

## 18<sup>th</sup> Nonveiller Lecture, 27.09.2022, Zagreb

### Soil compaction & compaction control – State of the art, innovations & developments *Zbijanje tla i kontrola zbijanja – State-of-the-Art, inovacije i razvoj*

Dietmar Adam  
*TU Wien, Institute of Geotechnics*

#### Summary of the lecture

Ervin Nonveiller was one of the first students of Karl von Terzaghi at the world's first Institute for Soil Mechanics at the then “Technische Hochschule Wien”. Terzaghi, the teacher, obviously impressed and influenced Nonveiller, the student, who devoted his profession to geotechnical engineering. The “student became a teacher” himself and he gave the impression to dedicate his passionate professional life to Terzaghi's spirit, which was always driven by “theoretically profound and practically oriented” action.

This year's 18<sup>th</sup> Nonveiller Lecturer, Dietmar Adam, is the current head of the Institute of Geotechnics at the TU Wien, which was founded by Terzaghi more than nine decades ago. His research of more than 30 years has always been guided by this spirit. Selected research in the field of soil dynamics since the beginning of Dietmar Adam's employment at the institute in 1992 has been chosen the topic of the Nonveiller Lecture.

Compaction of soils and fill materials and compaction control are among the important subjects in geotechnical engineering and have undergone a noticeable boost in innovation in recent decades.

Starting from the soil mechanical principles of compaction, it becomes obvious that knowledge concerning this matter is crucial for understanding the processes that occur during compaction of soils and fill materials. Compaction of non-cohesive and cohesive soils is subject to completely different mechanisms. While non-cohesive soils and granular materials are best compacted dynamically, cohesive soils are better compacted statically with simultaneous kneading and opening of closed void space.

Conventional compaction controls are spot checks that either directly determine the density or degree of compaction, or indirectly by determining the stiffness achieved by compaction. The dynamic load plate test is an innovative spot test method, which provides a rapid and reliable determination of the dynamic deformation modulus and, based on extensive research in the last decades, has now surpassed the static load plate test. However, the disadvantage of a spot test control method remains.

The development of roller-integrated Continuous Compaction Control (CCC) has enabled the achievement of work-integrated compaction control over the entire compacted area through the measurement of interaction between the dynamically excited drum and the subsoil being compacted. The concept of near-surface dynamic compaction was first introduced in 1958, and vibratory rollers are now among the most widely used compaction equipment in the world. The first CCC system for vibratory rollers was patented in 1978, and further developments followed, with four different CCC systems available today. In his early research and PhD thesis, the lecturer investigated CCC in detail in cooperation with numerous roller manufacturers, which for the first time revealed and explained the physical background of the entire mechanical process involved in CCC application. Based on this, the development of rollers with control of vertical centrifugal force and subsequently of feedback-controlled rollers for optimized dynamic roller compaction was stimulated. The great advantages of CCC have only been diminished by the fact that the CCC indicators are not independent of the equipment and process parameters, and therefore calibration must be carried out for each roller-subsoil system using

spot testing methods, preferably the dynamic load plate test. In cooperation with the Hamm company, a new CCC indicator has been developed and patented by the soil dynamic group at the TU Wien in recent years, which is largely independent of equipment and process parameters and thus represents a significant advancement of the CCC.

The oscillating roller including a different type of dynamic excitation was introduced in 1982. CCC with oscillating rollers was not considered possible for a long time, until the first functioning system was developed and patented a few years ago by the soil dynamics group at the TU Wien in cooperation with the Hamm company.

The implementation and practical experience of CCC over the last three decades have resulted in the acceptance of this innovative method of roller-integrated compaction control becoming the standard in numerous countries. In earthworks it is no longer possible to imagine engineering practice without CCC.

Nowadays, deep compaction of granular soils is mainly carried out by Deep Vibro Compaction, which uses deep vibrators to compact the soil at depth and homogenize the soil properties. The method was patented already in 1933 and 1934. Until now, compaction control was performed indirectly after completion of compaction, usually by means of dynamic probing (DPH) or CPT tests. The disadvantage of this approach is that no information about the compaction state is provided during the compaction process and the achieved degree of density of the soil can only be verified afterwards.

In a recently completed research project the soil dynamics group at the TU Wien developed and patented the basic principles for the first online compaction system for Deep Vibro Compaction in cooperation with the company Keller Grundbau. The principle of the online control system is based on the dynamic interaction between the deep vibrator and the soil to be compacted. The ongoing changing compaction state of the soil influences the vibrator movement so that it can be used as a compaction indicator. The system can be simplified as an SDOF system providing a state-dependent stiffness indicator which for the first time allows the device- and process-integrated measurement of the particular compaction state.

