

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK, IWES

Schlussbericht zum

VERBUNDVORHABEN WINDBUCKET

Suction-Bucket-Gründungen als innovatives und

montageschallreduzierendes Konzept für

Offshore-Windenergieanlagen

- Gesamtanlagensimulation, kleinmaßstäbliche Modellversuche und Standortanalyse -

FKZ: 0325406A Laufzeit: 01.06.2012 – 30.09.2014 Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES Nordwest Projektpartner: OVERDICK, Leibniz Universität Hannover Assoziierter Partner: Senvion (ehemals REpower)

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325406A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Berichterstatter:

Tulio Quiroz, M.Sc. Dipl.-Ing. Urs Wihlfahrt Dipl.-Inf. Roland Samlaus Dipl.-Geol. Florian Meier Paul Poisson, B.Sc.

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Rüdiger Ernst

04. Mai 2015

Impressum

Quiroz, Wihlfahrt, Samlaus, Meier, Ernst, Poisson Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES Kontakt: Rüdiger Ernst Tel: +49 511 762-9274 Fax: +49 511 7629271 Merkurstraße 13 30419 Hannover / Deutschland www.windenergie.iwes.fraunhofer.de

Inhalt

Zusam	nmenfassung	5
Ι.	Kurzdarstellung	7
1.1	Aufgabenstellung	7
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	8
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	8
1.3.1	Bildung eines Gesamtanlagenmodells: OWEA mit Suction Buckets	8
1.3.2	Planung und Aufbau des Teststandes	9
1.3.3	Planung der kleinmaßstäblichen Modellversuche	
1.3.4	Arbeitsablauf bei der Durchführung der Modellversuche	
I.3.5	Standortanalyse	
1.4	Stand von Wissenschaft und Technik	
1.4.1	Auszug der verwendeten Fachliteratur zur Bewertung der	
	Forschungsergebnisse	12
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
11.	Eingehende Darstellung	
II.1	Verwendung der Zuwendung	
11.1.1	Präsentation der Ergebnisse	
II.2	Zahlenmäßiger Nachweis	62
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit	63
II.4	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	63
II.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	64
II.6	Veröffentlichung der Ergebnisse	65
II.6.1	Erfolgte Veröffentlichungen	65
II.6.2	Geplante Veröffentlichungen	65

Abkürzungen

ADC	Analog to Digital Converter, 37
ADCoS	Aero Dynamik Consult Aeroelastic Program, 8, 9, 16, 17, 24, 25, 26, 61
ANSYS	ANalysis SYStem Finite-Elemente-Software, 8, 16, 17,
ASAS-WAVE	ANSYS packages for Offshore Jacket Structures, 8, 17
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone, 6, 11, 62
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 6
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 6, 9, 11, 12, 24, 39, 48, 49, 52, 55, 56, 61
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 5, 7, 61
C-DLL	C-Interface Dynamic Link Library, 24, 26
DAC	Digital to Analog Converter, 37
DAKOTA	Dakota Software, 26
GPDN	Projekt Geopotenzial Deutsche Nordsee, 6, 53, 54
DLC	Auslegungslastfall, 21
DLL	Dynamic Link Library, 9, 24, 25, 26
ECM	Extremströmungsmodell, 21
EOG	extreme Betriebsbö, 21
EWH	extreme Wellenhöhe, 21
EWLR	extremer Wasserstandsbereich, 21
EWM	Extremes Windgeschwindigkeitsmodell, 20
IGtH	Institut für Geotechnik Hannover, 38, 39
LUH	Leibniz Universität Hannover, 38
PID-Regelung	Proportional–Integral–Derivative controller, 36, 37, 40
Python	Python programming language, 26

Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Zusammenfassung zum Schlussbericht werden die Untersuchungen und Ergebnisse des Forschungsvorhabens "WindBucket -Suction-Bucket-Gründungen als innovatives und montageschallreduzierendes Konzept für Offshore-Windenergieanlagen", das mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter der Förderkennzeichnen 0325406A gefördert wurde, vorgestellt. Im Verbundvorhaben wurde mit den Projektpartner OVERDICK, Leibniz Universität Hannover und dem assoziierten Partner Senvion (ehemals REpower) das Gesamtziel verfolgt, die Machbarkeit, die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen sowie die Schaffung der erforderlichen Grundlagen für die Planung, Bemessung und Errichtung von Suction-Bucket-Gründungen aus Stahl und Stahlbeton in deutschen Offshore-Gebieten zu beurteilen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die Forschungsaktivitäten in Arbeitspakete aufgeteilt und in enger Kooperation mit den Projektpartnern bearbeitet. Die Ergebnisse der Verbundpartner sind in separaten Schlussberichten präsentiert.

Dieser Schlussbericht fasst die Forschungsarbeiten und-ergebnisse der vom Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES bearbeiteten Arbeitspakete im Bereich Gesamtanlagensimulation, kleinmaßstäbliche Modellversuche und Standortanalyse zusammen.

Die Untersuchungen zur Gesamtanlagensimulation erfolgten mit einem Gesamtanlagenmodell, das aus einer 6,15 MW Offshore-Windenergieanlage und einer auf Suction Buckets gegründeten Jacket-Struktur, die vom Projektpartner Overdick ausgelegt wurde, gebildet wurde. Durch die arero-servo-hydro-elastischen Simulationen wurden die Auflagerkräfte für zwei repräsentative Basislastfälle aus Betriebs- und Extremlastfällen in zwei Iterationsschritten zwischen Strukturdesign (Overdick) und Lastenermittlung (Fraunhofer IWES) berechnet.

Für die ausführlichen Berechnungen mit vollständigen Lastfällen und detaillierter Abbildung der Boden-Struktur-Interaktion wurde ein Boden-Bucket-Modell mit nichtlinearen Federn erstellt, in das Gesamtanlagenmodell implementiert und für eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Verformungsverhaltens der Bucket-Gründung mit variierender Geometrie verwendet. Weiterhin wurden die Einwirkungen infolge eines Bemessungssturms für die Gründung gemäß den Anforderungen des Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) auf die einzelnen Suction Buckets ermittelt. Sie dienten zur Auslegung der Geometrie der Saugrohre der Jacket-Struktur sowie für die Planung und Festlegung des experimentellen Untersuchungsprogramms mit dem Schwerpunkt auf das axiale Tragverhalten eines einzelnen Buckets unter typischen Offshore-Lastsituationen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden in einem vom Fraunhofer IWES geplanten und aufgebauten Teststand für geotechnische kleinmaßstäbliche Modellversuche ausgeführt. Die Grundzüge des statischen, transienten und post-zyklischen Zugtragverhaltens konnten hier durch Experimente an einem Modell-Bucket im Maßstab 1:33 aufgezeigt werden. Für die numerische und experimentelle Umsetzung wurden für die Bucket-Installation und das axiale Bucket-Tragverhalten Modellgesetze und Skalierungsfaktoren mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie erarbeitet. Bei den Tests wurden statische Zugversuche (drainierte Tests) sowie Zugversuche mit variabler Hebungsrate (teilweise undrainierte bis undrainierte Tests) durchgeführt. Bei den letzten wurde eine Erhöhung des Zugwiderstands mit zunehmender Hebungsrate sowie eine Zunahme der Anfangssteifigkeit festgestellt.

Gegenwärtig wird diskutiert, inwieweit eine partielle Berücksichtigung des transienten Zugwiderstands, dementsprechend höhere Zugtragfähigkeit, infolge kurzseitigen Unterdrucks für die Bucket-Bemessung denkbar ist. Hierfür sind jedoch weitere experimentelle Untersuchungen, insbesondere in großem Maßstab erforderlich.

Des Weiteren wurde im Technikum auf Basis der Ergebnisse der Gesamtanlagensimulation ein Bemessungssturm für einen Bucket der Jacket-Struktur simuliert und anschlie-Bend das post-zyklische Tragverhalten des Modell-Buckets untersucht. Der postzyklische Zugtest zeigte, dass das axiale Tragverhalten nach dem simulierten Sturmereignis nicht beeinträchtigt wurde. Es wurde sogar eine größere post-zyklische Zugtragfähigkeit im Vergleich zu dem statischen Test ohne Belastungsgeschichte gemessen.

Im Rahmen der Standortanalyse "Baugrund für die Nordsee-AWZ Deutschlands" wurden geologische bzw. geotechnische Anwendungsrisiken für den Bucket-Einsatz als Offshore-Gründung erfasst und bewertet. Auf der Grundlage von verschiedenen Kartenunterlagen, eigenen geophysikalischen Untersuchungsergebnissen sowie weiteren Erkundungsdaten zum Baugrund (bes. seitens der BGR des BSH und des Projekts GPDN) wurde eine geotechnische Karte mit der Darstellung von Risikoklassen für den Bucket-Einsatz als Bauwerksgründung für die Nordsee-AWZ Deutschlands erstellt.

Für dieses Gebiet kann das Einsatzrisiko für eine Suction Bucket-Gründung danach als "überwiegend gering bis moderat" bewertet werden. In einigen Nordsee-Bereichen liegt jedoch auch ein erhöhtes Anwendungsrisiko für Buckets vor. Hierzu gehören beispielsweise "sehr weiche Schichten", "sehr wechselhafte Schichtenverhältnisse", z. B. in subglazialen Rinnenstrukturen oder auch ein "erhöhter Anteil von Kies/Steine/Blöcke" im Baugrund. Generell scheinen sich weite Gebiete, insbesondere auch die geplanten Windparkflächen in der deutschen Nordsee, prinzipiell für den Einsatz von Suction Bucket-Gründungsstrukturen zu eignen.

l . Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens WindBucket [BMWi-Förderkennzeichnen 0325406A, 2012-2014] ist die Beurteilung der Machbarkeit, der Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen sowie die Schaffung der erforderlichen Grundlagen für die Planung, Bemessung und Errichtung von Suction-Bucket-Gründungen aus Stahl und Stahlbeton in deutschen Offshore-Gebieten. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundvorhaben des Fraunhofer IWES mit dem Projektpartner OVERDICK und der Leibniz Universität Hannover sowie dem assozierten Projektpartner Senvion (ehemals REpower) wurde der Einsatz von Suction Buckets als innovativ und umweltfreundliches Gründungskonzept für Offshore-Windenergieanlagen untersucht.

Dieser Abschlussbericht fasst die Ergebnisse der durch das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des Verbundvorhabens WindBucket zusammen.

Ziele der hier beschriebenen Arbeiten sind numerische Simulationen und experimentelle Untersuchungen im kleinen Maßstab, die zu einem besseren Verständnis des Gesamtstrukturverhaltens einer Suction-Bucket-Gründung beitragen sollen. Um dies zu ermöglichen, ist ein Gesamtanlagenmodell einer Offshore-Windenergieanlage (OWEA) mit Saugrohre für die Gründung zu erstellen sowie ein Versuchsstand für die Durchführung von geotechnischen Modellversuchen an einzelnen Suction Buckets zu entwickeln. Voraussetzung dafür sind Kenntnisse der physikalischen Zusammenhänge und die Erarbeitung von Modellgesetzen für die numerische und physikalische Abbildung des Demonstrators.

Das Gesamtanlagenmodell ermöglicht die Ermittlung von Extrem- und Betriebslasten, die für die Auslegung und Dimensionierung der Gründung als auch zur Charakterisierung der zyklischen Lasteinwirkungen genutzt werden. Mit dem Demonstrator lassen sich die numerischen Modelle validieren sowie spezifische Aspekte des komplexen Tragverhaltens einer Bucket-Gründung besser verstehen. Um Aussagen bezüglich der Eignung von Suction Buckets für die deutsche Nordsee treffen zu können, ist eine Standortanalyse unter Berücksichtigung der oberflächennahen Sedimentverteilung und der potentiellen geologischen und geotechnischen Risiken hinsichtlich Installation und Tragverhalten durchzuführen. Daraus ergeben sich Orientierungskarten für die deutsche Nordsee, in denen die prinzipielle Eignung des Baugrunds für eine Suction-Bucket-Gründung darzustellen ist.

Das langfristige Ziel bei der Antragserstellung war den Planern und Konstrukteuren von Offshore-Gründungen die Möglichkeit zu eröffnen, Bucket-Fundamente als umweltfreundliche und wirtschaftliche Gründungsvariante in ihre Planungen miteinzubeziehen. Hieraus ergeben sich als übergeordnete Ziele die Kostenreduzierung von OWEA-Gründungsstrukturen sowie die Realisierbarkeit umweltverträglicher Installations- und Deinstallationsmethoden zu nennen.

I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Die Forschungsgebiete des Fraunhofer IWES umfassen das gesamte Spektrum der Windenergietechnik von der Windphysik bis zur Netzspeisung. Das Institut besitzt eine umfassende Erfahrung in der Gesamtanlagendynamik von Windenergieanlagen in Wechselwirkung mit Wind, See, Baugrund und elektrischem Netz. Die fundierten Fachkenntnisse des Instituts im Bereich aero-servo-hydro-elastische numerische Simulationen von Offshore-Windenergieanlagen haben sich in den letzten Jahren durch den Entwurf von neuartigen Modellen zur Anlagensimulation und der Implementierung von selbstentwickelten Softwares z.B. OneWind (Strobel et al., 2011) erweitert.

Im Bereich Tragstrukturen liegen die Schwerpunkte des Instituts auf dem Gebiet der numerischen Simulationen zur Bemessung und zur dynamischen Analyse von OWEA-Gründungsstrukturen. Hierzu gehören Untersuchungen zu gekoppelten hydraulischen und mechanischen Prozessen im Boden und zur Analyse der Boden-Struktur-Wechselwirkungen.

