

Experimental Analysis of Impact Loading during Installation of Jack-up Units

von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Abteilung Bauwissenschaften
der Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Randa Adel Mahmoud Arafa,
Oakland, California, USA
Essen, 2017

Dissertation eingereicht am: 01.12.2016
Datum der mündlichen Prüfung: 16.03.2017

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K. Lesny
HafenCity Universität Hamburg

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Achmus
Leibniz Universität Hannover

Report Geotechnik
Universität Duisburg-Essen

43

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. E. Perau
Universität Duisburg-Essen

Randa Adel Mahmoud Arafa

**Experimental Analysis of Impact Loading
during Installation of Jack-up Units**

**SHAKER
VERLAG**

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5365-4

ISSN 2511-8544

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers der Schriftenreihe

Der Offshore-Windenergie kommt im Rahmen der geplanten Energiewende eine besondere Bedeutung zu. Der Bau von Offshore-Windparks mit zahlreichen Windenergieanlagen sowie Plattformen hat zu einem erhöhten Bedarf an Hubinseln oder Errichterschiffen geführt, mit denen die Bauwerke installiert werden.

Das Absetzen und Aufstellen derartiger mobiler Einheiten am jeweiligen Standort ist jedoch dem Einfluss von Wind und Wellen ausgesetzt. So kann es beim Absenken der Standbeine unter Wellengang zu einem unkontrollierten Aufprall auf den Untergrund kommen. Um die zugehörige Stoßkraft gering zu halten und damit eine hohe Belastung der Konstruktion zu vermeiden, werden diese Manöver sicherheitshalber nur bei sehr geringem Seegang durchgeführt, was jedoch die tatsächlich nutzbaren Installationsperioden erheblich einschränkt. Genauere Kenntnisse über die tatsächliche Größenordnung der auftretenden Stoßkräfte könnten die Grundlage für eine mögliche Aufweitung dieses engen Zeitfensters bilden.

In Heft 43 dieser Schriftenreihe befasst sich Frau Randa Arafa mit experimentellen Untersuchungen zum Absetzen der mobilen Plattformen und den mit dem Aufprall der Standbeine einhergehenden Stoßkräften sowie dem Einfluss dieses Vorgangs auf den Untergrund.

Die Arbeit ist in ihren wesentlichen Teilen von Frau Prof. Dr.-Ing. Kerstin Lesny (HafenCity Universität Hamburg), seinerzeit Akademische Oberrätin an unserem Fachgebiet initiiert und betreut worden.

Mein Dank gilt zunächst der Autorin, Frau Randa Arafa sowie der Betreuerin, meiner Kollegin Kerstin Lesny, für ihr Engagement. Ebenfalls gebührt dem Egyptian Ministry of Higher Education und dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für die Bereitstellung des Stipendiums für Frau Arafa im Rahmen der German Egyptian Research Long-Term Scholarship (GERLS) ein großer Dank. Ohne ihre Hilfe hätte die vorliegende Arbeit nicht entstehen können.

Essen, Juni 2017

Eugen Perau

Preface

The present work, a result of five years of research in the field of soil mechanics and foundation engineering at the University of Duisburg-Essen, would not have been possible without the help, encouragements and support of many persons.

I thank all of them and I am deeply grateful to all the help offered to me. Special thanks are due to my adviser, Professor Dr.-Ing. habil. Kerstin Lesny, who gave me the opportunity to work on the jack-up leg to seabed impact problem and reviewed the work thoroughly, moreover she encouraged me to be an independent thinker and to work in a creative way.

Profuse thanks go to Professor Dr.-Ing. Eugen Perau with whom I had the privilege to have long discussions that pushed forward the research. His generous provision of the funds needed for performing the experimental work is highly acknowledged.

I would also like to thank Professor Dr.-Ing. Martin Achmus, his precise reviewing of the complete thesis is highly appreciated. Special thanks to Professor Dr.-Ing. habil. Joachim Bluhm who honored me by being a member of my examination committee.

I would like to extend my gratitude to Mr. Jörg Nolzen for the technical assistance he provided during my experiments. Thanks to the spirit existing between the researchers in the soil mechanics Division of Civil Engineering especially to Mr. M.Sc. Nils Meteling and Mrs. M. Sc. Antonia Dahmen, the encouragement and support provided is highly appreciated.

