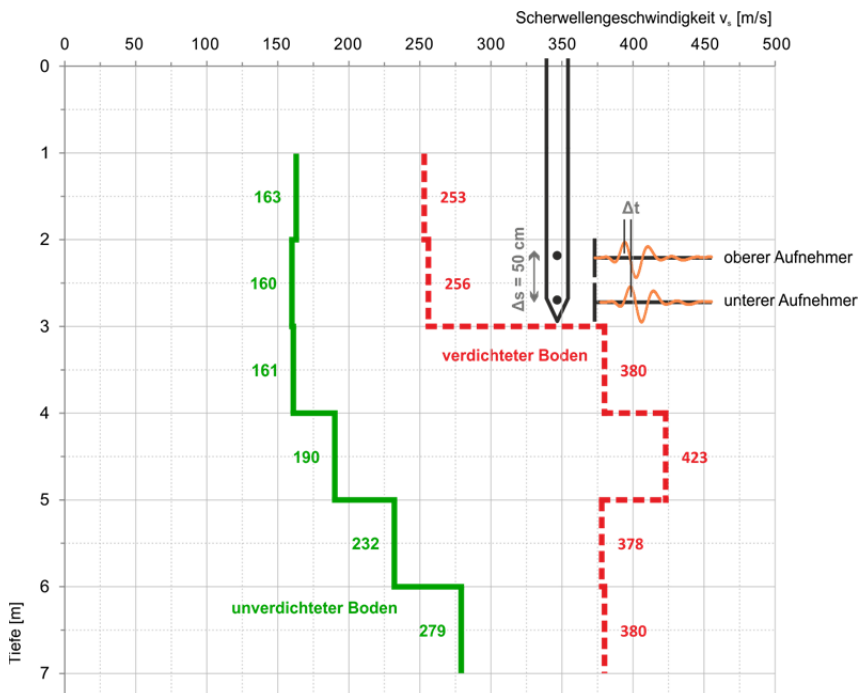


Abb. 6: Scherwellengeschwindigkeit über die Tiefe im unverdichteten und im verdichteten Boden, Sondierspitze mit qualitativer Darstellung der Messsignale

## 4. INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEBNISSE

### 4.1. Bestimmung der Schubsteifigkeit des Untergrundes anhand der Scherwellengeschwindigkeit

Die Schubsteifigkeit des Bodens ist stark dehnungsabhängig, mit zunehmender Dehnungsamplitude nimmt im Boden der Schubmodul ab. Schubverzerrungen innerhalb des quasi-elastischen Bereichs werden als „sehr kleine Dehnungen“ (very small strains) bezeichnet. Für die Steifigkeit von Böden bei sehr kleinen Dehnungen wird oft der Begriff „dynamische Steifigkeit“ verwendet. Im Bereich der sehr kleinen Dehnungen kann das Verhalten des Bodens als linear elastisch angesehen und für die Beschreibung des Materialverhaltens das Hooke'sche Gesetz herangezogen werden.

Der Schubmodul bei sehr kleinen Dehnungen wird mit  $G_0$  bezeichnet und lässt sich unter Voraussetzung elastisch isotroper Verhältnisse über die Bodendichte  $\rho$  und die Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  im Boden ermitteln.

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (\text{Gl. 1})$$



Der Schubmodul bei sehr kleinen Dehnungen stellt einen der wichtigsten Parameter bei der Bestimmung der Bodenreaktion unter zyklischen Belastungen dar.

In Feldversuchen zur Bestimmung dynamischer Bodenkenngrößen, wie auch bei der seismischen Drucksondierung, wird mit sehr kleinen Dehnungen gearbeitet (Campanella und Robertson, 1984). Über den ermittelten Scherwellengeschwindigkeiten lässt sich somit der Schubmodul  $G_0$  im verdichteten und unverdichteten Boden ableiten.