Das Fraunhofer IWES verfügt über eine umfangreiche Expertise bei der numerischen Simulation von Trag- und Gründungsstrukturen von Offshore Windenergieanlagen, im Bereich des mechanischen, zyklischen und dynamischen Tragverhalten sowie im Bereich Korrosionsschutz und Monitoring. Des Weiteren gehören die Konzeption, Durchführung und Auswertung von geotechnischen Labor- und Modellversuchen zu den Fachkompetenzen des Instituts, die in den letzten Jahren aus vielfältigen Projektbearbeitungen (Consulting, F+E, Prüfungen etc.) resultieren.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Planung und den Ablauf des Vorhabens wurden folgende Tätigkeiten erarbeitet:

- Bildung eines Gesamtanlagenmodells für eine OWEA mit Suction Buckets für die Lastenermittlung und Durchführung von Sensitivitätsanalysen
- Planung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Teststandes für kleinmaßstäbliche Modellversuche
- Erarbeitung von Modellgesetze, numerische Simulationen und Planung der Modellversuche
- Standortanalyse zur Eignung von Suction-Bucket-Fundamenten für die deutsche Nordsee

I.3.1 Bildung eines Gesamtanlagenmodells: OWEA mit Suction Buckets

Folgende Tätigkeiten wurden bei der Bildung des Gesamtanlagenmodells ausgeübt:

- Erstellung eines Balkenmodells für die Tragstruktur mit dem Programm ANSYS
- Umwandlung der Angaben des ANSYS-Modells in zwei Modelle:
 - o Turm und Jacket-Struktur für die ADCoS-Gesamtanlagensimulation
 - o Jacket-Struktur für die ASAS-WAVE hydrodynamische Simulation
- Berechnung von Wellenlasten in ASAS-WAVE und Implementierung in die Gesamtanlagensimulation
- Vorbemessung mit repräsentativen Lastfällen
- Lastenbestimmung für zwei Lastfälle "Geparkt" und "In Betrieb"
- Plausibilitätskontrolle und Modellanpassungen
- Aufbau eines Modells für die Interaktion zwischen Boden und Suction Bucket mit Implementierung von Funktionen zur Berechnung der Bucket-Verschiebungen

Kurzdarstellung

- Berechnung von Ermüdungslasten für einen 35h-BSH-Bemessungssturm
- Erstellung eines Interface zwischen dem Programm ADCoS und dem Suction-Bucket-Modell mit Erzeugung einer DLL mit Modellparametern
- Implementierung des Modells Suction-Bucket-Boden in die Gesamtanlagensimulation
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen mit Parametervariation

I.3.2 Planung und Aufbau des Teststandes

Folgende Vorbereitungsarbeiten wurden bei der Planung und Herstellung des Teststandes für die kleinmaßstäblichen Modellversuche durchgeführt:

- statische Berechnung zur Dimensionierung des Versuchsbehälters und der gesamten Stahlkonstruktion für die Belastungseinrichtung
- Erstellung von konstruktiven Zeichnungen des Teststandes mit Stückliste
- Erstellung eines Lastenhefts mit Leistungsbeschreibung, Leistungsverzeichnis sowie konstruktive Zeichnungen zur Ausschreibung der Bauleistung
- Planung und Bau des Füll- und Abflusssystems im Versuchsbehälter
- Planung, Beschaffung und Zusammenbau von diversen Komponenten für den optimalen Betrieb des Versuchstandes (z.B. Manometer, Schläuche, Absperrschieber, Zubehör, Rohrleitung, Kreiselpumpe, Wasserbehälter 1000l, Filterschichten, etc.)
- Zusammenbau des Teststandes und Füllung mit dem Modellsand (ca. 3 m³)

Die Bauphasen des Teststands bis zur Füllung des Versuchsbehälters mit dem Modellsand zeigen Abbildung I.1 bis Abbildung I.3





Abbildung I.1: Fertigung des Teststands und Lieferung in die Testhalle

Kurzdarstellung





Abbildung I.2: Positionierung und Zusammenbau des Teststands





Abbildung I.3: Füllung des Testbehälters mit dem Modellsand

I.3.3 Planung der kleinmaßstäblichen Modellversuche

Für die Planung der Modellversuche wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Erarbeitung von Modellgesetzen und Entwicklung von Skalierungsmodellen
- Auswahl des Modellsands und grundlegende geotechnische Charakterisierung im bodenmechanischen Labor
- Erstellung eines numerischen Modells zur Versuchsauslegung
- Definition und Abstimmung der Testziele und des Testprogramms
- Erstellung eines numerischen Modells des Testobjekts (Suction Bucket) in der Testumgebung (Versuchsbehälter mit Sand) für die statischen Berechnungen
- Erstellung von technischen Dokumenten für die Herstellung und Beschaffung des Aktuatorsystems zur Lastaufbringung, der Messtechnik und der zusätzlichen Komponente des Teststandes, einschließlich Sensoren und Teststruktur (Suction Bucket)
- Erarbeitung eines Testprogramms sowie eines Messkonzepts
- Auslegung, Beschaffung und Montage von Hilfskonstruktionen für die Versuchsdurchführung (Messbrücke, Installationshilfe, etc.)
- Durchführung von Vorversuchen zum reproduzierbaren Einbau des Modellsandes
- Kalibrierung der Messtechnik

- Zusammenbau, Inbetriebnahme und Vorversuche zur Prüfung der Funktionalität der wichtigen Komponenten (Hydrauliksystem, Aktuator, Regler, Bedienungssoftware, etc.)
- Erstellung eines Lastenhefts

I.3.4 Arbeitsablauf bei der Durchführung der Modellversuche

Bei der Durchführung der Modellversuche wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Flutung der Testumgebung und Auflockerung des Modellsandes mittels eines nach oben gerichteten hydraulischen Gradients
- Einbau des Führungsrahmens für den Einsatz des Rüttlers zur Sandverdichtung
- Sandverdichtung mittels Rütteldruckverdichtung und Abbau des Führungsrahmens
- Senkung des Wasserstands bis zu 1 cm unter der Sandoberfläche
- Aufbereitung der Sandoberfläche
- Anschließen des Modell-Buckets an den Aktuator bzw. an die Kraftmessdose
- Einstellung des Wasserstands
- Einrichten des Aktuators, der Versuchs- und Systemgrenzen, der Speicherfrequenz sowie Programmieren des Installations- und Belastungsablaufs
- Montage der Messbrücken und ggfs. Messsensoren
- Bucket-Installation mit offenen Luft- und Wasserventilen (mit Einpresskraft, ohne Unterdruck)
- Einbau Zwischenstücke und Kontrolle der Lotrechte zwischen Installationsschritte
- Durchführung der Experimente und Erstellung des Versuchsprotokolls
- Visuelle Inspektion
- Verdichtungskontrolle (Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125-2:2011-03)
- Deinstallation der Teststruktur vom Sand mittels Druckluft

Die durchgeführten Modellversuche mit dem Modell-Bucket D270 sind in Tabelle I-1 zusammengestellt.

Tabelle I-1: Durchgeführte Modellversuche mit dem Modell-Bucket D270

	Art des Versuches	Anzahl der Versuche
Ι	Installationstests	5
SZ	Statischer Zugversuch	2
HH2	Hohe Hebungsrate V=2 mm/s	1
HH8	Hohe Hebungsrate V=8 mm/s	1
ZBSH	Zyklisch, BSH-Bemessungssturm	1
SPZ	statisch post-zyklisch	1

I.3.5 Standortanalyse

Die Untersuchungen umfassten hier die folgenden Arbeiten:

- Untersuchung und Charakterisierung der Baugrundtypen in der deutschen Nordsee
- Bewertung der Installation- und Betriebsrisiken für Suction Bucket
- Darstellung der oberflächennahen Sedimentverteilung im Bereich der Deutschen Bucht
- Auswertung des Datenmaterials zur Beschaffenheit des Baugrunds in der deutschen Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ)
- Bewertung der klassifizierten Bodengruppen hinsichtlich der Installierbarkeit und des Tragverhalten von Suction Buckets

- Erfassung der geologischen und geotechnischen Anwendungsrisiken hinsichtlich Installation und Tragverhalten für Bucket-Gründungen in der Nordsee
- Erstellung von Orientierungskarten zur Eignung einer Suction Bucket-Gründung unter Berücksichtigung möglicher Installations- oder Betriebsrisiken

I.4 Stand von Wissenschaft und Technik

Der Stand von Wissenschaft und Technik, der relevant für dieses Vorhaben ist, wurde in der Vorhabenbeschreibung des Forschungsantrags erarbeitet.

I.4.1 Auszug der verwendeten Fachliteratur zur Bewertung der Forschungsergebnisse

Zur Bewertung der Forschungsergebnisse wurde folgende Literatur verwendet:

- Achmus, M., Thieken, K., Akdag, C. T., Schröder, C. and Spohn, C. (2013). Load bearing behaviour of bucket foundations in sand. In Proceeding of the 3rd International Symposium on Computational Geomechanics (ComGeoIII), Krakov, 586-597
- (2) Achmus, M., Thieken, K. (2014): "Numerical Simulation of the Tensile Resistance of Suction Bucktes in Sand", Proceedings of the 24th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)
- (3) Ahlinhan M. (2011): Untersuchungen zur inneren Erosionsstabilität nichtbindiger Böden. Institut für Geotechnik Hannover IGtH. Heft 72. Dissertation. Leibniz Universität Hannover.
- (4) API(200): API RP 2A-WSD. API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing
- (5) Fixed Offshore Platforms Working Stress Design (2000).
- (6) Armaleh, S. and Desai, C. (1987). "Load-Deformation Response of Axially Loaded Piles." J. Geotech. Engrg., 113.
- (7) Blochwitz, Torsten und Otter, Martin und Arnold, Martin und Bausch, Constanze und Clau
 ß, Christoph und Elmqvist, Hilding und Junghanns, Andreas und Mauss, Jakob und Monteiro, Manuel und Neidhold, Thomas und Neumerkel, Dietmar und Olsson, Hans und Peetz, Jörg-Volker und Wolf, Susann (2011), "The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models", In: Proceedings of the 8th International Modelica Conference, 8th International Modelica Conference, 2011, Dresden.
- (8) BSH (2012): Anwendungshinweise für den Standard "Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen" des BSH. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. 2012
- (9) Bye A., Erbrich, C., Rognlien B., Tjelta, T.I. (1995): Geotechnical Design of Bucket Foundations. In 27th Annual Offshore Technology Conference (OTC). Houston, Texas, USA. 1-4 May 1995. pp. 869-883
- (10) Byrne, W.B. (2000): Investigations of Suction Caissons in Dense Sand. PhD Thesis. University of Oxford
- (11) Cotter O. (2009): The Installation of Suction Caisson Foundations for Offshore Renewable Energy Structures. PhD Thesis. University of Oxford
- (12) DGGT (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" EA-Pfähle. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. Ernst & Sohn. 2012
- (13) DIN 18196:2011-5: Erd- und Grundbau –Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- (14) DIN EN ISO 14688-1: 2013-12: Geotechnische Erkundung und Untersuchung Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden –

Teil 1: Benennung und Beschreibung

- (15) DIN 18123: 2011-4: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben –Bestimmung der Korngrößenverteilung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin.
- (16) DIN 18127:2012-09: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben Proctorversuch
- (17) DIN 18126: 1996-11: Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung
- (18) DIN 18125-2:2011-03: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 1: Feldversuche
- (19) DIN 1054:2010-12 (2010): Baugrund, Standsicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau Ergänzende Regeln zu DIN EN 1997-1 (2009)
- (20) DIN EN 14688-1, 2003. Geotechnische Erkundung und Untersuchung Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden Teil 1: Benennung und Beschreibung (EN ISO 14688-1:2002). DIN Deutsches Institut für Normierung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 15 S.
- (21) EAU (2004): Empfehlungen des Arbeitsaussschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen EAU 10. Auflage 2004". Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.
- (22) El Naggar, M. and Novak, M. (1994). "Nonlinear Axial Interaction in Pile Dynamics." J. Geotech. Engrg., 120.
- (23) Feld T. (2001): Suction Buckets, a New Innovative Foundation Concept, applied to Offshore Wind Turbines. PhD. Thesis Aalborg University
- (24) Fellin W. (2000): Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem. (Deep vibration compaction as plastodynamic problem). Balkema. University of Innsbruck, Institute of Geotechnics and Tunnelling
- (25) Figge, K., 1981. Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Blatt: 2900, Maßstab: 1:250.000). Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.
- (26) Foglia, A., Ibsen, L.B: (2013): A Similitude Theory for Bucket Foundations under Monotonic Horizontal Load in Dense Sand. Geotechnical and Geological Engineering Vol. 31 (1). Pp 133-142
- (27) Foglia, A. and Ibsen, L. B. (2014): Laboratory experiments of bucket foundations under cyclic loading. DCE Technical report No. 177, Department of Civil Engineering, Aalborg University
- (28) Foglia, A. and Ibsen, L. B. (2014a): Monopod bucket foundations under cyclic lateral loading. DCE Technical Memorandum No. 49, Department of Civil Engineering, Aalborg University
- (29) Foglia, A., Govoni, L., Gottardi, G. and Ibsen, L. B. (2014): Investigations on macro-element modelling of bucket foundations for offshore wind turbines. DCE Technical Memorandum No. 48, Department of Civil Engineering, Aalborg University
- (30) Foglia, A., Ibsen, L.B., Nielsen, S.K., Mikalauskas L. (2013): A Preliminary Study on Bucket Foundations under Transient Lateral Loading. In Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering Anchorage. ISOPE, Alaska, USA. pp. 465- 471
- (31) Folk, R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. Journal of Geology 62, 344-359.
- (32) Folk, R.L., 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Co., Austin, 182 S.
- (33) Franey, S. (2014): Trial Installation Project. In UF-Workshop 25th. February 2014, Hamburg
- (34) GL (2012): Guideline for he Certification of Offshore Wind Turbines. Germanischer Loyd
- (35) Hansteen, O.E., Jostad, H.P., Tjelta, T.I. (2003): Observed plattform response to a "monster" wave. Field Measurements in Geomechanics, Myrvoll (ed.). pp. 73-86

