

**PWP Tester – A simplified cyclic shear test for pore water  
pressure evolution in granular soils**

PWD-Tester – Vereinfachter zyklischer Scherversuch für den  
Porenwasserdruckaufbau in granularen Böden

at the Faculty of Civil Engineering at the Technical University of Dresden  
to obtain the academic degree of Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)  
submitted

**Dissertation**

Presented by:

M. Sc. Božana Bačić

Born at 9th April 1990 in Doboj, BiH

Reviewers:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Wichtmann

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wehr

## Abstract

The build-up of excess pore water pressure (PWP) usually takes place in loose, saturated, coarse-grained soils when subjected to external shear loading (monotonic or cyclic) under prevented water drainage. When the amount of the excess PWP reaches the value of the total stress, the grain structure collapses and the shear strength and stiffness of the soil disappear – the soil behaves as a liquid. Such soil phenomenon is commonly referred to as soil liquefaction. Experimental laboratory testing of the excess PWP build-up in coarse-grained soils is almost restricted to sophisticated undrained cyclic triaxial and simple shear tests.

A novel experimental method, the *PWP Tester*, enabling a simple and fast testing of the excess PWP accumulation in coarse-grained soils has been designed and presented in this thesis. The evolution of the excess PWP during cycling shearing of a cylindrical sand specimen in undrained conditions is measured during the test, and parameters characterising this evolution are determined. Besides an extensive repeatability study, the influence of several soil state variables, eg. soil density, consolidation pressure, or loading amplitude on the accumulation of the excess PWP was tested. It was shown that the generation of the excess PWP decreased with rising density and consolidation stress, while increasing loading amplitude resulted in faster excess PWP build-up, which confirmed the plausibility of the experimental method. A comparison with the results of undrained cyclic triaxial tests in the case of eight different sands demonstrated a good agreement between both experimental methods, which further corroborated the suitability of the proposed test for a fast investigation of the excess PWP build-up in coarse-grained soils.

Specimens prepared according to the proposed procedure in the *PWP Tester* are pluviated with a funnel under water. The extraction of the sand fabric from the  $\mu$ CT images acquired after the underwater deposition of different sands demonstrated a similar geometrical fabric for different grain size distributions. Despite having a very different relative density after underwater pluviation, which ranged from a loose to a dense state, a similar resistance to the accumulation of the excess PWP was obtained for different sands. These results have indicated that the same soil fabric prescribed by the same specimen preparation method has at least the same or even stronger impact on the excess PWP accumulation than (different) relative densities. The influence of different sand fabrics on the excess PWP evolution was further tested in the case of a coarse and a fine sand that were prepared via several different procedures. A large impact of the sand different fabrics on the excess PWP build-up was identified for the coarse sand, while the tests on fine sand resulted in a negligible influence of different grain compositions on the evolution of the excess PWP.

In total, 42 different materials, including natural sands as well as mixtures of glass beads and crushed sand were tested with the *PWP Tester*. The results on these materials have shown no clear trend of the excess PWP evolution with the main soil physical properties, eg. uniformity coefficient, mean grain diameter, and fines content. However, observing one soil property and keeping all other similar has shown that the resistance to the excess PWP accumulation rises with the mean grain diameter but reduces with an increase in the uniformity coefficient and fines content. The influence of different grain shapes and grain angularities was evaluated by performing tests on three sands with similar grain

size distribution curves. Here, a sand consisting of elongated and angular grains with a rather rough surface, exhibited lower relative density when deposited under water and showed a larger resistance to the excess PWP generation with growing density than sand with a more round grains having smoother grain surface. Different grain descriptors of these sands were determined using the dynamic image analysis and digital microscopy. The same analysis was performed for natural sand and mixtures of glass beads and crushed sand with the same grain size distribution curves. Glass beads and crushed sand were both more resistant to the excess PWP build-up than natural sand. This was attributed to a stronger fabric in the case of glass beads and a high angularity (and thus grain interlocking) of the crushed sand grains.

Furthermore, an idealized application of the PWP Tester results for in situ conditions was presented, where the calculation of the excess PWP evolution in a sand layer under specific density, stress and loading conditions was shown.

## Kurzfassung

Der Aufbau des Porenwasserdrucks (PWD) findet normalerweise in lockeren, wassergesättigten grobkörnigen Böden bei äußerer Scherbelastung (monoton oder zyklisch) unter verhinderter Wasserdrainage statt. Wenn die Menge des Porenwasserüberdrucks den Wert der totalen Spannung erreicht, zerfällt das Korngerüst und die Schersteifigkeit und Scherfestigkeit des Bodens verschwinden – der Boden verhält sich wie eine Flüssigkeit. Es ist üblich, solche Fälle als Bodenverflüssigung zu bezeichnen. Experimentelle Laboruntersuchungen des PWD-Aufbaus sind größtenteils auf anspruchsvolle undrainierte zyklische Triaxial- und Einfachscherversuche beschränkt.