Furthermore I would like to acknowledge the financial support provided by the Egyptian Ministry of Higher Education and the Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD). Without their German Egyptian Research Long-Term Scholarship (GERLS) I would not have been able to come to Germany and accomplish my doctoral dissertation.

I thank also my parents whose presence in the difficult periods was the greatest support. Their love and encouragements provided me with the necessary power to complete this work. I am extremely grateful to them.

Essen, June 2017

Randa Adel Arafa

Dedication

I would like to dedicate my thesis to my beloved grandparents, Professor Dr. Mohamed Ismail Rashed and Professor Dr. Hoda Barrada, who greatly inspired me.

This thesis is also dedicated to my beloved mother, Professor Dr. Ola Rashed, who has supported me all the way since the beginning of my studies and has been a great source of motivation. Her never ending moral support, prayers and unconditional love acted as a catalyst in my academic life.

Abstract

There is a global demand for producing clean and safe energy, which leads among others to the installation of offshore wind farms. Jack-ups are being used extensively for these offshore construction projects. Jack-ups are self-elevating mobile offshore units consisting mainly of a hull and three independent legs each resting on a spudcan. The spudcans typically have diameters ranging from 10 to 20 meters. The jack-up arrives on site floating on its hull with its legs elevated out of the water. The installation of the jack-up on the site starts by lowering the legs onto the seabed while the hull is in a floating condition. However, one of the main problems that may occur during the installation phase of a jack-up is the uncontrolled leg to seabed impact due to wave action. This impact can cause seabed instabilities and/or induce leg damage.

Relatively limited research is conducted in this area, and the current guidelines and regulations are not satisfactory. There is a well-known 1.5 m significant wave height limit set by industry for the installation phase. As a result the available working weather window for a jack-up unit is small, which will cause the loss of working hours and will pose an escalated capital loss.

Therefore, there is a need to investigate this problem thoroughly. In this study, experiments are conducted to gain better understanding of the impact problem. Scaling laws and the dimensional analysis are adopted. Experiments are performed using a 1-g small scale impact loading test with 1:50 scale. A tank and several leg/spudcan systems are designed and manufactured. The spudcan diameters are equal to 40 cm and 28.57 cm with solid and perforated legs. The leg/spudcan system is allowed to impact the soil in a tank under its own weight. The impact forces on the soil, total stresses and pore water pressure of the soil are measured for different drop heights, masses, different spudcan diameters and different inclinations to the vertical. The drop heights are chosen to mimic significant wave heights of 2.5, 5 and 8.5 meters and the masses are chosen according to the masses of existing jack-ups. The leg inclination simulates pitch and roll.

The experiments reveal that the impact force increases with the drop height and impact mass. However, for the same input parameters, the impact force and the excess total stresses of the leg/spudcan system with the 40 cm diameter are less than the spudcan/leg system with the 28.57 cm diameter. Hence it is recommended to use spudcans with bigger diameters. By analyzing the test results a dimensionless impact equation is obtained and validated. The proposed dimensionless expression can assess the impact force on the very dense sand for the boundary conditions used in this work. It can be used to evaluate the leg integrity under the acting impact force so that designers can modify the leg design if needed.

Zusammenfassung

Das Verlangen nach sauberer sowie sicherer Produktion von Energie führt weltweit zu der Fragestellung nach den Energiequellen. Hierbei besteht die Möglichkeit Windenergie aus Offshore-Windparks zu gewinnen. In Offshore-Windparks oder für andere Offshore Bauwerke werden Hubinseln zur deren Installation verwendet. Hubinseln sind mobile Arbeitsplattformen bestehend aus einem Rumpf und drei unabhängigen Beinen, sogenannte Spudcans, welche die Plattform mit dem Meeresboden verbinden. Der typische Durchmesser der Spudcans liegt zwischen 10 und 20 m. Um mit der Hubinsel ein Offshore Bauwerk errichten zu können, muss diese fest im Meeresboden verankert werden. Ein Hauptproblem beim Absenken der Beine ist der unkontrollierte Stoß eines Beines auf den Meeresboden infolge der Welleneinwirkung. Dieser Stoß kann zu einer Beeinträchtigung der Meeresgrundstabilität und/oder zur Beschädigung der Beine führen.