- (36) Hettler, A. (1983): Modelluntersuchungen für Gründungen in Sand. Bauingenieur 58 (1983) S. 41-48. Springer Verlag
- (37) Houlsby, G.T., Martin, C.M., Byrne, B.W., Kelly, R.B., Hazel, E.J., Nguyen-Sy,L., Villalobos F.A., Ibse, L.B. (2005): Research on Offshore Foundations: Papers at the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Perth, Australia, 2005. Report No. OUEL 2275/05. University of Oxford. Department of Engineering Science
- (38) Houlsby, G.T., Byrne, B.W. (2005): Design Procedures for installation of suction caissons in sand. Geotechnicak Engineering 158. July 2005. Issue GE3. Pp. 135-144
- (39) Houlsby, G.T., Kelly, R.B., Huxtable, J., Byrne. B.W. (2006): Field trials of suction caissons in sand for offshore wind turbine foundations. Géotechnique 56, No. 1. pp. 3-10
- (40) Huuse, M. and Lykke-Andersen, H., 2000. Overdeepend Quaternary valleys in the easternDanish North Sea: Morphology and origin. Quatern. Sci. Rev., 19: 1233-1253.
- (41) IEC 61400-3 (2009), Wind turbines Part 3: Design requirements for offshore wind turbines.
- (42) Ibsen, L.,B., Liingaard, M., Nielsen, S.A. (2005) Bucket foundation, a status. In: Proceedings of Copenhagen offshore wind 2005, 26–28 October, Copenhagen, Denmark. 2005.
- (43) Johansson P., Aas, P.M., Hansen, S.B. (2003): Field model tests for a novel suction anchor application. Field Measurements in Geomechanics, Myrvoll (ed.). pp. 145-153
- (44) Kalka, S., 2006, Quartäre Rinnen im Nordwesten der deutschen Nordsee, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, p. 37.
- (45) Kelly, R.B., Houlsby, G.T. and Byrne, B. W. (2006), Transient vertical loading of model suction caissons in a pressure chamber, Report OUEK 2291/06. Departmane of Engineering Science, University of Oxford, United Kingdom.
- (46) Kelly, R.B., Houlsby, G.T., Byrne, B.W. (2006): A Comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay. Géotechnique 56, No. 9. pp. 617-626
- (47) Kraft, L.M, Ray, R.P., and Kagawa, T., 1981, "Theoretical T-Z Curves", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Volume, 107.
- (48) Larsen K.A. (2008): Static Behavior of Bucket Foundations Vol. 1. PhD Thesis. Aalborg University. DCE Thesis No. 7. Department of Civil Engineering. 2008
- (49) LeBlanc, C. (2009): Design of Offshore Wind Turbine Support Structures. Ph.D. thesis. Aalboorg University
- (50) Lee, J. and Salgado, R. (1999). "Determination of Pile Base Resistance in Sands." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 125.
- (51) Lesny, K. (2008): Gründung von Offshore-WindenergieanlagenWerkzeuge für Planung und Bemessung. VGE Verlag
- (52) Manzotti; E., Vaitkunaite, E., Ibsen L.B. (2014): Laboratory Setup for Vertically Loaded Suction Caisson Foundation in Sand and Validation of Responses, DCE Technical Memorandum No. 41, Department of Civil Engineering, Aalborg University
- (53) Naumann, M., Schwarz, C., Fritz, J., Zeiler, M., 2012. Geopotenzial Deutsche Nordsee. Modul B, Dokumentation Nr. 2. Erstellung der Karte zur Sedimentverteilung auf dem Meeresboden in der deutschen Nordsee nach der Klassifikation von FOLK (1954, 1974)
- (54) Schwarz, C., 1996. Neue Befunde zur Verbreitung und Dimension pleistozäner Rinnensysteme auf dem deutschen Nordseeschelf. Geologisches Jahrbuch, Reihe A, 146: 233-244.
- (55) Senders M. (2008): Suction Caissons in Sand as Tripod Foundations for Offshore Wind Turbines. PhD Thesis. University of Western Australia
- (56) Simulia (2012): Dassault Systemes Simulia Corp. ABAQUS/CAE 6.12

Kurzdarstellung

- (57) Strobel, M., F. Vorpahl, C. Hillmann, X. Gu, A. Zuga, und U. Wihlfahrt (2011): The OnWind Modelica Library for Offshore Wind Turbines - Implementation and first results. In International Modelica Conference. Dresden, 2011
- (58) Villalobos F.A. (2006): Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines. PhD Thesis. University of Oxford
- (59) Walz, B. (2006): Möglichkeiten und Grenzen bodenmechanischer 1g-Modellversuche
- (60) Wernick, E. (1978): Tragfähigkeit zylindrischer Anker in Sand. Veröff. Inst. Bodenmechanik Felsmechanik Univ. Karlsruhe, 1978
- (61) Wood, D.M. (2004): Geotechnical Modelling CRC Press
- (62) Zhu, B., Byrne, B. W., Houlsby, G. T. (2013). Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 139, No. 1, 73-83

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die hier vorgestellten Arbeiten zum Verbundvorhaben WindBucket wurden ausschließlich von Mitarbeitern des Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES durchgeführt.

l I . Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung

Im Folgenden werden die geleisteten Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWES (FhG IWES) im Verbundprojekt WindBucket beschrieben. Bei der Projektdurchführung wurden von der bewilligten Zuwendung ca. 82% für Personal, 12% für Investitionen und 6% für zusätzliche Kosten und Dienstreisen vorgesehen.

II.1.1 Präsentation der Ergebnisse

Es wurden Gesamtanlagensimulationen für eine OWEA mit einer Suction-Bucket-Gründung durchgeführt sowie Sensitivitätsanalysen nach der Implementierung eines Bodenmodells zur Abbildung der Bucket-Boden-Interaktionen verwendet. Experimentelle Arbeiten wurden in einem vom FhG IWES entwickelten Teststands für kleinmaßstäbliche Modellversuche durchgeführt. Im Teststand wurden Aspekte des axialen Bucket-Tragverhaltens untersucht. Begleitend wurden numerische Modelle und Skalierungsmodelle sowie eine Orientierungskarte zur prinzipiellen Eignung von Suction Buckets für die deutsche Nordsee erstellt. Die numerischen und praktischen Arbeiten wurden entsprechend des Forschungsantrages vom 13.07.2011 ausgeführt.

II.1.1.1 Repräsentative Basislastfälle

Es wurden zwei Extremlastfälle (siehe Abschnitt II.1.1.3) simuliert, um Anfangswerte für die Auflagerkräfte zu ermitteln. Das Simulationsmodell bestand aus einer 6.15 MW Turbine auf einem vierbeinigen Jacket, das von der Firma Overdick ausgelegt wurde. Beide Lastfälle wurden für je zwei Wind- /Strömungsrichtungen und mit zwei verschiedenen Randbedingungen untersucht. Die Simulationen wurden zweimal durchgeführt, da bei dem Anfangsmodell Unstimmigkeiten zu den von den Partnern Senvion (ehemals REpower) und Overdick gelieferten Ergebnissen auftraten.

II.1.1.2 Das Modell

Zuerst wurde ein Balkenmodell in das Programm ANSYS (Abbildung II.2) nach der Zeichnung von Overdick (Abbildung II.1) erstellt. Anschließend wurde das Modell in das Gesamtanlagensimulationstool ADCoS überführt (Abbildung II.3).



Abbildung II.1: Zeichnung von Overdick

Abbildung II.2: Balkenmodell Ansys

Abbildung II.3: ADCoS Gesamtanlagesimulations-modell

Eigenschaften der Rohrquerschnitte wurden in ANSYS definiert und die Dichte des Materials je nach Wassertiefe bestimmt, um Bewuchs, innerhalb der Struktur befindliches Wasser und mitschwingende Masse in das Modell miteinfließen zu lassen. Die Angaben des ANSYS-Modells wurden außerdem für die Jacket-Struktur bei der hydrodynamischen Simulation mit ASAS-WAVE übernommen.

Für die Gesamtanlagensimulation wurden Wellenlasten in ASAS-WAVE berechnet und als Zeitreihenlasten verwendet.

Nachdem Unterschiede in den Modellen festgestellt wurden, sind Änderungen vorgenommen worden, um das Modell an die Vorgaben anzupassen. Dadurch wurden konservativere Ergebnisse berechnet als im ersten Durchlauf. Folgende Änderungen wurden durchgeführt:

- Die Verbindungen der Balken wurden verbessert
- Fehlende Glieder oberhalb der Plattform wurden hinzugefügt
- Zusätzliche Abstützungen der Buckets bzw. Beine wurden hinzugefügt
- Der Widerstandsbeiwert wurde erhöht

Da das Modell aus Balkenelementen aufgebaut ist, überschneiden sich die Rohrwände an den Verbindungen, wo mehrere Rohrachsen in einem Punkt zusammenkommen (siehe Abbildung II.4). Die Eigenschaften der verbundenen Elemente wurden angepasst, damit die Masse des Stahls, des marinen Bewuchses und des innenstehenden Wassers nicht zu hoch angenommen wurde.



Abbildung II.4: Teilweise gedeckte Elemente fügen keine Masse hinzu

Zusätzlich wurden die Abstützungen zwischen den Buckets und den Beinen mit großen Rohrelementen modelliert, um die hydrodynamischen Kräfte konservativ zu berechnen. Die zusätzlichen Rohrelemente tragen 50 m² Oberfläche pro Fuß bei. Dieser Wert ist eine grobe Schätzung, jedoch identisch zu den von Overdick angesetzten Werten. Weiterhin wurde bei der ersten Berechnung der hydrodynamische Widerstandsbeiwert der Rohre mit 1,0 angesetzt. In den späteren Simulationen wurde ein konservativerer Wert von 1,2 benutzt, was in (GL 2012, Table 4.H.1) für raue Zylinder mit Re > 2x10⁵ definiert ist.

Eingehende Darstellung

II.1.1.3 Die Lastfälle

Die ersten Simulationen wurden für Wind- und Strömungsrichtungen von sowohl 0° als auch 45° durchgeführt (Abbildung II.5). Dabei zeigte sich, dass die extremsten Lasten immer bei 45° auftreten. Aus diesem Grund wurden die unten beschriebenen Lastfälle bei den nächsten Simulationen nur mit Wind- und Strömungsrichtungen von 45° durchgeführt. Beide Modelle wurden sowohl mit gelenkig gelagerten Fußknoten als auch mit voll eingespannten Fußknoten simuliert.



Abbildung II.5: Zwei Richtungen und zwei Auflagerungen

II.1.1.4 Lastfall-1: Geparkt

Nachfolgend sind in Tabelle II-1 die Eingangswerte für den ersten Lastfall aufgelistet:

Wind => Deterministisch, EWM			
Parameter	Wert	Einheit	Anmerkung
Richtung	0° & 45°		Zwei Richtungen werden untersucht.
10-Minute-Mittelwert	45,0	m/s	50-Jahre, Tabelle 7-27, Entwurfsgrundlagen.
3-Sekunde-Mittelwert	53,5	m/s	50-Jahre, Tabelle 7-27, Entwurfsgrundlagen.
Höhenexponent	0,14		1
Yaw-Ausrichtungsfehler	±15°		IEC 61400-1, Abschnitt 6.3.2.1 (EWM)
Anströmungwinkel	0°		IEC 61400-3, 2009, Abschnitt 6.3
Welle => Extreme Wave Height	(Stream Fu	unction The	eory, 9th Order)
Richtung	0° & 45°		Zwei Richtungen werden untersucht.
Höhe, H _{max}	19,2	m	50-Jahre, Tabelle 7-12, Entwurfsgrundlagen.
Periodendauer, T _d	12,9	S	50-Jahre, Tabelle 7-12, Entwurfsgrundlagen.
Strömung => Extreme Current Me	odel		
Oberfläche	1,1	m/s	50-Jahre, Tabelle 7-26, Entwurfsgrundlagen.
80%	0,94	m/s	Prozent ist der Bruchteil der Wassertiefe (44m).
60%	0,78	m/s	
40%	0,61	m/s	
20%	0,43	m/s	
0%	0,0	m/s	T
Wasserdichte	1,025	t/m ³	Abschnitt 7.3.3, Entwurfsgrundlagen.
Meeresspiegel => Extreme Wate	er Level Ra	inge	
Höchster Wasserstand (HAT)	41,5	m	Tabelle 7-7, Entwurfsgrundlagen.
Anstieg durch Sturm	2,5	m	Tabelle 7-7, Entwurfsgrundlagen.
Meeressniegel =>	44 0	m	Summe

Tabelle II-1: Eingangswerte für den Lastfall-1, Geparkt

II.1.1.5 Lastfall-2: In Betrieb

Im zweiten Lastfall wurde ein Netzausfall bei höchster Windgeschwindigkeit des Betriebsbereichs simuliert. Der Seegang entspricht dem aus dem Lastfall-1. Die Eingangswerte sind der Tabelle II-2 zu entnehmen

Tabelle II-2: Eingangswerte für den Lastfall-2, In Betrieb

Wind => Deterministisch, EOG (DLC 2.1)			
Parameter Wert		Einheit	Anmerkung
Richtung	0° & 45°		Zwei Richtungen werden untersucht.
Mittelwert	24,0	m/s	Höchste Betriebsgeschwindigkeit.
1-Jahr Extremwert	42,8	m/s	IEC 61400-1, 2005, Abschnitt 6.3.2.1
Turbulenz-Standardabweichung	3,3	m/s	IEC 61400-1,2005, Abschnitt 6.3.1.3
Bögeschwindigkeit	8,0	m/s	IEC 61400-1, 2005, Abschnitt 6.3.2.2
Bödauer	10,5	s	IEC 61400-1, 2005, Abschnitt 6.3.2.2
Höhenexponent	0,14		
Anströmungwinkel	0°		IEC 61400-3, 2009, Abschnitt 6.3
Welle => Stream Function Theory	, 9th Order,	EWH	
Richtung	0° & 45°		Zwei Richtungen werden untersucht.
Höhe, H _{max}	19,2	m	50-Jahre, Tabelle 7-12, Entwurfsgrundlagen.
Periodendauer, T _d	12,9	s	50-Jahre, Tabelle 7-12, Entwurfsgrundlagen.
Strömung => ECM			
Geschwindigkeit	1,1	m/s	50-Jahre, Tabelle 7-26, Entwurfsgrundlagen.
80%	0,94	m/s	Prozent ist der Bruchteil der Wassertiefe (44m).
60%	0,78	m/s	
40%	0,61	m/s	
20%	0,43	m/s	
0%	0,0	m/s	
Wasserdichte	1,025	t/m ³	Abschnitt 7.3.3, Entwurfsgrundlagen.
Meeresspiegel => EWLR			
Höchster Wasserstand (HAT)	41,5	m	Tabelle 7-7, Entwurfsgrundlagen.
Anstieg durch Sturm	2,5	m	Tabelle 7-7, Entwurfsgrundlagen.
Meeresspiegel =>	44,0	m	Summe.
Turbine-Fehlerfall => Netzausfall			
Zeit des Fehlerfalls	30,0	S	
Generator-Drehmoment	0,0	N∙m	
			T

II.1.1.6 Ergebnisse der Gesamtanlagensimulation

Die höchste Zugkraft wurde bei dem geparkten Lastfall mit gelenkiger Lagerung erfasst (11,9 MN). Die Ergebnisse des zweiten Simulationslaufs wurden einschließlich eines Sicherheitsfaktors = 1,35 berechnet. Bei der ersten Simulation betrug die maximale Zugkraft 8,3 MN beziehungsweise 11,2 MN inklusive Sicherheitsfaktor.