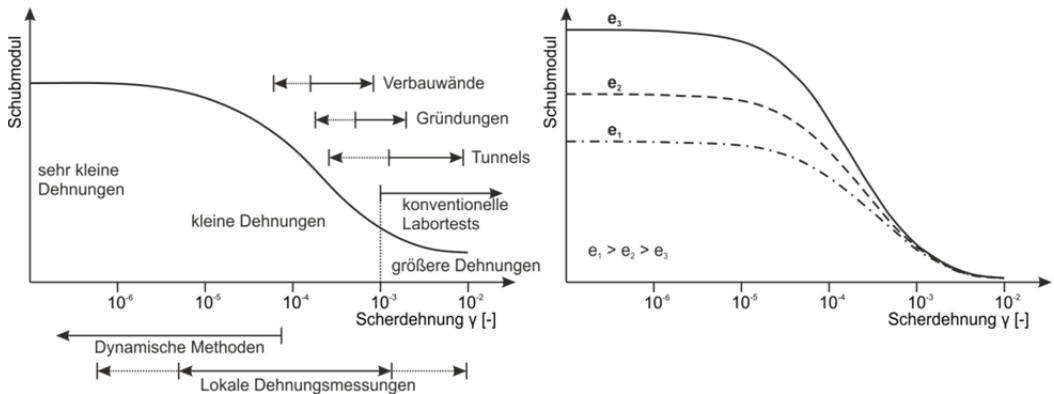


Abb. 7: links: Dehnungsabhängigkeit der Schubsteifigkeit des Bodens (adaptiert nach Benz, 2007)  
rechts: Einfluss der Porenzahl auf die Steifigkeit (adaptiert nach Seed und Idriss, 1970)

Bei der Ermittlung des Schubmoduls kann für die Dichte  $\rho$  im Allgemeinen die Feuchtdichte des Bodens unter Berücksichtigung des vorhandenen Wassergehaltes angesetzt werden. Im Zuge der Untersuchungen auf dem Versuchsfeld wurde die Scherwellengeschwindigkeit im gesättigten Untergrund ermittelt. Obwohl Scherwellen durch Wasser nicht übertragen werden können, kommt es in gesättigten Böden zu einer Relativverschiebung zwischen Wasser und Boden. Nach Brandl et al. (2003) kann als ausreichender Näherung die Sättigungsdichte zur Bestimmung der Bodensteifigkeit verwendet werden. Zuzufolge der Rütteldruckverdichtung wird die Dichte des zu verdichtenden Bodens erhöht, die Veränderung der Bodendichte kann durch die Menge des Verfüllmaterials abgeschätzt werden. Die Erhöhung der Bodendichte zuzufolge Verdichtung wurde bei der Ermittlung der Bodensteifigkeit berücksichtigt, hat darauf jedoch nur einen geringen Einfluss.

Wie Untersuchungen von Seed und Idriss (1970) zeigen, ist die Schubsteifigkeit des Bodens vor allem im niedrigen Dehnungsbereich stark von der Porenzahl  $e$  abhängig (s. Abb. 7 rechts). Die Porenzahl des Bodens wird zuzufolge der Verdichtung abgemindert, wodurch die Schubsteifigkeit ansteigt. Mit der seismischen Drucksondierung kann der Anstieg der Bodensteifigkeit zuzufolge Rütteldruckverdichtung gezeigt werden. Abb. 8 zeigt die mit Gl. 1 ermittelten Schubmoduln im unverdichteten und im verdichteten Untergrund beim betrachteten Verdichtungspunkt. Zur Bestimmung der Schubmoduln wurden die auf Abb. 6 dargestellten Scherwellengeschwindigkeitsprofile herangezogen.

Im Zuge der seismischen Drucksondierung auf dem Versuchsfeld wurden einzelne Verdichtungspunkte untersucht, die Erhöhung der Bodensteifigkeit wurde bei den einzelnen Verdichtungspunkten bestimmt. Die Verdichtungspunkte werden bei der Rütteldruckverdichtung in einem bestimmten Raster durchgeführt, die Wirkungsradien der einzelnen Verdichtungspunkte überschneiden sich und bilden eine zusammenhängende, vergleichsweise homogene verdichtete Schicht. Somit ist die für die einzelnen Verdichtungspunkte bestimmte Steifigkeitserhöhung für zusammenhängende verdichtete Bereiche übertragbar.

Es sei erneut darauf hingewiesen, dass die aus den Messdaten einer seismischen Drucksondierung abgeleitete Bodensteifigkeit im Bereich der sehr kleinen Dehnungen gültig ist, die mittels konventioneller Laboruntersuchungen ermittelte Bodensteifigkeit kann deutlich niedriger sein, als die Steifigkeit bei geringen Dehnungen (vgl. Abb. 7).