The last project presented in the lecture summarized the investigation of the state-dependent track tamping process for ballast compaction of railroad tracks, which was carried out in cooperation with the company Plasser & Theurer. Measurements on different existing tracks and parameter studies with a developed theoretical simulation model show the potential to improve the tamping process and lead to the development of a Smart Tamping Tool, a tamping unit capable of determining the ballast bed condition on site. The research resulted in the PhD thesis of Olja Barbir from Rijeka being the first Croatian teaching and research associate at the Institute of Geotechnics at the TU Wien. Her highly appreciated contributions and the outcomes of her research were presented by herself. It is noted that the completion of the PhD process took place only two weeks before the lecture. Starting from Ervin Nonveiller's studies at the TH Wien more than nine decades ago, the lecture thus concluded with Croatian participation.

In conclusion, Professor Terzaghi already emphasized the importance of soil dynamics in his book "Soil Mechanics in Engineering Practice" in 1948 with the words "the effect of vibrations on soils may be harmful or beneficial, but it always deserves attention", which has definitely proved true. Like Terzaghi, Professor Nonveiller inspired generation of geotechnical engineers in Croatia and beyond both as "Teacher & Engineer" (Učitelj i inženjer). Modern, comprehensive theoretically and experimentally based research with the aim of application in practice can only be implemented with a motivated team of responsible staff, PhD students and Master students, cooperation with industry and companies is an indispensable component. In this way, vision can become reality and contributions to a prosperous development of society can be made. All the presented work of those who contributed to the soil dynamics research at the Institute of Geotechnics at the TU Wien made over the past 30 years is highly appreciated.

## **Zusammenfassung des Vortrags**

Ervin Nonveiller war einer der ersten Studenten von Karl von Terzaghi am neu gegründeten weltweit ersten Institut für Bodenmechanik an der damaligen Technischen Hochschule Wien. Der Lehrer Terzaghi war offensichtlich prägend und wegweisend für den Studenten Nonveiller, sodass dieser sein berufliches Leben ganz dem Grundbau und der Bodenmechanik widmete. Der Student wurde selbst zum Lehrer, den Eindruck vermittelnd, Terzaghis Spirit „theoretisch fundiert und praxisorientiert“ sein gesamtes Berufsleben diesem Grundsatz zu widmen.

Der diesjährige 18th Nonveiller Lecturer, Professor Dietmar Adam, ist der aktuelle Vorstand des Instituts für Geotechnik an der TU Wien, das Terzaghi vor 94 gegründet hat. Auch ist seine Forschung seit 30 Jahren geprägt von diesem Spirit. In seiner Nonveiller Lecture stellt er ausgewählte Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Bodendynamik vor, mit denen er sich von Beginn seit dem Jahre 1992 an auseinandergesetzt hat.

Verdichtung von Böden und Schüttmaterialien und deren Verdichtungskontrollen gehören zu den bedeutenden Themen der Geotechnik und hat in den letzten Jahrzehnten einen wahren Innovationsschub erfahren.

Ausgehend von den bodenmechanischen Grundlagen der Verdichtung wird aufgezeigt, dass das Wissen darüber entscheidend für das Verständnis jener Prozesse ist, die bei der Verdichtung von Böden und Schüttmaterialien auftreten. Verdichtung von nichtbindigen und bindigen Böden unterliegt völlig unterschiedlichen Mechanismen. Während nichtbindige Böden und granulare Materialien am besten dynamisch verdichtet werden können, ist dies bei bindigen Böden statisch bei gleichzeitigem Kneten und Aufreißen der Porenstruktur besser zu bewerkstelligen.

Herkömmliche Verdichtungskontrollen sind punktuelle Methoden, die entweder die Dichte bzw. den Verdichtungsgrad direkt bestimmen oder indirekt durch die erzielte Steifigkeit nachweisen. Eine innovative Methode stellt der dynamische Lastplattenversuch dar, mit dem eine schnelle und zuverlässige Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls erfolgt, der auf Basis jüngerer, umfangreicher Forschungsarbeiten mittlerweile dem statischen Verformungsmodul den Rang abgelaufen hat. Der Nachteil der punktuellen Verdichtungskontrolle bleibt jedoch.

Erst durch die Entwicklung der walzenintegrierten flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) ist eine arbeitsintegrierte und flächendeckende Verdichtungskontrolle durch die Interaktion zwischen der dynamisch angeregten Bandage und dem zu verdichteten Untergrund möglich. Das Konzept der oberflächennahen dynamischen Verdichtung wurde erstmals 1958 eingeführt, Vibrationswalzen gehören heute zu den am meisten verwendeten Verdichtungsgeräten weltweit. Das erste FDVK-System für Vibrationswalzen wurde 1978 patentiert, weitere Entwicklungen folgten, sodass heute vier verschiedene FDVK-Systeme auf dem Markt zur Verfügung stehen. In seinen frühen Forschungsarbeiten und in seiner Dissertation befasste sich der Vortragende eingehend mit der FDVK, womit erstmals die Prozesse während der FDVK-Anwendung physikalisch erklärt werden konnten. Darauf aufbauend erfolgte die Entwicklung von Walzen mit Regelung des Antriebs und in weiterer Folge von selbstregelnden Walzen zur optimierten dynamischen Walzenverdichtung. Die großen Vorteile der FDVK werden lediglich dadurch getrübt, dass die FDVK-Indikatoren nicht unabhängig von Geräte- und Prozessparametern sind und deshalb für jedes System Walze-Boden eine Kalibrierung mit punktuellen Methoden, vorzugsweise mit dem dynamischen Lastplattenversuch, durchgeführt werden muss. In Zusammenarbeit mit der Firma Hamm wurde in den letzten Jahren ein neuer FDVK-Indikator entwickelt und patentiert, der weitestgehend geräte- und prozessparameterunabhängig ist, und somit einen entscheidenden Fortschritt auf dem Gebiet der FDVK bedeutet.