Auflagerung	Richtung	Fz [kN] Elm 70	Fz [kN] Elm 77	Fz [kN] Elm 84	Fz [kN] Elm 63
Eingespannt	45°	-5423	10920	-4934	-21564
Gelenkig	45°	-5433	11918	-4948	-22538

Tabelle II-3: Ergebnisse der Gesamtanlagensimulation beim geparkten Lastfall

II.1.1.7 Modell Boden-Suction-Bucket

Für die Simulation der Suction Bucket-Gründung in einem Gesamtanlagenmodell wurde zunächst ein Bucket-Modell mit nichtlinearen Federn in der Modellierungssprache Modelica erstellt. Das Modell beschreibt das Verhältnis von Verschiebung zu Kraft in vertikaler und horizontaler Richtung. Die mathematische Beschreibung basiert auf gewöhnlichen Tz, Qz und Py-Gleichungen aus der Literatur (Kraft et al., 1981; El Nagaar/Novak, 1994; Lee/Salgado, 1999; Armaleh/Desai, 1987). Die Gleichungen wurden entsprechend des Verhaltens des Modells vom Institut für Geotechnik angepasst.

Die Geometrie des Bucket-Modells ist in Abbildung II.6 dargestellt.



Bei dem Modell wurde angenommen, dass der Bucket komplett im Boden versenkt ist. Außerdem wird davon ausgegangen, dass der umgebende Sand kohäsionslos ist. Das Modell wurde als nicht-lineares Federmodell in Modelica erstellt und der gesamte Bucket wird durch einen einzelnen Punkt repräsentiert, der die Interaktion zwischen Boden und Suction Bucket beinhaltet. An diesen Punkt wurden drei nicht-lineare Federn in drei verschiedenen Richtungen angebunden (siehe Abbildung II.7), wobei für die X und Y Richtung dasselbe Federmodell verwendet wurde.

Eingehende Darstellung



Abbildung II.7: Nicht lineares Federmodell

Die Rotationssteifigkeiten wurde in dem implementierten Modell zunächst außer Acht gelassen wurden. Die drei voneinander unabhängigen Federn wurden jeweils verifiziert.

Listing 1 zeigt eine Modelica-Funktion die zur Berechnung der Verschiebung des Buckets in Z-Richtung unter Beachtung der Mantelreibung erstellt wurde. Die Umwandlung der Gleichungen in algorithmischen Code (**algorithm** statt **equation**) wurde in dem Beispiel schon vorgenommen, damit eine direkte Übersetzung in C-Code erfolgen konnte. Listing 2 zeigt den resultierenden C-Code.

```
within OneWind.Environment.Soil.NonlinearSprings.tzCurve;
function calcTZDisplacement
```

```
import Modelica.SIunits;
```

```
input SIunits.Radius r_0 "pile radius";
input SIunits.Radius r_m "radius after which shear stress b/c of
pile in soil becomes negligible";
input SIunits.ShearModulus G_0 "initial soil shear modulus";
input Real R_f "curve fitting factor [-]";
input SIunits.ShearStress t_max "max unit skin friction";
input SIunits.ShearStress t "unit skin friction / skin resistance
at soil-pile interface";
```

output SIunits.Distance z_s "vertical soil displacement";

protected

Real psi "ratio to make argument of log shorter";

algorithm

psi := R_f * t / t_max; z_s := (t * r_0 / G_0) * log((r_m - psi)/(1 - psi));

end calcTZDisplacement;

Listing 1: Modelica-Code für die Berechnung der Verschiebung in Z-Richtung basierend auf der Mantelreibung

Listing 2 zeigt eine C-Funktion die zur Berechnung der Verschiebung des Buckets in Z-Richtung

```
double R_f, // curve fitting factor [-]
double t_max, // max unit skin friction
double t // unit skin friction/resistance at soil-pile interface){
    double psi;
    double z_s; // vertical soil displacement
    psi = R_f * t / t_max;
    z_s = (t * r_0 / G_0) * log(((r_m - psi)/(1 - psi));
    return z_s;
}
```

Listing 2: C-Code für die Berechnung der Verschiebung in Z-Richtung basierend auf der Mantelreibung

II.1.1.8 Ermüdungslasten

Für einen BSH-definierten 35-Stunden-Sturm wurden mit dem zuvor in ADCoS erstellten Modell mit Hilfe von Rainflowcounting Ermüdungslasten in Form von 1D- und 2D-Markov-Matrizen berechnet. Die ermittelten Lasten an den vier Bucket-Elementen können für Lebensdauerberechnungen verwendet werden.

II.1.1.9 Vorarbeiten Sensitivitätsanalyse

Für die Simulation von Lastfällen musste ein Interface zwischen ADCoS und dem Suction-Bucket-Modell definiert und als DLL implementiert werden. Zunächst wurde der Ansatz verfolgt das FMI "Functional Mockup Interface" (Blochwitz et al. 2011) zu verwenden. Dieser Industriestandard wurde dafür definiert Modelle unterschiedlicher Tools für Simulationen miteinander zu koppeln. Das Modelica Tool Dymola kann für den Export des Modells verwendet werden. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Implementierung der FMI Schnittstelle zur Anbindung an ADCoS sehr aufwendig ist. Aus diesem Grund wurde der Modelica-Code zunächst in eine algorithmische Form umgewandelt und dann in C als DLL implementiert (siehe Listing 2 und Listing 3).

Neben der Umsetzung des Bucket-Modells als C-DLL wurden weitere vereinfachte Modelltypen in die DLL integriert, um die Anbindung an ADCoS testen zu können. Die weiteren Modelltypen sind:

- konstant
- linear
- bi-linear
- nicht-linear
- Bucket

Der Modelltyp kann während der Simulation über die Schnittstelle zu ADCoS geändert werden. Durch diese Modelltypen konnte die Integration in ADCoS getestet werden, um anschließend Lastfälle für die Sensitivitätsanalyse des Bucket-Modells zu berechnen. Die verschiedenen Modelle werden mittels einer Konfigurationsdatei parametrisiert. So ist es möglich die Modellparameter für jede Simulation zu variieren ohne den C-Code kompilieren zu müssen.

Abbildung II.8 zeigt eine Übersicht, wie die Komponenten zusammenspielen. Es wird ein Anlagenmodell an ADCoS zur Simulation übergeben. ADCoS wurde so erweitert, dass in der Modelldefinition spezielle Elemente annotiert werden können, um als Bucketelemente identifizierbar zu sein. Wenn ADCoS das Bucket-Element während der Simulation erkennt, wird eine neue Instanz der Bucket-DLL für das spezielle Element erzeugt. Diese Instanz wird fortan für die Berechnung der Steifigkeit an dem annotierten Knoten verwendet. Dazu werden der DLL die Kräfte an den Bucket-Elementen übergeben. Listing 2 zeigt das C-Interface das für die Anbindung an ADCoS definiert wurde. Während der Übergabe wird in der Modellkonfiguration geprüft welche Art von Modell für die Simulation verwendet werden soll.

Die Bucket-DLL lädt die Parameter für jedes Modell während der Instanziierung. Das heißt, die Modellparameter für die Modelle können nur zwischen den Simulationen verändert werden. Die Art des verwendeten Modells wird jedoch bei jeder Berechnung erneut überprüft, so dass ein Wechsel in jedem Zeitschritt möglich ist.



Abbildung II.8: Übersicht der Kopplung des Bucketmodells an ADCoS

Das jeweilige Modell berechnet in jedem Zeitschritt basierend auf den eingehenden Kräften und definierten Modellparametern die Verschiebungen. Aus diesem Ergebnis können im Anschluss die Steifigkeiten berechnet werden, die an ADCoS zurückgegeben werden.

```
__declspec(dllexport) void calculate(
        /* data from adcos to dll */
        int iiter, int itime, int ielem
        , double* forceX /* force in direction 1 (winddirection) */
         double* forceY /* force in direction 2
        ,
                                                                  */
        , double* forceZ /* force in direction 3 (upwards)
                                                                  */
        /* data from dll to adcos */
        , double* stiffnessX /* nonlinear horizontal stiffness direction 1
                                 (winddirection) */
         double* stiffnessY /* nonlinear horizontal stiffness direction 2 */
        , double* stiffnessZ /* nonlinear vertical stiffness (upwards) */
         double* massX
                              /* mass with directions see above */
         double* massY
        ,
         double* massZ
         int* isRotionFixed /* 0: beam can rotate on springs;
                                 1 rotational dof are fixed
```

```
, int type
```

/* select type of calculation 0=constant, 1=linear, 2=bi-linear, 3=non-linear (tanh), 4=non-linear bucket model */

);

Listing 3: C-Interface der Bucket-DLL

Für die Sensitivitätsanalyse wurde zunächst eine geeignete Software (DAKOTA) untersucht. Diese ermöglicht es automatisiert Simulationen mit unterschiedlichen Simulationsparametern zu starten und Ergebnisse auszuwerten. Für Modelica-Modelle wurde bereits benötigter Code erzeugt, der die Simulationen starten kann. Da das Modelica-Modell jedoch nicht direkt verwendet wurde, hätte ein Modul zur Ansteuerung der C-DLL geschrieben werden müssen. Außerdem muss die Rückführung der Simulationsergebnisse an das DAKOTA Framework programmiert werden, so dass dieser Ansatz wieder verworfen wurde.

Statt der Software DAKOTA wurde Python Code erzeugt. Mit diesem wurden verschiedene Modellparameter variiert und die Modelle mit dem gleichen Lastfall simuliert. Für jeden automatisiert erstellten Simulationslauf wurde ein Ordner mit dem Windenergieanlagenmodell, den Lastfalldaten und den Dateien mit den Simulationsparametern erstellt. Die Konfigurationsdatei für das Bucket-Modell wird durch Pattern-matching für die jeweilige Simulation angepasst. Die Modellparameter können dadurch in dem jeweiligen Simulationsordner durch das Python-Skript definiert werden.

Nachdem die Ordnerstruktur erstellt und die Parameter gesetzt waren, wurden die Simulationen durch das Skript automatisch gestartet. Zur Beschleunigung der Simulationen wurde dies auf einem Hochleistungsrechner mit 32 zur Verfügung stehenden Prozessoren durchgeführt. Dazu wurde eine virtuelle Maschine aufgesetzt und die benötigten Komponenten, etwa der Python-Interpreter, installiert.

II.1.1.10 Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse wurden zwei Parameter des Modells variiert: Der Durchmesser und die Höhe des Buckets. Als Startwert des Durchmessers wurde 5 m gewählt, für die Höhe 3 m. Anschließend wurden alle Kombinationen gerechnet bis zu einem Durchmesser von 14 m und einer Höhe von 12 m. Dabei wurde jeder Parameter in Schritten von 0.5 m variiert. Insgesamt wurden so 361 verschiedene Simulationen durchgeführt.

Als Windanlagenmodell wurde das zuvor definierte 6.15 MW Modell mit einer Ausrichtung von 45 Grad zur Wind- und Strömungsrichtung verwendet. Damit konnten die maximalen auftretenden Lasten am vorderen Bucket analysiert werden.

Die Lastfalleinstellungen sind in Abbildung II.9 dargestellt. Die externen Wellenlasten wurden wie oben beschrieben mit einem Platzhalter (\$WAVEPATH) definiert, da die Lastendatei von ADCoS nicht parallel durch unterschiedliche Prozesse gelesen werden kann und deshalb in den jeweiligen Simulationsordner kopiert wurde.

Eingehende Darstellung

🞉 Define Loadcase			X
Condicase Load Group 6p1b Set Colp 1 Add LC1p2_10 Delete LC1p2_11 Delete LC1p2_12 E LC1p2_14 Delete LC1p2_15 LC1p2_15 LC1p2_18 Angle of Rotation [deg] LC1p2_19 LC1p2_19	Calculatio Total Calculation Time Pre-enable Time Time-Step Time-Step for Data Output Load Safety Factor Startup II Pitch Blade 1 [deg] Blade 2 [deg] Blade 3 [deg]	[s] 120.000 [s] 5.000 [s] 0.0250 [s] 0.0500 [s] 0.0500 [c] 1.000	Activate Loadcase Actodynamic Loads Aerodynamic Damping Rotor Acceleration Pitchmoments 2. Order Tower Upwind Stagn. Effect Pitch Control tive Yaw Control Zentrifugal Stiffness Curvespoir D ampine Activate Loadcase Pitchmoments Curvespoir D Argenting Curvespoir D Argenting Curvespoir Curves
LC1p2_20 Tidle Running	biade 5 (deg) 89.000	0 0.000 1	L Gyroscopic Damping I✓
Upwind 1	Mean Sea Level above ground (r Stagn.:Eff Tower Diameter fused for arb. Structures)	m] 44.000 Underv	Underwater Morison Forces 🗖 water Morison Forces 2. Order 🗖
At To	wer Top [m] 5.5000	Elements floor	ded (must be set in Properties)
			Static
Main Wind Speed [m/s] 53,500 Repeats	or i s [·]] 1.0	Deterministic	Stochastic O External
Gust Wind Speed [m/s] 0.00 C Sinus C Linear Image: Full Start Time [s] 600.00 Rising Time [s] 5.25	Std-Deviation X [m/s] 1.7 Std-Deviation Y [m/s] 1.4 Std-Deviation Z [m/s] 44.0	File-Name for Wir File-Name for Wir C:\Users\PPoiss C:\Users\PPoiss C:\Users\PPoiss	nd Data son/Documents/Project son/Documents/Project
Wind Shear Vertical 0.140 Horizontal [m/s/m] © Exponent C Linear [linear) Start Time [s] -300.000 Start Time [s]	0.000 Lateral from [de to [de 0.000 StartTime [Rising Time [Wind Direction Cl g] 0.000 g] 0.000 s] 0.000 s] 0.000 s] 0.000 s] 0.000	hange Top from [deg] 0.000 to [deg] 0.000 StartTime [s] 0.000 sing Time [s] 0.000
External Loads Use External Load C:\\$WAVEPATH\waveLoad_45Grad_+	30	Help	OK Cancel

Abbildung II.9: Lastfallparameter

II.1.1.11 Simulationsergebnisse Gesamtanlagemodell Bucket-Modell mit nicht linearen Federn

Zunächst wurde die Durchführbarkeit der Simulation unter den unterschiedlichen Parametereinstellungen untersucht. Die Simulation wurde abgebrochen, wenn ein instabiles Verhalten des Modells vorlag. Dies war der Fall wenn die Kräfte zu groß für das Bucket-Modell waren, z.B. wenn der Bucket eine zu geringe Höhe aufwies. In diesem Fall wurden im Bucket-Modell Steifigkeitswerte berechnet die zu einem Abbruch der Simulation führten.