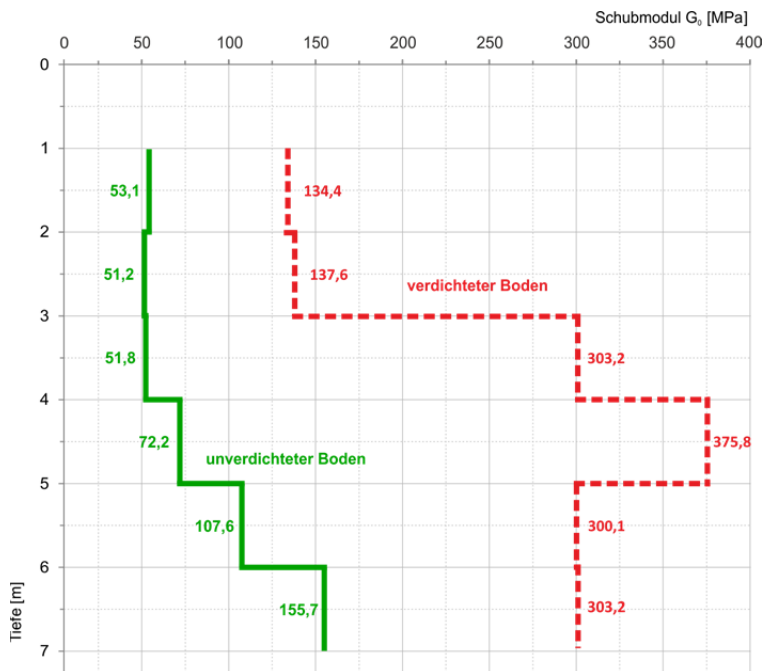


Abb. 8: Schubmodul  $G_0$  über die Tiefe im unverdichteten und im verdichteten Boden

#### 4.2. Scherwellengeschwindigkeitsprofil zur Beurteilung des seismischen Standortrisikos

Während eines Erdbebens reagieren verschiedene Strukturen oft sehr unterschiedlich auf die dynamischen Beanspruchungen. Diese Unterschiede sind in vielen Fällen auf die unterschiedlichen Untergrundverhältnisse zurückzuführen. Zahlreiche Baunormen, wie auch der Eurocode 8, beinhalten eine gewisse Klassifizierung des Untergrundes, um den Einfluss der örtlichen Baugrundbeschaffenheit auf die Erdbebeneinwirkung zu berücksichtigen. Um die Boden-Bauwerk Interaktion bei der Erdbebenbemessung berücksichtigen zu können, werden im Eurocode 8 Baugrundklassen festgelegt. Zum Nachweis der Erdbebensicherheit einer Konstruktion werden elastische Kapazitätsspektren für die unterschiedliche Baugrundklassen herangezogen. Die Grundlage für die Zuordnung zu den einzelnen Baugrundklassen, d.h. der maßgebende Klassifizierungsfaktor, ist im Eurocode 8 der  $v_{s,30}$  Wert, der die durchschnittliche Scherwellengeschwindigkeit in den obersten 30 m der geologischen Schichtung darstellt (Wenzel et al., 2011).

Die durchschnittliche Scherwellengeschwindigkeit  $v_{s,30}$  soll nach Eurocode 8 mit Hilfe folgender Formel berechnet werden:

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Darin bedeuten  $h_i$  und  $v_i$  die Dicke (in m) und die Scherwellengeschwindigkeit (bei Schubverzerrungen von höchstens  $10^{-5}$ ) der i-ten von insgesamt N Formationen sämtlicher Schichten in den oberen 30 Metern.

Tab. 1 Baugrundklassen nach ÖNORM EN 1998-1 (Auszug)

Baugrund- klasse	Beschreibung des stratigraphischen Profils	Parameter		
		$v_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (Schläge/30 cm)	$c_u$ (kPa)
A	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation mit höchstens 5 m weichem Material an der Oberfläche	> 800	-	-
B	Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder steifem Ton, mit einer Dicke von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe	360 - 800	> 50	> 250
C	Tiefe Ablagerungen von dichtem oder mitteldichtem Sand, Kies oder steifem Ton, mit Dicken von einigen zehn bis mehreren hundert Metern	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Ablagerungen von lockerem bis mitteldichtem kohäsionslosem Boden (mit oder ohne einige weiche kohäsive Schichten), oder von vorwiegend weichem bis steifem kohäsivem Boden	< 180	< 15	< 70

Nach Eurocode 8 muss „das Profil der Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  als zuverlässigster Parameter zur Vorhersage der standortabhängigen Merkmale der Erdbebeneinwirkung an standsicheren Standorten betrachtet werden“. Die seismische Drucksondierung kann generell als sehr zuverlässige Methode zur Ermittlung des Scherwellengeschwindigkeitsprofils angesehen werden und wird weltweit bevorzugt zur Beurteilung des seismischen Standortrisikos herangezogen.