Eine weitere Form der dynamischen Anregung wurde im Jahre 1982 mit der Oszillationswalze entwickelt. Lange Zeit galt eine FDVK mit diesem Walzentyp als nicht möglich, bis vor wenigen Jahren das erste funktionierende System in Zusammenarbeit mit der Firma Hamm entwickelt und patentiert worden ist.

Jahrelange Erfahrungen in der Umsetzung der FDVK führte dazu, dass dieses innovative, arbeitsintegrierte und flächendeckende Verdichtungskontrolle in einigen Ländern zum Standard erhoben wurde und aus der geotechnischen Praxis nicht mehr wegzudenken ist.

Die tiefe Verdichtung von granularen Böden wird heute vor allem mit der Rütteldruckverdichtung ausgeführt, bei der mittels Tiefenrüttler der Boden tiefreichend verdichtet und die Bodeneigenschaften homogenisiert werden. Patentiert wurde das Verfahren bereits in den Jahren 1933 und 1934. Bis dato erfolgte die Verdichtungskontrolle indirekt im Anschluss an die Verdichtung, zumeist mit Rammsondierungen oder CPT Tests. Nachteilig dabei ist, dass während des Verdichtungsprozess keine Informationen über den Verdichtungszustand verfügbar sind und die erzielte Lagerungsdichte der Böden erst im Nachhinein nachgewiesen werden kann.

In einem kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit der Firma Keller Grundbau wurden die Grundlagen für das erste Online-Verdichtungssystem für die Rütteldruckverdichtung entwickelt und patentiert, das auf der dynamischen Interaktion zwischen Rüttler und Boden beruht. Der aktuelle Verdichtungszustand des Bodens beeinflusst die Rüttlerbewegung, sodass diese als Verdichtungsindikator herangezogen werden kann. Das System kann vereinfacht als Einmassenschwinger betrachtet werden, dessen Steifigkeitskennwert als zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit erstmals die geräte- und prozessintegrierte Messung des Verdichtungszustandes ermöglicht.

Das letzte vorgestellte Projekt fasst die Untersuchung des zustandsorientierten Gleisstopfverfahrens zur Schotterverdichtung von Eisenbahngleisen zusammen, die in Zusammenarbeit mit der Firma Plasser & Theurer durchgeführt wurde. Messungen an verschiedenen bestehenden Gleisen und Parameterstudien mit einem entwickelten theoretischen Modell zeigen das Potential zur Verbesserung der Anwendung des Stopfverfahrens und führen zur Entwicklung eines Smarten Stopf-Tools, einem Stopfaggregat, das in der Lage ist, den Schotterbett-Zustand vor Ort zu bestimmen. Die Forschungsarbeiten führten zur Dissertation von Olja Barbir, die aus Rijeka stammt und die erste kroatische Mitarbeiterin am Institut für Geotechnik der TU Wien war und dort exzellente Arbeit geleistet hat. Olja Barbir stellte Ihre erst zwei Wochen davor abgeschlossene Dissertation selbst vor. Ausgehend vom Studium des Ervin Nonveiller an der TH Wien vor mehr als neun Jahrzehnten folgte somit der Abschluss des Vortrags mit kroatischer Beteiligung.

Professor Terzaghi betonte bereits 1948 in seinem Buch die Bedeutung der Bodendynamik mit den Worten „the effect of vibrations on soils may be harmful or beneficial, but it always deserves attention“, womit er recht behielt. So wie Terzaghi inspirierte auch Professor Nonveiller als „Lehrer & Ingenieur“ (učitelj i inženjer) Generation von Geotechnikern in Kroatien und darüber hinaus. Moderne, umfassende theoretisch und experimentell fundierte Forschung mit dem Ziel der Anwendung in der Praxis lässt sich nur mit einem motivierten Team an verantwortungsvollen Mitarbeitern, PhD Studenten und Master Studenten umsetzen. Der Zusammenarbeit mit Firmen stellt eine unerlässliche Komponente dar. So wird Passion zur Lebensgrundlage, Vision wird Realität, Beiträge zu einer gedeihlichen Entwicklung der Gesellschaft können geleistet werden. Allen, die in den letzten 30 Jahren am Institut für Geotechnik zur vorgestellten Forschung beigetragen haben, sei herzlichst gedankt.