Zu diesem Thema liegen nur wenige Untersuchungen vor. Derzeitige Richtlinien reichen nicht aus. Die Industrie setzt eine maximale Wellenhöhe von 1,5 m während der Installation der Hubinsel an. Demnach ist das verfügbare Arbeitsfenster für die Hubinsleinheit relativ klein, da es vom Wetter abhängig ist. Der Verlust der möglichen Arbeitsstunden und die gezahlte Miete der Hubinsel führen zu massiven Kosten. Aufgrund der genannten Defizite wurden 1-g Modellversuche durchgeführt. Der Stoßbelastungstest erfolgte im Maßstab 1:50. Ein Tank und ein Bein/Spudcan wurden für den Modellversuch konstruiert. Die Durchmesser der Spudcans betragen 28,57 und 40 cm. Hierbei lagen sowohl perforierte als auch nicht perforierte Beine vor. Das Bein/ Spudcan wurde infolge der Schwerkraft auf den Boden des Versuchstanks fallen gelassen. Die Stoßkräfte auf den Boden, die totale Spannung und der Porenwasserdruck im Boden wurden gemessen. Im Rahmen der Versuche wurden verschiedene Fallhöhen, Massen, Spudcandurchmessern und Neigungen variiert. Die Fallhöhen sollten Wellenhöhen von 2,5 m, 5 m und 8,5 m simulieren. Die Massen wurden anhand der Gewichtskraft der Hubinseln bestimmt und auf das Modell übertragen. Die Neigungen sollten das Stampfen und Rollen der Wellen nachbilden. Die Versuche zeigen, dass die Stoßkraft mit zunehmender Fallhöhe und Stoßmasse ansteigt. Unter den gleichen Bedingungen sind die Stoßkräfte und Spannungen des Spudcans von 40 cm Durchmesser kleiner als die des Spudcans mit einem Durchmesser von 28,57 cm. Deswegen wird prinzipiell empfohlen, Spudcans mit größerem Durchmesser zu verwenden. Um die Stabilität des Bodens zu prüfen, werden die Eindringtiefe und die Tragfähigkeit berechnet. Durch die Analyse der Testresultate erhält man eine dimensionslose Gleichung, welche validiert und bestätigt werden konnte.

Mit der ermittelten dimensionslosen Gleichung ist es möglich, die Stoßkraft auf den dichten sandigen Meeresboden zu bestimmen und die Integrität des Beines unter der Einwirkung der Stoßkraft zu bewerten. Das Design des Beines kann bei Bedarf angepasst werden.

Table of Contents

1.	Introduction	15
1.1.	Use of jack-up units for installation of offshore structures	15
1.2.	Research needs	16
1.3.	Research aim and methodology.....	18
2.	Jack-up Construction and Operation	20
2.1.	Types of jack-up units	20
2.2.	Types of jack-up foundations	21
2.3.	Loads on a jack-up.....	24
2.4.	Modes of operation of jack-ups.....	27
2.5.	Problems during operation	30
2.5.1.	Punch through.....	31
2.5.2.	Footprints.....	34
2.5.3.	Impact.....	35
2.6.	Analysis of impact loading	37
2.6.1.	Physical process.....	40
2.6.2.	Existing impact approaches.....	48
3.	Small Scale 1-g Modeling.....	67
3.1.	Similitude theory and dimensional analysis	67
3.2.	Model experiments scaling.....	68
3.3.	Derivation of the π parameters.....	71
4.	Performance of 1-g Small Scale Impact Loading Test.....	77
4.1.	Test set-up	77
4.1.1.	Tank.....	78
4.1.2.	Model spudcan properties.....	80
4.1.3.	Instrumentation.....	85
4.2.	Test soil	89
4.3.	Test performance	92

- 5. Analysis of Test Results..... 97**
- 5.1. Effect of drop height and leg velocity 97
- 5.1.1. Effect of drop height..... 97
- 5.1.2. Effect of leg velocity 99
- 5.2. Effect of structural mass 108
- 5.3. Effect of the inclination of the leg..... 110
- 5.4. Excess stresses induced in the soil due to impact..... 114
- 5.5. Check of soil bearing capacity 125
- 5.6. Check of sliding..... 129

- 6. Application and Discussion..... 131**
- 6.1. Impact predication equation 131
- 6.2. Equation validation..... 143
- 6.3. Summary and guidelines 144

- 7. Future Work 146**
- 7.1. Soil condition..... 146
- 7.2. Geometry effect 147
- 7.3. Effect of leg stiffness 148
- 7.4. Numerical approach..... 149

- 8. Conclusions 151**

- References 153**

- Appendix A 162**

- Appendix B..... 166**