Die Verbesserung der dynamischen Boden-Bauwerk Interaktion durch die Modifizierung der dynamischen Untergrundeigenschaften gehört zu den wichtigsten Zielen der tiefreichenden Bodenverbesserungsarbeiten. Im Zuge der Untersuchungen auf dem Versuchsfeld in Fischening wurde das Scherwellengeschwindigkeitsprofil im natürlich abgelagerten und im verbesserten Boden bestimmt, bei sämtlichen Sondieransatzpunkten konnte eine signifikante Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit im Untergrund zufolge der Rütteldruckverdichtung festgestellt werden. Damit wird gezeigt, dass eine Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung den Einfluss der örtlichen Baugrundbeschaffenheit auf die Erdbebeneinwirkung positiv beeinflussen kann, durch eine entsprechende Bodenverbesserung kann eine günstigere Boden-Bauwerk Interaktion im Erdbebenfall erzielt werden.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Die seismische Drucksondierung (SCPTu) wurde im Rahmen von experimentellen Untersuchungen auf einem Versuchsfeld zur Bestimmung der Veränderung dynamischer Bodeneigenschaften zufolge Rütteldruckverdichtung angewendet. Es konnte bei sämtlichen Sondieransatzpunkten eine deutlich höhere Scherwellengeschwindigkeit im verdichteten

Untergrund im Vergleich zum Ausgangszustand ermittelt werden. Die Erfahrungen aus der Versuchsdurchführung bestätigen, dass die seismische Drucksonde ein ideal geeignetes Werkzeug zur Bestimmung des Scherwellengeschwindigkeitsprofils ist.

Scherwellengeschwindigkeitsprofile stellen eine wertvolle Grundlage zur Bestimmung der Bodensteifigkeit im Bereich der sehr kleinen Dehnungen bzw. zur Beurteilung des seismischen Standortrisikos und der Boden-Bauwerk Interaktion im Erdbebenfall dar. Die günstige Auswirkung einer tiefreichenden Bodenverbesserung auf die Boden-Bauwerk Interaktion ist bei entsprechenden Untergrundverhältnissen mit der seismischen Drucksondierung nachweisbar.

*Die Autoren des vorliegenden Beitrags bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und bei der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes bzw. Fugro Consult Kft. für die konstruktive Zusammenarbeit während der Organisation und Durchführung der Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde.*

## LITERATUR

- Benz, T. (2007): Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. Dissertationsschrift. Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart.
- Brandl, H., Adam, D., Kopf, F., Niederbrucker, R. (2003): Straßenforschung Heft 533. Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewicht, BMVIT, Wien.
- Campanella, R., Robertson, P. K. (1984): A Seismic Cone Penetrometer to Measure Engineering Properties of Soil, Society of Exploration Geophysicists, SEG Annual Meeting, 2-6 December, Atlanta, Georgia.
- Fellin, W. (2000): Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem. Dissertation. Institut für Geotechnik und Tunnelbau. Universität Innsbruck, Balkema Publishers, Rotterdam.
- Fellin, W., et.al. (2002): On-line Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig, Messen in der Geotechnik 2002, Heft 68, 87-106.
- Fugro N.V. (2016): technical sheets Cone Penetration Testing
- Nendza, M. (2006): Untersuchungen zu den Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Selbstverlag, Braunschweig.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1970): Soil moduli and damping for dynamic response analysis. Report No. EERC 70-10, Berkeley, California.
- Studer, J. A., Laue, J., Koller, M. G. (2007): Bodendynamik. Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze. 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Terzaghi, K. v., Jelinek, R. (1954): Theoretische Bodenmechanik. Übers. a. d. Engl. u. bearb. v. Richard Jelinek. Berlin, Springer.
- Wenzel, H. et. al. (2011): Erdbeben im Wiener Becken. VCE Holding GmbH, Wien.
- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. ÖNORM EN 1998-1: 2013 06 15
- Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte. ÖNORM EN 1998-5: 2005 05 01