Bei den Ergebnissen ist aufgefallen, dass durch die Wiederverwendung der Federtheorien von Monopiles eine starke Abhängigkeit der Berechenbarkeit von der Höhe des Buckets vorliegt. Ab einer Höhe von 7,5 m können die Simulationen mit den gewählten Parametern immer durchgeführt werden. Dies begründet sich darin, dass bei dem gewählten Modell die Höhe bestimmend ist für die Verschiebung in X/Y-Richtung. Der Durchmesser wirkt sich vor allem auf die Verschiebung in Z-Richtung aus. Die Lasten von Wind und Wellen wirken jedoch hauptsächlich in X/Y-Richtung.

Abbildung II.10 zeigt die maximale Verschiebung der Buckets für den verwendeten Lastfall in X/Y-Richtung wobei die Werte wie oben beschrieben unabhängig vom Bucket-Durchmesser sind. Dabei verringert sich die Verschiebung erwartungsgemäß mit steigender Höhe des Buckets. Bei einer Höhe von 7,5 m beträgt die maximale Verschiebung 0,975 cm. Ab einer Höhe von 11,5 m reduziert sich die maximale Verschiebung auf unter 0,2 cm.

Eingehende Darstellung



Abbildung II.10: Maximale Verschiebung in X/Y-Richtung

Abbildung II.11 zeigt die Auswirkung des Bucket-Durchmessers auf die Verschiebung in Z-Richtung bei einer Bucket-Höhe von 8m.



Abbildung II.11: Maximale Verschiebung in Z-Richtung

Bei einem Durchmesser von 5 m wurde eine maximale Verschiebung von 0,215 cm berechnet. Ab einem Durchmesser von 7,5 m reduziert sich die Verschiebung auf unter 0,1 cm.

Abbildung II.12 zeigt die durchschnittliche Verschiebung des Buckets in X/Y-Richtung wobei der Durchmesser wiederum keinen Einfluss hat. Bei der minimalen Bucket-Höhe von 7,5 m beträgt die durchschnittliche Verschiebung 0,29 cm, ab 10 m Höhe reduziert sich die Verschiebung auf unter 0,1 cm.



Abbildung II.12: Durchschnittliche Verschiebung in X/Y-Richtung

Abbildung II.13 zeigt die durchschnittliche Verschiebung in Z-Richtung bei einer Bucket-Höhe von 8 m. Mit den getesteten Modellparametern ergibt sich eine durchschnittliche Verschiebung von etwa 0.09 cm bis weniger als 0,03 cm, abhängig von dem Durchmesser des Buckets.



Abbildung II.13: Durchschnittliche Verschiebung in Z-Richtung

II.1.1.12 Entwicklung von Skalierungsmodellen

Bei der physikalischen Modellierung eines Suction Buckets einer OWEA Gründung wird ein Einzel-Bucket in einer skalierten Größe gebaut (Modell) und bei ähnlichen Randbedingungen und modellhaften Lasteinwirkungen wie beim Bucket in realem Maßstab (Prototyp) experimentell untersucht. Voraussetzung dafür war nach der Definition und Abstimmung der Testziele im Forschungsprojekt mit den weiteren Verbundpartnern die Kenntnis über die Skalierbarkeit und das Übertragungsverhalten der Modellversuche auf reale Verhältnisse. So wurden bei der Auslegung der Modellversuche verschiedene Skalierungsansätze für die zu untersuchenden physikalischen Vorgänge separat analysiert und in einer detaillierten Dimensionsanalyse unter Anwendung des Buckinghams Pi-Theorems erarbeitet. Hierfür wurden die maßgebenden Parameter (Einflussgrößen), die die Boden-Bucket-Interaktion bei axialer Belastung und die Boden-Fluid-Interaktionen bei der Installation beschreiben, bestimmt.

Nach der Parameteridentifikation wurde eine Relevanzliste aufgestellt, die durch weitere Analyse reduziert werden konnte. Mit Hilfe der Dimensionsanalyse wurden für einen repräsentativen Bucket der Referenz-Multipod-Struktur (Abbildung II.1) dimensionslose Kennzahlen (π -Produkte) gebildet (Tabelle II-4, Tabelle II-5 und Tabelle II-6), die zur Herleitung von Skalierungsfaktoren für Kraft, Verformung, Geschwindigkeit, Druck, etc. genutzt wurden. Diese werden bei der Versuchsplanung sowie bei der Beurteilung der Übertragbarkeit der Testergebnisse auf die prototypische Größe verwendet.

Der geometrische Skalierungsfaktor λ_L , definiert als Quotient (L)_M/(L)P mit (L)_M als Länge im Modell und (L)_P als Länge im Prototyp, bestimmt im Experiment die Modellgröße (Maßstab), die u.a. anhand der geometrischen und technischen Randbedingungen der Testumgebung festgelegt wird. Er dient als Referenzgröße bei der Definition der Modell-Geometrie sowie bei der Formulierung weiterer Skalierungsfaktoren.

Bei der experimentellen Modellierung von OWEA-Gründungen wird oft die Modellähnlichkeit nicht vollständig eingehalten. Für die geplanten geotechnischen Experimente mit Suction Buckets im Maßstab 1:33 war die geometrische Skalierung des Sandkorndurchmessers im Technikum nicht praktikabel, da sich durch die Anwendung eines Bodens mit einem höheren Feinanteil sowohl die Wasserdurchlässigkeit k_f und insbesondere die mechanischen Eigenschaften des Modellbodens (Sand) verändert hätten.

Demgemäß wird der Naturboden (Boden vom Prototyp) als Modellboden im kleinmaßstäblichen Experiment unter der Voraussetzung gleicher Lagerungsdichte ($D_M=D_P$) bzw. gleicher Porosität ($n_M=n_P$) verwendet. Wenn bei nichtbindigen Böden keine Dilatanz auftritt, wird bei der Verwendung des gleichen Sandes vom Prototyp als Modellsand von einer korrekten Skalierung von N_{bo}, N_{do} und Ktan**ð** ausgegangen (Cotter, 2009). Skalierungseffekte infolge Dilatanz können beim Einbau des Modellsandes mit einer lockeren Lagerungsdichte verringert werden.

Da der Modellboden im 1g-Versuchsbehälter dicht eingebaut wird, lassen sich jedoch eventuelle Modellfehler durch inkorrekte Abbildung der Tragfähigkeitsbeiwerte N_{bo}, N_{do} sowie des Einflussparameters für die Mantelreibung Ktan**ō** nicht vermeiden.

Bei einem auf Zug belasteten Suction Bucket ist bei nichtbindigen Böden bekannt, dass eine direkte Übertragung von Testergebnissen aus kleinmaßstäblichen Modelltests auf die Prototyp-Größe oft nicht möglich ist, da sich unmittelbar am Pfahlmantel eine korngrößenabhängige Scherfuge ausbildet, deren Breite sowohl am Modell wie am Prototyp gleich ist (Wernick, 1978; Walz, 2006).

Dies führt dazu, dass bei der Verwendung des gleichen Bodens im Prototyp als auch im Modell das folgende Modellgesetz nicht eingehalten werden kann.

Eingehende Darstellung

$$\left(\frac{(d_s)}{l}\right)_M \neq \left(\frac{(d_s)}{l}\right)_P$$

Gleichung II-I

Mit:

d_s: Breite der Scherfuge

l: Bucket-Länge

Hierbei sind die Scherfugen am Modell genauso groß wie am Prototyp; mit der Folge, dass die am Modell gemessenen Kräfte oder Verschiebungen nicht direkt mit Hilfe von Modellgesetzen auf den großen Maßstab übertragen werden können.

Treten die Zugkräfte mit höheren Belastungsraten auf, bildet sich im Inneren des Buckets eine Druckdifferenz, die zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Zugtragfähigkeit führt. Dabei verhält sich der Modellsand wie teilweise bis undrainierter Boden. Zu den wesentlichen Einflussfaktoren gehören hier die Belastungsfrequenz, die Lagerungsdichte und die Entwässerungszeit. Um das transiente Tragverhalten einer OWEA-Bucket-Gründung unter Zug-und Druckbeanspruchungen im Experiment realitätsnäher abzubilden, wurde die dimensionslose Konsolidierungszeit T_z als maßgebender Einflussparameter für die Zeitskalierung bestimmt.

$$T_v = c_v \frac{t}{H^2}$$
 Gleichung II-II

und

$$c_v = \frac{E_s k_f}{\gamma_w}$$
 Gleichung II-III

Mit:

- H: Dicke der einseitig entwässernden Schicht
- C_v: Konsolidierungsbeiwert
- t: Konsolidierungszeit
- T_v: Bezogene Konsolidierungszeit
- k_f: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert

γ_w: Wichte des Wassers

E_s: Steifemodul aus Kompressionsversuch

Wenn die dimensionslose Konsolidierungszeit T_v im Modell gleich wie beim Prototyp ist, ergibt sich der folgende Skalierungsfaktor für die Wasserdurchlässigkeit k_f im Modell:

$$k_{f_M} = \lambda^{3/2} \frac{t_P}{t_M} k_{f_P}$$
 Gleichung II-IV

Da für das Modell der gleiche Boden wie beim Prototyp verwendet wird, sollte der Skalierungsfaktor für die Wasserdurchlässigkeit 1 betragen. Somit lässt sich die Zeit gemäß Gleichung II-IV durch das folgende Verhältnis skalieren:

$$t_M = \left(\lambda_L^{3/2}\right) t_P$$
 Gleichung II-V

Mit:

 t_M : analog zur Belastungszeit im Modell

t_P: analog zur Belastungszeit beim Prototyp

Durch die Einhaltung dieses Skalierungsfaktors sollten während der Belastungszeit die Entwässerungszeiten im Modellboden ähnlich wie beim Prototyp sein. Somit lässt sich im Experiment das teilweise undrainierte und undrainierte Zugtragverhalten des Boden-Bucket-Systems genauer simulieren. Da bei der Abbildung der Physik für die Bucket-Installation und für die Bucket-Boden-Interaktionen unter axialer Belastung weder die geometrische noch die dynamische und die kinematische Ähnlichkeit vollständig erfüllt werden können, sollte beim kleinmaßstäblichen Experiment von einer unvollständigen, tolerierbaren Modellähnlichkeit gesprochen werden.

Die hergeleiteten dimensionslosen Kennzahlen, die das axial statische Tragverhalten eines Einzel-Buckets sowie die Bucket-Installation beschreiben, sind in Tabelle II-4, Tabelle II-5 und Tabelle II-6 aufgelistet.

Größe	π-Produkte	Prototyp Parameter	Modell Parameter
Länge, L Durchmesser, D	$\left(\frac{L}{D}\right)_{M} = \left(\frac{L}{D}\right)_{P} = 0,889$	D=9 m L=8 m	D= 0,27 m L= 0,24 m
Verschiebung, Uz	$\left(\frac{U_z}{D}\right)_M = \left(\frac{U_z}{D}\right)_P = 0,0083$	U _{z_max_zul} ~75 mm	U _{z_max_zul} ~2,25 mm
Vertikale Kraft, V Wichte Boden unter Auftrieb, γ'	$\left(\frac{V}{(D^2 L\gamma')}\right)_M = \left(\frac{V}{(D^2 L\gamma')}\right)_P = 1,697$	V _{max_Zug,k} ~ 11 MN =11x10 ⁶ N	V _{max_Zug,k} = 297 N
Porenanteil, n	$(n)_M = (n)_P = n_{ m dicht}$	Ndicht	Ndicht
Erdruhedruckbeiwert, K₀	$(K_0)_M = (K_0)_P$	Ko	Ko
Zeit bei schneller Belastung	$\left(\frac{t}{D^{3/2}}\right)_{M} = \left(\frac{t}{D^{3/2}}\right)_{P}$	Testspezifisch	Testspezifisch

Tabelle II-4: Modellgesetze für einen Suction Bucket unter axial statischer Belastung

Tabelle II-5: Modellgesetze für die Bucket-Installation

Größe	π-Produkte	Prototyp Para- meter	Modell Parameter
Saugspannung, S	$\left(\frac{S}{\gamma'D}\right)_M = \left(\frac{S}{\gamma'D}\right)_P$	-	Nicht eingehalten, Modell-Bucket ohne Saugspannung instal- liert
Wandstärke, t	$\left(\frac{t}{D}\right)_{M} = \left(\frac{t}{D}\right)_{P}$	t~ 30 mm	t= 3 mm nicht eingehalten, (bauverfahrenstech- nisch unmöglich)
Länge, L Durchmesser, D	$\left(\frac{L}{D}\right)_{M} = \left(\frac{L}{D}\right)_{P}$	D=9 m L=8 m	D= 0,27 m L= 0,24 m
Eindringrate, ż Durchlässigkeitsbei- wert, k _f	$\left(\frac{\dot{z}}{k_f}\right)_M = \left(\frac{\dot{z}}{k_f}\right)_P$	ż = 0,33-0,25 [mm/s] k _f = 3,9x10 ⁻⁴ m /s	ż = 0,1 − 0,5 [mm/s] k _f = 3,9x10 ⁻⁴ m /s
Eindringtiefe, z	$\left(\frac{z}{D}\right)_M = \left(\frac{z}{D}\right)_P$		
Vertikale Kraft, V Wichte Boden unter Auftrieb, γ'	$\left(\frac{V}{D^3\gamma'}\right)_M = \left(\frac{V}{D^3\gamma'}\right)_P$	-	-

Pumpleistung, Durch- fluss, Q	$ \begin{pmatrix} \frac{Q}{D^2 k_f} \end{pmatrix}_M \\ = \left(\frac{Q}{D^2 k_f}\right)_P $	-	Nicht eingehalten, Modell-Bucket ohne Saugspannung instal- liert
Tragfähigkeitsbeiwert, Nb₀	$(N_{b0})_M = (N_{b0})_P$	f(oʻ)	f(ω')
Tragfähigkeitsbeiwert, Nd₀	$(N_{d0})_M = (N_{d0})_P$	f(oʻ)	f(ω ')
Erddruckbeiwert, K Wandreibungswinkel, φ'	$(K \tan \delta)_M = (K \tan \delta)_P$		-

Tabelle II-6: Modellgesetze für den Unterdruck bei schneller Zugbelastung

Größe	π-Produkte	Prototyp Para-	Modell	
01086	<i>R</i> -HOGURTE	meter	Parameter	
Unterdruck, U	$\begin{pmatrix} U \\ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \\ \end{pmatrix}$			
Wichte Wasser, γ_w :	$\left(\frac{1}{L\gamma_{\omega}}\right)_{M}^{\prime} = \left(\frac{1}{L\gamma_{\omega}}\right)_{P}^{\prime}$	-	-	
Länge, L	$\binom{L}{-} - \binom{L}{-} - 0.880$	D=9 m	D= 0,27 m	
Durchmesser, D	$\left(\overline{D}\right)_{M} = \left(\overline{D}\right)_{P} = 0,009$	L=8 m	L= 0,24 m	
Herewariah gaaah windigkait 🔅		∴ 2/0 [mm/c]	ẋ = 2/8[mm/s]	
Rerausziengeschwindigkeit,x	$\left(\frac{x}{k_{s}}\right) = \left(\frac{x}{k_{s}}\right) = 1$	x = 2/8 [mm/s]	k _f = 3,9x10⁻⁴	
Durchassigkeitsbeiwert, K _f	(^m) ^m (^m) ^p	Kf= 5,9X10 11175	m /s	

II.1.1.13 Virtuelle Abbildung des Demonstrators und numerische Simulationen zur Unterstützung der Versuchsplanung

Ein numerisches Modell für das Modell-Bucket D270 (Abschnittll.1.1.24) wurde zur Unterstützung der Versuchsplanung und zur Prognostizierung der statischen (drainierten) Zugtragfähigkeit mit dem Programm ABAQUS (Simulia, 2012) erstellt. Aufgrund der Symmetrie sowohl vom Modell-Bucket als auch vom Versuchsbehälter wurde das dreidimensionale Finite-Elemente-Modell nur als halbes Modell gebaut.