In dieser Arbeit wurde ein neues experimentelles Verfahren, das eine einfache und schnelle Untersuchung des PWD-Aufbaus in grobkörnigen Böden ermöglicht, entwickelt und vorgestellt, der *PWD-Tester*. Dabei wird der Aufbau des PWDs während der zyklischen Scherung einer zylindrischen Sandprobe unter undrainierten Bedingungen gemessen und die Parameter, die diesen Aufbau beschreiben, werden bestimmt. Neben einer umfangreichen Wiederholbarkeitsstudie, wurde auch der Einfluss mehrerer Zustandsvariablen, z. B. Dichte, Konsolidationsspannung oder Belastungsamplitude auf den PWD-Aufbau untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Aufbau des PWDs mit zunehmender Dichte und Konsolidationsspannung abnimmt, während eine zunehmende Belastungsamplitude zu einem schnelleren PWD-Aufbau führt. Diese Ergebnisse haben die Plausibilität der experimentellen Methode bestätigt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der undrainierten zyklischen Triaxialversuche bei acht verschiedenen Sanden zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen beiden experimentellen Methoden, was die Eignung des vorgeschlagenen Versuchs für eine schnelle Untersuchung des PWD-Aufbaus in grobkörnigen Böden weiter untermauerte.

Die Herstellung der Bodenproben nach dem vorgeschlagenen Verfahren im PWD-Tester erfolgt mittels einer Trichterpluviation unter Wasser. Die Auswertung der Bodenstruktur verschiedener Sande aus den Röntgenbildern nach der Pluviation unter Wasser zeigte eine ähnliche geometrische Anordnung der Körner bei verschiedenen Korngrößenverteilungen. Trotz der sehr unterschiedlichen bezogenen Lagerungsdichte nach der Pluviation unter Wasser, die von einem lockeren bis zu einem dichten Zustand reichte, wurde für verschiedene Sande ein ähnlicher Widerstand gegen PWD-Aufbau festgestellt. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass die gleiche Bodenstruktur, entstanden durch die gleiche Herstellungsmethode, mindestens den gleichen oder sogar einen stärkeren Einfluss auf den PWD-Aufbau als die bezogene Lagerungsdichte hat. Der Einfluss verschiedener Korngrüste auf den PWD-Aufbau wurde an einem groben und einem feinen Sand, die nach verschiedenen Methoden hergestellt wurden, getestet. Ein großer Einfluss unterschiedlicher Kornanordnungen auf den Aufbau des PWDs wurde für den groben Sand festgestellt, während die Versuche mit feinem Sand einen vernachlässigbaren Einfluss ergaben.

Insgesamt wurden 42 verschiedene Materialien, darunter natürliche Sande sowie Mischungen aus Glaskugeln und Brechsand, mit dem PWD-Tester untersucht. Die Ergebnisse zeigten keinen klaren Trend des PWD-Aufbaus bei den wichtigsten physikalischen Eigenschaften des Bodens, z. B. Ungleichförmigkeitszahl, mittlerer Korndurchmesser und Feinanteil. Die Untersuchung einer Bodeneigenschaft und die Beibehaltung aller Anderen hat gezeigt, dass der Widerstand gegen des PWD-

Aufbaus mit dem mittleren Korndurchmesser zunimmt, jedoch mit zunehmender Ungleichförmigkeitszahl und Feinanteil abnimmt. Der Einfluss unterschiedlicher Kornformen und Kantigkeiten wurde durch Versuche an drei Sanden mit ähnlichen Korngrößenverteilungskurven bewertet. Ein Sand, der aus länglichen und kantigen Körnern mit einer rauen Oberfläche besteht, zeigte bei der Pluviation unter Wasser eine geringere bezogene Lagerungsdichte und wies einen größeren Widerstand gegen den PWD-Aufbau mit zunehmender Dichte auf, als der Sand mit runderen Körnern und einer glatteren Kornoberfläche. Verschiedene Korndeskriptoren wurden mithilfe der dynamischen Bildanalyse und der digitalen Mikroskopie bestimmt. Die gleiche Analyse wurde für einen natürlichen Sand und Mischungen aus Glaskugeln und Brechsand mit den gleichen Korngrößenverteilungskurven durchgeführt. Glaskugeln und Brechsand zeigten einen höheren Widerstand gegen den Aufbau des PWDs als natürlicher Sand. Dies wurde auf eine stabilere Struktur der Glaskugeln und eine hohe Kantigkeit (und bessere Verzahnung) der Körner beim Brechsand zurückgeführt.

Weiterhin wurde eine idealisierte Anwendung der Ergebnisse des PWD-Testers für in situ Bedingungen vorgestellt, wo die Berechnung des Aufbaus des PWDs in einer Sandschicht unter bestimmten Dichte-, Spannungs- und Belastungsbedingungen gezeigt wurde.