Bei den numerischen Simulationen wurde der Bucket im installierten Zustand und ohne Berücksichtigung von Installationseffekten im Boden modelliert. Der Erdstoff (Modellsand) wurde als 1-phasiges-Medium abgebildet, d.h. ohne Wasser und Luft im Sandkorngerüst. Es wurden daher nur effektive Spannungen im Boden generiert. Das nichtlineares Stoffverhalten des Bodens wurde im Programm ABAQUS als elasto-plastisch idealisiert. Als Bruchkriterium wurde Mohr-Coulomb gewählt. Der elastische Anteil dieses Materialgesetzes wurde durch einen Elastizitätsmodul (E_m) für den Boden festgelegt, der aus dem gemäß spannungsabhängigen Steifemodul E_s (Gleichung II-VI), abgeleitet wurde.

$$E_s = \nu_e \sigma_{atm} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{atm}} \right)^{\omega_e}$$
Gleichung II-VI

In Gleichung II-VI ist σ_m die mittlere Hauptspannung eines Bodenelements und σ_{atm} eine Referenzspannung ($\sigma_{atm} = 100 \text{ kN/m}^2$). Die empirischen Parameter v_e und ω_e sind Steifigkeitsparameter, die von Bodenart und Lagerungsdichte abhängig sind. Referenzwerte für v_e und ω_e sind der EAU (2004) zu entnehmen.

Der Tabelle II-7 sind die verwendeten Stoffparameter sowie die implementierten Skalierungsfaktoren für die numerischen Simulationen zu entnehmen.

-	- (
Parameter	Referenzwert	Skalierungsfaktor	Eingangswerte
	Natur-Prototyp	-	FE-Prognose
	Natal Hototyp		re rrogriose,
			1g-Versuch
Lagerungsdichte D	0,8	1	-
Wichte γ' [kN/m³]	10,7	1	10,7
Es _{mitt} [kN/m ²]	50000	0,0159	795
Steifigkeitsparameter v _e	736	0,649	700
Empirischer Parameter ω_e°	0,55	1,83	1,01
Querdehnzahl v °	0,27	1	0,27
Innerer Reibungswinkel q '[°]	37,5°	-	33°
Dilatanzwinkel ψ	7,5°	-	0,5°
Kohäsion c' [kN/m ²]	1,5	-	1,5
Erdruhedruckbeiwert K ₀	1-sin φ '	-	1-sin φ '

Tabelle II-7: Referenzwerte, Skalierungsfaktoren und Eingangsparameter für die numerische Simulation

Die Interaktion zwischen Bucket und Boden wurde im FE-Modell durch die Definition von Kontaktflächen und die Implementierung einer Penalty-Methode, die das Reibungsverhalten durch den Einsatz eines Reibungskoeffizienten bestimmt. Ein Wandreibungswinkel von $\delta = \frac{2}{3}\phi'$ wurde angesetzt. Die Elemente des Buckets wurden als linear elastisch mit einem Elastizitätsmodul E = 2,1·10⁸ kN/m² (Stahl) und einer Querdehnungszahl v = 0,3 modelliert. Insgesamt besteht das FE-Modell aus ca. 45000 Elementen. Für die Diskretisierung des Buckets und des Bodens wurden Volumenelemente des Typs C3D8R eingesetzt.

Bei den numerischen Simulationen wird eine Kraft stufenweise aufgebracht. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zum statischen Zugtragverhalten werden als Widerstands-Hebungslinie dargestellt (Abbildung II.15).





Es wurde für den Modell-Bucket D270 eine drainierte Zugtragfähigkeit von $R_{t,k}$ = 206 N prognostiziert.





II.1.1.14 Definition der Randbedingungen für die Durchführung von Modellversuchen

Anhand der Erkenntnisse aus dem Abschnitt II.1.1.12 und II.1.1.13 wurden die Randbedingungen für die experimentellen Untersuchungen definiert und in einem Lastenheft zusammengefasst. Ein Testprogramm zur Untersuchung des Bucket-Tragverhaltens unter statischer, transienter sowie zyklischer und post-zyklischer Belastung wurde definiert (s. Tabelle I-1), in dem die Bucket-Installation mittels Einpresskraft und ohne Erzeugung vom Unterdruck erfolgen sollte. Im Folgenden werden die maßgebenden Bestandteile bei der Umsetzung des Versuchs kurz vorgestellt.

II.1.1.15 Versuchsbehälter und Stahlkonstruktion für die Lastaufbringung

Ein wasserdichter Behälter aus Stahl wurde zylindrisch mit einem inneren Durchmesser von D=1580 mm und einer Höhe von H=1600 mm als offener, stehender Behälter gebaut (Abbildung II.20). Der Behälter beinhaltet den wassergesättigten Modellboden für die geotechnischen Versuche und ist von unten mit einer Stahlbodenplatte (t=20 mm) geschlossen. Oben ist der Behälter offen und wurde mit einem oberen Ring verstärkt.

Die Hauptkomponenten der Stahlkonstruktion für die Lastaufbringung (Abbildung II.20) sind eine horizontale Belastungstraverse, zwei Rahmenstiele und ein Trägerrost, der als Fundament für den Prüfbehälter und die zwei Rahmenstiele dient. Diese Komponenten wurden miteinander kraftschlüssig, überwiegend mittels Schraubverbindungen, befestigt. Der Trägerrost weist insgesamt 8 Bohrungen, mit einem Durchmesser von 20 mm für die Befestigung des Prüfbehälters auf. Die Traverse kann höhenvariabel positioniert werden.

II.1.1.16 Aktuatorsystem, Steuerungs- und Messwerterfassungssystem

Die axialen Kräfte bei den Installations- und Belastungstests wurden mit einem Pneumatikzylinder der Firma Sincotec simuliert. Der Zylinder wurde vertikal auf der Traverse der Last-Rahmenkonstruktion positioniert und an eine starre Adapterplatte (Flansch) befestigt (Abbildung II.16). Der Zylinder mit einem Kolbendurchmesser von 125 mm und einem Hub von 100 mm hat einen Wegaufnehmer für einen Messbereich von 100 mm integriert. Die maximale nominal statische Kraft des servopneumatischen Zylinders beträgt ca. 7 kN. Mit dem Zylinder können statische und dynamische Lasten aufgebracht werden. Sie werden mit einer Kraftmessdose mit einer maximalen Nennkraft von 10 kN erfasst. Für den normalen Betrieb benötigt der Zylinder eine konstante Druckluftversorgung von ca. 6 bar, die mit der vorhandenen zentralen Luftdruckversorgung des Testzentrum Tragstrukturen Hannover sowie mit einer Wartungseinheit gewährleistet wurde.

Die Steuerung des Zylinders kann in Weg- und Kraftregelung erfolgen. Der Regler kann sowohl manuell als auch mit Hilfe einer PC-Software bedient werden (Abbildung II.17). Das Regelsystem wurde für vier Achsen ausgelegt, wobei für die geplanten Experimente nur eine Achse für die axiale Belastung belegt ist. Das Regelsystem erlaubt die Speicherung von Messdaten aus Kraft- und Wegmessungen. Bei den schnellen Zugtests betrug die eingestellte Speicherfrequenz 2 kHz.

Vorversuche zur Installation und zum statischen, transienten und zyklischen Tragverhalten dienten auch zur Bestimmung der Werte für die PID-Regelung. Diese Werte wurden separat versuchsart-spezifisch bestimmt und bei den Installations- und Belastungstests dementsprechend konsequent eingesetzt.



Abbildung II.16: Pneumatikzylinder



Abbildung II.17: Regler und PC

Die folgenden Tabellen (Tabelle II-8 und Tabelle II-9) zeigen die technischen Daten der Komponenten für die Lastaufbringung:

Tabelle II-8: Technische	Daten des servo	opneumatischen Zylinders
--------------------------	-----------------	--------------------------

Servopneumatische Zylindereinheit		
Max. Kolbenkraft bei 6 bar Systemdruck 7 kN		
Kolbendurchmesser	125 mm	
Hub	100 mm	
Proportionalventil Typ	5/3 Wegeventil	

Nennvolumenstrom	2.000 l/min
Betriebsdruck	Max. 8 bar
Grenzfrequenz 20 bis 80% Schieberhub	Min 80 Hz.
Ansteuersignal	± 10 V
Wegaufnehmer	Messbereich 100 mm
Linearität	0,05%

Tabelle II-9: Technische Daten des Regelsystems

Regelsystem		
Regelart	Intelligenter PID-Regelalgorithmus	
Achsen	4 mit jeweils 2 Regelkanälen	
Kanalzahl	8 ADC und 4 DAC	
Frequenz	0,01 – 200 Hz	
Sample Rate	10 kHz	
Signalform	Sinus Rechteck, Dreieck, Benutzerdefiniert	
ADC / DAC	± 10,25 V 16 Bit / ±10 V 16 Bit	

II.1.1.17 Messkonzept

Ein Messkonzept für kleinmaßstäbliche Modellversuche mit Suction Buckets für die Messung von Kraft, Weg, Beschleunigungen und Porenwasserdruck wurde erstellt. Abbildung II.18 stellt die Stellen für die Applizierung von Sensoren bei den Modellversuchen dar.

1:

2:

3:

4:

5:

6:



- Last-Rahmenkonstruktion
- Wasser
 - Porenwasserdruckgeber
 - Ventile W
 - Messbrücke für Wegaufnehmer
- Ventile L
- 7: Zylinder mit integriertem Wegaufnehmer
- 8: Suction Bucket (Testkörper)
- 9: Abstandhalter für
 - Porenwasserdruckgeber
- 10: Kraftmessdose
- 11: Modellsand

Abbildung II.18: Messstellen für Sensoren

Bei den Experimenten können die Wege als Hebungen oder Setzungen durch einen in den Prüfzylinder integrierten Wegaufnehmer erfasst werden. Die Kräfte werden mit einer Kraftmessdose gemessen, die die Kraftregelung ermöglicht. Sowohl die Kräfte als auch die interne Wegmessungen lassen sich durch die Steuerungssoftware und den Regler in Standardformaten speichern. Damit können die Lastverformungsverläufe aufgezeichnet werden. Ein externer Wegaufnehmer kann in eine aus Aluminium modular aufzubauende Messbrücke installiert werden. Somit können eventuelle vertikale Bewegungen der Traverse während der Belastung erfasst und die Messdaten korrigiert werden. Allerdings ist für die Messung mit zusätzlichen externen Wegaufnehmern und speziellen Sensoren wie z.B. Beschleunigungssensoren und Porenwasserdruckgeber der Einsatz eines externen Messsystems erforderlich.

II.1.1.18 Modellsand

Zur Auswahl des Modellsandes wurden die vom LUH-IGtH erstellten Referenzbodenprofile sowie die wesentlichen bodenmechanischen Eigenschaften eines typischen Quarzsandes des Nordseebaugrunds analysiert. Da in der Nordsee zahlreiche OWEA-Gründungen überwiegend in holozänen und pleistozänen Sanden gegründet werden, stellen diese Bodenarten einen repräsentativen Referenzbaugrund zur Auswahl des Modellsandes dar. Typische Bodenkennwerte von holozänen und pleistozänen Sanden der Nordsee, entnommen aus Lesny (2008), liefert die Tabelle II-10.

Tabelle II-10: Typisch	e Bodenkennwerte	für Nordseesanden	(Aus Lesny,	2008)
------------------------	------------------	-------------------	-------------	-------

	Bodenart	Lagerungsdichte	γ/γ′	ω'	C'	k _f	E _{s,stat}
		D	[kN/m ³]	[°]	[kN/m ²]	[m/s]	[kN/m ²]
Holozäner	Fein-bis	Mitteldicht bis	19/11	37,5	-	k.A.	k.A.
Sand	Mittelsand	dicht, sehr dicht					
Pleistozäner	Fein-bis	Mitteldicht bis	19/11	37,5-	-	1x10 ⁻⁵	
Sand	Mittelsand	sehr dicht		40		-	
						1x10 ⁻⁴	

Als Modellsand wurde ein Quarzsand aus der Region Königslutter, Ortsteil Uhry, 85 km östlich von Hannover (Niedersachsen) verwendet. Hier handelt es sich um einen ungewaschenen "Rohsand" mit einer Korngrößenverteilung zwischen 0 und 2 mm. Nach der Korngrößenverteilung wird der Modellsand nach DIN 18196 als enggestufter Sand (SE) eingestuft. Nach DIN EN ISO 14668-1 wird der Modellsand als Mittelsand, schwach feinsandig, schwach grobsandig, sehr schwach schluffig (2% Feinkorn kleiner als 0,063 mm) klassifiziert. Die Kornform des Sandes ist annähernd rund (Sphärizität = 0,92; 1 = perfekte Kugel). Der Modellsand ist pH-Neutral, frei von Huminstoffen und enthält einen geringen Eisengehalt.

Die Korngrößenverteilung des Modellsandes ist der Abbildung II.19 zu entnehmen.



Abbildung II.19: Körnungslinie des Modellsands nach DIN 18123

Der Modellsand wurde im bodenmechanischen Labor des Institut für Geotechnik Hannover (IGtH) untersucht. Die Bodenkenngrößen sind nachfolgend in Tabelle II-11 zusammengestellt:

Bodengruppe nach DIN 184196:2011-05	SE
Klassifikation nach DIN EN ISO 14668-1	mS, fs', gs'
Mittlerer Sandkorndurchmesser	d ₅₀ = 0,36 mm
Ungleichförmigkeitszahl / Krümmungszahl	Cu/Cc = 1,9 / 1,0
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach Hazen	k _f = 5,5 x 10 ⁴ m/s
Korndichte	$\rho_{\rm d} = 2,65 \text{ g/cm}^3$
Mittlere Trockendichte aus Proctor-Versuch	$a_1 = 1.714 \text{g/cm}^3 \text{ boi} \text{ w} = 0.06$
nach DIN 18127: 2012-09	$p_d = 1,714$ g/cm bel w = 9 %
Dichteste Lagerung nach DIN 18126:1996-11	n _{min} =0,455
Lockerste Lagerung nach DIN 18126:1996-11	n _{max} =0,305
Reibungswinkel (Bruchzustand, aus dir. Scherversuch)	φ'=33,6°
Wichte des Sandes bei einer Lagerungsdichte D~0,78	γ'=10,72 kN/m ³
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach Beyer	k _f ≈3,9x10 ⁻⁴ m/s
(für dichte Lagerung)	

Tabelle II-11: Bodenkenngrößen des Modellsandes

II.1.1.19 Versuchsszenarien

Das Versuchsprogramm umfasst statische Zugversuche sowie Belastungstests bei hoher Herausziehgeschwindigkeit, die teilweise als undrainierte bis drainierte Zugtests bezeichnet werden können. Das zyklische Tragverhalten der Bucket-Gründung wird durch einen zyklischen Test untersucht. Hier wird ein typischer BSH-Bemessungssturm modellhaft simuliert. Bei allen Tests werden die Kräfte und die Wege erfasst. Der Modell-Bucket wird ohne Erzeugung von Druckdifferenz und nur durch Einpresskraft bei konstanter Einpressgeschwindigkeit installiert. Sowohl die Installationstests als auch Zugtests werden in dicht gelagertem Sand und bei konstantem Wasserstand durchgeführt.

Die Testrandbedingungen für die Modellversuche sind in Tabelle II-12 aufgelistet.

Tabelle II-12: Testrandbedingungen	ür die kleinm	aßstäblichen	Modellversuche
------------------------------------	---------------	--------------	----------------

Testrandbedingungen für die kleinmaßstäblichen Modellversuchen			
Art des Experiments	1g-Experiment,		
	ohne Überlagerungsdruck		
Bodenart	Quarzsand, nordsee-ähnlicher Mit-		
	telsand, dicht gelagert D=0.7-0,8		
Fluid	Wasser		
Sandverdichtungsverfahren	Rütteldruckverdichtung		
Verdichtungskontrolle	Ausstechzylinderverfahren		
Testobjekt	Einzel-Bucket		
Maßstab Modell-Bucket	1/33		
Geometrisches L/D-Verhältnis Modell-Bucket	D/L = 0,889		
Material Modell-Buket	Stahl, S235		
Steuerung	Kraft- und Weggesteuert		
Installationsmethode	Einpresskraft, konstante Eindringra-		
	te		
Belastungsrichtung	Axial		
Belastungsart	Statisch, zyklisch, transient		
Belastungsfrequenzen für den zyklischen Test	Variabel [0,1 – 12] Hz		
Randabstand Bucket-Mantel – Versuchsbehälter ~2,4D			

Randabstand Bucket-Mantel – Versuchsbehälter	~2,4D
Randabstand Bucket-Spitze – Bodenplatte	~4D

D: Durchmesser; L:Bucket-Länge

Folgende Annahmen wurden für die Versuchsdurchführung getroffen:

- Der Zustand des Bodens verändert sich gering bei und nach der Einpressinstallation
- Der Porenanteil "n" ist nach der Rütteldruckverdichtung nahezu homogen im gesamten Sandkörper
- Es wird nach der Sandverdichtung von einer annähernden vollständigen Wassersättigung im Modellsand ausgegangen
- Der Einfluss von Schwankungen der Temperatur und des atmosphärischen Drucks auf die Einpressinstallation und das drainierte Zugtragverhalten sind vernachlässigbar. Bei den schnellen und den zyklischen Tests sollte die Messung vom Porenwasserdruck jedoch korrigiert werden
- Unvermeidbare geringe Schiefstellungen nach der Bucket-Installation haben keinen großen Einfluss auf das axiale Tragverhalten und werden daher bei der Testauswertung nicht berücksichtigt
- Durch die konsequente Einstellung von versuchs-spezifischen PID-Regelungsparametern erhöht sich die Qualität der Leistung des Zylinders

II.1.1.20 Aufbau und Validierung des kleinmaßstäblichen Demonstratormodells

II.1.1.21 Teststand

Der aufgebaute Versuchsstand (Abbildung II.20) besteht im Wesentlichen aus:

- einem Versuchsbehälter mit den Abmessungen: d x l x t =1,58x1,60x0,008 m mit einem Volumen von ca. 3 m³
- einer Last-Rahmenkonstruktion aus Stahl, bestehend aus zwei Stielen und einer Traverse zur Durchführung von axialen Belastungstests
- einem Trägerrost als Fundament für den Versuchsbehälter und für die Last-Rahmenkonstruktion
- zwei Arbeitspodesten
- einem Be- und Entwässerungssystem bestehend aus einem Lochblech, einer Edelstahldrahtgewebe, einer Rohrleitung DN 40, Filterkies, einem Manometer und mehreren Absperrschiebern
- einem 1000-Liter Wasserbehälter
- einer Kreiselpumpe
- einem Pneumatikzylinder
- einem Regler und PC

Insgesamt benötigt der Versuchsstand eine Arbeitsfläche von ca. 4,50 x 1,80 m



Abbildung II.20: Versuchsstand in der Halle des Testzentrum Tragstrukturen Hannover

II.1.1.22 Vorversuche im Versuchsbehälter zum standarisierten Sandeinbau (Sandverdichtung und -auflockerung)

Voruntersuchungen zur Entwicklung eines standarisierten Sandeinbau- und verdichtungsverfahren wurden im Versuchsbehälter durchgeführt, mit dem Ziel einen homogenen und reproduzierbaren Testbaugrund für die geotechnischen Modellversuche herzustellen. Im Vordergrund steht die Erzeugung einer homogenen Porosität n im gesamten Sandkorngerüst nach der Verdichtung.

Bei den Vorversuchen wurde der Modellsand im Testbehälter mit Hilfe eines Hochfrequenz Innenrüttlers (Abbildung II.21) verdichtet. Der Rüttler, auch Rüttelflache genannt, wird hier in den unter dem Wasserstand liegenden Modellsand vertikal eingetaucht und langsam herausgezogen. Die Verdichtung des Sandes erfolgt bei diesem Verfahren rasterweise.

Darüber hinaus wurde ein symmetrisches Verdichtungsraster für insgesamt 44 Verdichtungspunkte mit einer Stahlmatte mit einer Masche von 150x150 mm definiert. Für die Verdichtung des Sandes im Testbehälter erwies sich für das in Abbildung II.23 dargestellte Verdichtungsraster der einmalige Einsatz des Rüttlers mit einem Flaschendurchmesser R_d=38 mm als ausreichend. Auf diese Weise konnte der Modellsand unter dem Wasser mit einer dichteren Lagerungsdichte D~0,75-0,80 eingebaut werden.

Die Lagerungsdichte D beschreibt, in welchem Lagerungszustand sich ein Boden befindet. Sie stellt dar, wie eng die Sandkörner in einem definierten Volumen stehen bzw. wie groß der Porenanteil einer Bodenprobe ist. Für die Ermittlung der Lagerungsdichte ist die Bestimmung des natürlichen bzw. eingebauten Porenanteils n sowie der Wert des Porenanteils für die dichteste und lockerste erreichbare Lagerung des Modellsandes n_{min} und n_{max} (Tabelle II-11) im bodenmechanischen Labor erforderlich.

$$D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$$
 Gleic

Gleichung II-VII



Abbildung II.21: Hochfrequenz Innenrüttlers

Abbildung II.22: Stahlmatte



Abbildung II.23: Verdichtungsraster

Da sich die Spannungen im Boden durch die während der Experimente aufzubringenden Beanspruchungen stellenweise verändern, soll der Modellbaugrund für weitere Versuche erneut aufbereitet werden. So wird der Sand im Testbehälter nach jedem Test mittels eines nach oben gerichteten hydraulischen Gradienten zunächst zu einem homogenen lockeren Zwischenzustand gebracht (Sandauflockerung), der mit Hilfe des Füllleitungssystems erzeugt wird. Der zulässige hydraulische Gradient für den Modellsand wurde anhand der Ergebnisse von kleinmaßstäblichen Versuchen ermittelt. Für die Auflockerung des Sandes im Versuchsbehälter betrug sein Wert rd. 0,75 bis 0,8.

Der Wasserdruck in der Fülleitung wurde mit einer an einem 1000-I Wasserbehälter angeschlossenen Kreiselpumpe generiert. Der für die Sandauflockerung zulässige Wasserdruck wurde mit einem in die Fülleitung eingebauten Manometer abgelesen und mit einem Kugelhahn gesteuert. Nach der Sandauflockerung erfolgten die Verdichtung- und Aufbereitungsarbeiten für den weiteren Versuch. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass der Sand nach jedem Versuch nicht ausgebaut werden muss.

II.1.1.23 Verdichtungskontrolle

Die Homogenität der Sandverdichtung im Testbehälter wurde durch die Entnahme und anschließende Auswertung von Bodenproben (Ausstechzylinder-Verfahren) zur Ermittlung der Porosität n und Lagerungsdichte D nach DIN 18126 festgestellt. Zur Beurteilung der Homogenität der Rütteldruckverdichtung wurde eine maximale charakteristische Porosität n_{k,d} im Modellsand für eine dichte Lagerungsdichte D=0,75 als Akzeptanzkriterium gefordert. Die Sandproben wurden im Feuchtzustand entnommen, kurz nach der langsamen Absenkung des Wasserstandes im Versuchsbehälter und danach im bodenmechanischen Labor untersucht. Der Modellsand konnte mit einer dichteren Lagerungsdichte D~0,75-0,80 eingebaut werden. Eine qualitative Überprüfung der Homogenität der Sandverdichtung für die gesamte Sandeinbauhöhe kann theoretisch künftig mit dem Einsatz einer miniaturisierten Druck- oder Rammsonde erfolgen.

II.1.1.24 Testobjekt Modell-Bucket D270

Das Modell-Bucket für die Experimente (Abbildung II.24) wurde aus Stahl S235 hergestellt und besitzt einen Durchmesser von 0,27 m und eine Länge von 0,24 m. Die Schürze (Mantel) zeigt eine Stärke von rd. 3 mm. Als Deckel dient eine runde starre Stahlplatte (t = 15 mm) mit Bohrungen für die Verschraubung der Luft- und Wasserventile. Das Modell-Bucket stellt im Experiment das Gründungselement eines Substruktur-Beines der 4er-Jacket (Abbildung II.1) im Maßstab 1/33 dar.



Abbildung II.24: Modell-Bucket D270

II.1.1.25 Installationstests

Der Modell-Bucket wurde im Experiment mit einer konstanten Eindringgeschwindigkeit und ohne Erzeugung vom Unterdruck installiert. Es wurden zwei verschiedene Eindringraten $\dot{z} = 0,10$ und 0,05 mm/s getestet. Bei der Installation waren die Wasser- und Luftventile offen. So wurde die Entstehung einer Wasserströmung im Inneren des Buckets vermieden und somit die Bildung von Porenwasserdrück verhindert. Die in den Tests eingesetzten Eindringraten sind 3 bis 6-fach kleiner als die typischen Eindringraten für Suction Buckets im Offshore-Bereich. Die Installationskurven in Abbildung II.25 zeigen übereinstimmende Verläufe der Einpresskräfte über die Tiefe für die Eindringrate 0,05 mm/s und können als Plausibilitätskontrolle zur Bewertung der Reproduzierbarkeit des Sandeinbaus und der Sandverdichtung herangezogen werden. Bei der Bucket-Installation mit einer Eindringgeschwindigkeit von $\dot{z} = 0,10$ mm/s zeigt die Last-Penetrations-Kurve (Abbildung II.26) einen ähnlichen Verlauf wie bei $\dot{z} = 0.05$ mm/s. Der Kontakt zwischen Deckel und Boden wurde am Ende der Installationstests bei einer Einpresskraft von ca. 5,5 bis 6 kN hergestellt, wobei nach der Installation die Druckbelastung bis rd. 6,5 kN erhöht wurde, um die gleiche Belastungsgeschichte in allen Tests zu erzeugen.







Abbildung II.26: Installationstest Eindringrate 0,1 mm/s

Fraunhofer IWES

II.1.1.26 Statischer Zugversuch (drainierter Zugtest)

Die statische Grenzzugtragfähigkeit des Modell-Buckets D270 wurde anhand von drainierten Zugtests untersucht, bei denen eine langsam steigende Belastung stufenweise aufgebracht wurde. Die Belastung wurde solange gesteigert bis ein vordefiniertes Versagenskriterium erreicht wurde. Beim Erreichen der Grenzverformung in der Form einer Grenzhebung oder eines Kriechmaßes wurde die wirkende axiale Kraft abgelesen, die die statische Grenzzugtragfähigkeit beschreibt. Die Belastungsstufen für den drainierten Versuch wurden nach den Empfehlungen der DGGT (2012) für statische Zugprobebelastungen (Abbildung II.27) definiert und im Modell umgesetzt.





In DGGT (2012) werden zwei Kriterien für die Bestimmung der Zuggrenztragfähigkeit durch statische Probebelastung empfohlen:

• Kriterium der Grenzsetzung:

$$R_{t;m} = R(S_{sg,t})$$
 Gleichung II-VIII

• Kriterium des Kriechverhaltens

 $R_{t;m} = R(k_s)$ Gleichung II-IX

und

$$k_s = \frac{s_b - s_a}{lg(t_b/t_a)}$$
 Gleichung II-X

Mit:

R_{t,m}: Mittelwert der Grenzzugtragfähigkeit bei den statischen Zugversuchen

- S_{g,t}: 0,1 D =Grenzhebung, wobei D =Durchmesser
- k_s: Kriechmaß (Zeitabhängige Verschiebung des Pfahles unter konstanter Last)
- s_b ; s_a : Hebungen in der Zeit b und a

t_b ; t_a: Zeit b und a

Die Abbildung II.28 zeigt die Zug-Hebungslinien der statischen Zugversuche. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Lastverformungsverläufe der drainiert durchgeführten Zugversuche sehr ähnlich sind, was ein qualitatives Indiz der Reproduzierbarkeit ist. Die statischen Grenzzugtragfähigkeiten bei 0,10D unterscheiden sich untereinander nur

um ca. 6%. Die mittlere drainierte Grenztragfähigkeit des Modell-Buckets D270 beträgt nach dem Versagenskriterium der Grenzhebung nahezu $R_{t,k,m}$ = 285 N.

Das Kriechmaß k_s kann im Grenzzustand der Tragfähigkeit rd. k_s \approx 2 mm (DGGT, 2012) betragen. Dieser Wert wurde bei einer Last von ca. R_{t;k} = 232 und 240 N und ab einer absoluten Hebung von ca. 4-4,5 mm bei den statischen Tests erreicht. Eine mittlere statische Grenzzugtragfähigkeit von R_{t;k,m}= 236 N wurde nach diesem Versagenskriterium ermittelt.

Während der statischen Tests waren die Ventile des Bucket-Deckels offen. So wurde die Bildung vom Porenwasserüberdruck während der Belastung vermieden. Die statischen Tests können somit als drainierte Tests bezeichnet werden.





II.1.1.27 Zugversuche mit höherer Verschiebungsrate (teilweise undrainiert bis undrainierte Zugtests)

Es wurden zwei weggesteuerte Zugversuche mit unterschiedlichen Herausziehgeschwindigkeiten V₁=2 mm/s und V₂=8 mm/s zur Untersuchung des transienten Zugtragverhaltens der Modell-Bucket-Gründung D270 bei teilweiser undrainierten bis undrainierten Entwässerungsbedingungen durchgeführt. Bei den Tests wurde eine kurzzeitige Erhöhung der Grenzzugtragfähigkeit des Modell-Buckets festgestellt (Abbildung II.29). Die transiente Erhöhung der Tragfähigkeit kann als Tragreserve für spezielle Offshore-Lastsituationen betrachtet werden. Sie ist sowohl auf die Bildung von Unterdruck im Inneren des Buckets als auch auf eine transiente Veränderung der Mantelreibung zurückzuführen. Beim ersten Test (V=2 mm/s) wurde eine Grenzzugtragfähigkeit von R_{t,t_2mm/s} =1186 N bestimmt. Dieser Wert stellt einen nahezu 4-fach größeren Zugwiderstand im Vergleich zu der statischen Grenztragfähigkeit dar. Nach diesem Test wurde festgestellt, dass eine Dichtung im Deckelbereich ersetzt werden musste. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die fast unbemerkbare, leichte Abnahme der Tragfähigkeit ab einer Hebung von ca. 23 mm (Abbildung II.29) auf einen leichten Unterdruckverlust zurückzuführbar sein könnte.

Bei dem Test mit höherer Verschiebungsrate V= 8 mm/s (Abbildung II.30) betrug die transiente Zugtragfähigkeit ca. $R_{t,t.8mm/s}$ = 2900 N und ist dementsprechend 10-fach größer als der statische (drainierte) Wert. Bei der Auswertung der Schnellversuche wurde das Versagenskriterium der Grenzhebung S_{qt} = 0,1 D, festgelegt.



Abbildung II.29: Zugtragverhalten bei schneller Belastung. Verschiebungsrate V=2 mm/s





Das Tragverhalten unter schneller Lasteinwirkung kann als teilweise undrainiert bis undrainiert bezeichnet werden. Bei den Zugtests unter schneller Belastung war deutlich erkennbar, dass für die Mobilisierung der vorhandenen Tragreserven relativ größere Hebungen erforderlich sind. Der Unterdruck konnte beim Experiment nicht quantifiziert werden, da der Einsatz vom Porenwasserdruckgeber aus technischen Gründen nicht möglich war. Da diese Größe maßgebend für die Abschätzung der transienten Zugtragfähigkeit ist, sollten künftig weitere Tests mit Porenwasserdruckmessung durchgeführt werden.

II.1.1.28 Post-zyklischer statischer Zugversuch

Ziel der zyklischen Versuche ist das Trag-und Verformungsverhalten des Modell-Buckets D270 unter offshore-typischer Lasteinwirkung qualitativ zu beurteilen. Für die zyklischen Versuche wurden repräsentative Lasten für einen Suction Bucket der ausgelegten Multipod-Struktur für eine OWEA von Overdick (Abbildung II.1) ermittelt. Für die Gründung wurde gemäß BSH-Anforderungen einen 35h-Bemessungssturm simuliert (Abschnitt II.1.1.8). Tabelle II-13 liefert Informationen über die Belastungssituationen, die sich aus dem 35h-BSH-Bemessungsereignis (BSH, 2012) ergeben. Die Einwirkungssituationen in Tabelle II-13 stellen Prototyplasten auf Höhe des Seebodens für ein Strukturbein, das auf Druck und Zug belastet ist, dar. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die meisten Einwirkungen im Druckschwelllasten-Bereich auftreten. Allerdings sind die Effekte aus den größeren Zugkräften für die Bucket-Bemessung maßgebend.

Tabelle II-13: Belastungssituationen für einen BSH-Bemessungssturm für ein Struktur-Bein unter Druck und Zugbeanspruchungen und prozentuale Verteilung

Belastungssituationen BSH-Bemessungssturm	%
Druckschwelllasten	98,1
Asymmetrische Druckwechsellasten	1,6
Symmetrische Wechsellasten	0,11
Asymmetrische Zugwechsellasten	0,08
Zugschwelllasten	0,09

Die Prototyplasten wurden durch die erarbeiteten Skalierungsfaktoren für die Kraft und die Zeit (Abschnitt II.1.1.12) in Modelllasten bzw. Blocklasten umgerechnet. Die im Technikum simulierten Mehrstufenkollektive entsprechen Extremlasten im Schwell- und Wechsellastbereich, die mit variablen Amplituden und Wellenperioden auftreten können.

Nach der zyklischen Belastung wurde eine akkumulierte Hebung von S_{t,akk}=4 mm erfasst. Anschließend wurde unmittelbar nach der zyklischen Belastung ein postzyklischer statischer Zugversuch durchgeführt. Hier wurde eine post-zyklische statische Zugtragfähigkeit von rd. R_{t,k,post-zyk} = 320 N gemessen. Dieser Wert wurde den statischen Zugtests ohne zyklische Vorbelastung gegenübergestellt (Abbildung II.31). Dadurch lässt sich zeigen, dass sich die maximale statische drainierte Grenztragfähigkeit nach den simulierten zyklischen Lastsituationen trotz einer akkumulierten Hebung von ca. 4 mm nicht verschlechtert hat. Es wurde dagegen ein post-zyklisch statischer Zugwiderstand gemessen, dessen Wert 12% höher ist als der statische Zugwiderstand.

Ein Grund für die Zunahme der Tragfähigkeit kann eine zusätzliche Verdichtung im Sandgerüst infolge zyklischer Belastung sein. Allerdings ist aus der fachlichen Literatur bekannt, dass oft die post-zyklisch statische Tragfähigkeit einer Bucket-Gründung erheblich abgemindert werden kann (Kelly et al. 2006).

Für eine eventuelle Berücksichtigung der vorhandenen transienten Zugtragreserven einer axial zyklisch belasteten Bucket-Gründung bei der Bemessung, sind weitere experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung zulässiger Lastamplituden dringend erforderlich. Die Prognosefähigkeit der noch zu entwickelnden Bemessungsgrundlagen kann sich durch Testergebnisse aus Modellversuchen im großen Maßstab deutlich erhöhen.



Abbildung II.31: Vergleich statischer Tests mit und ohne zyklische Vorbelastung

II.1.1.29 Nachrechnung der statischen Modellversuche und Schlussfolgerungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse

Der statische Zugversuch wurde mit dem in Abschnitt II.1.1.13 beschriebenen numerischen Modell nachgerechnet. Die statische Tragfähigkeit wird hier durch die Scherspannung zwischen Boden und Bucket-Schürze bestimmt. Die Ergebnisse der numerischen Simulation zeigen, dass die Mantelreibung bei etwa 0,45 mm voll aktiviert ist, wobei beim Experiment die Grenztragfähigkeit ab eine Verschiebung von 1,45 mm erreicht wurde. Im Bereich der Anfangssteifigkeit (kleine Verformungen) wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den Testergebnissen und den Ergebnissen der numerischen Simulation mit den Eingabeparametern der Tabelle II-7 erreicht (Abbildung II.32).

Allerdings weichen beide Kurven mit zunehmender Hebung voneinander ab. Die numerische Berechnung bricht bei $R_{t,k} = 206$ N ab. Durch die Erhöhung des Reibungswinkels auf 40° und des Dilatanzwinkels auf 10° im numerischen Modell konnte eine höhere Zugtragfähigkeit berechnet werden. Hier lag der Wert des Grenzzugwiderstands $R_{t,m}$ bei 228 N, welcher nahezu so groß war wie die nach dem Kriterium des Kriechverhaltens experimentell ermittelte statische Grenzzugtragfähigkeit $R_{t,m} = 236$ N. Allerdings wird durch diese Anpassung im numerischen Modell die Anfangssteifigkeit leicht überschätzt.



Abbildung II.32: Vergleich statischer Tests und numerische Simulation für den Bereich der Anfangssteifigkeit

Durch die Anwendung des Übertragungsfaktors für die Kraft (Tabelle II-4) würde sich für den Prototyp eine statische Zugtragfähigkeit von ca. 8,75 MN ergeben. Der nach den Empfehlungen von API (2000) und GL (2005) abgeschätzten statischen Zugwiderstand für einen Bucket-Prototyp, der sich in einem vergleichbaren dicht gelagerten Nordseesand befinden würde, beträgt etwa 6 MN. Allerdings befinden sich oft die obersten Bodenschichten des Nordseebodens in einem lockeren, mitteldichten bis dichten Lagerungszustand (s. Referenzbodenprofil 2 im Abschlussbericht der Leibniz Universität Hannover). Für das im Verbundprojekt idealisierte "Referenzbodenprofil 2" wurde eine prototypische statische (drainierte) Zugtragfähigkeit von ca. $R_{t,k} = 5$ MN abgeschätzt. Eine direkte Übertragung der experimentell ermittelten statischen Grenzzugtragfähigkeit auf die reale Größe ist durch die erarbeiteten Modellgesetze aufgrund der Modellfehler (u.a. inkorrekte Abbildung der Scherfugen) nicht möglich.

Bei den durchgeführten schnellen und zyklischen Tests wurde eine kurzfristige Erhöhung der Zugtragfähigkeit infolge des sich unter dem Deckel gebildeten Unterdrucks beobachtet. Da der Unterdruck während der Experimente nicht erfasst werden konnte, werden keine konkreten Aussagen zur Übertragbarkeit dieser Größe auf das Prototypverhältnis getroffen.

Um das Prototypzugtragverhalten anhand der Auswertung von Modellversuchen zu prognostizieren, sind weitere experimentelle Untersuchungen mit Modellen in verschiedenen Maßstäben (Modellfamilien) sowie Messungen vom Porenwasserdruck, insbesondere bei großmaßstäblichen Modellversuchen erforderlich. So können empirische Maßstabfaktoren gewonnen werden, die die Modellgesetze ergänzen und die Prognosefähigkeit des Prototyptragverhaltens durch die Anwendung von Übertragungsfaktoren und Extrapolationsverfahren erhöhen.

II.1.1.30 Standortanalyse

Suction-Bucket-Gründungsstrukturen stellen an den Untergrund spezifische Anforderungen, die sich von denen anderer Gründungstypen teilweise signifikant unterscheiden. Die wichtigste Eigenschaft eines Baugrunds ist zunächst eine ausreichende Tragfähigkeit. Dies führt zum generellen Ausschluss organogener Böden wie Torf, Klei, Mudde, Faulschlamm, Schlick oder sehr weicher und breiiger, bindiger Böden und auch sehr locker gelagerter nichtbindiger Böden (z.B. Sand bis Kies). Der Boden darf zudem nicht stark setzungsempfindlich sein was zum Beispiel auf plastische weiche Tone zutrifft. Problematisch ist darüber hinaus ein sehr heterogener Baugrundaufbau mit einem Wechsel von tragfähigen und nicht tragfähigen Schichten bzw. mit Einheiten von sehr unterschiedlichem Verformungsverhalten und/oder unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeiten, wie sie z.B. im Bereich von subglazialen Rinnenstrukturen zu finden sind.

Für den Installationsvorgang selbst ergeben sich weitere Anforderungen, so können z.B. größere Hindernisse im Boden (z.B. Steine oder Blöcke mit einem Durchmesser von mehr als 20-30 cm) zu einer Beschädigung der Gründungsstruktur führen (Beulen), oder sogar ein vollständiges Einbringen des Saugpfahls verhindern. Betroffen sind beispielsweise Erosionshorizonte (im Extremfall Steingründe), aber auch Geschiebemergelagen.

Kritische Baugründe sind in diesem Zusammenhang generell auch geschichtete Böden mit eingelagerten bindigen, tonreichen Schichten, Sedimenten mit einer sehr geringen Wasserdurchlässigkeit (z.B. ausgeprägt plastischer Ton) oder ein halbfester bis fester bindiger Boden oder sehr dichte bis extrem dichte Sande.

Im Hinblick auf die Betriebsphase ist zu beachten, dass prinzipiell gut geeignete Bodentypen wie Fein- bis Mittelsand und schluffig-feinsandige Böden zu Kolkbildung neigen können. Insbesondere ist dies bei lockerer bis mitteldichter Lagerungsdichte zu beobachten. Ein weiterer potentieller aber bislang schlecht einzuschätzender Risikofaktor ist das Vorkommen von Gas in den oberen Bodenschichten (Shallow Gas).

Neigungen des Untergrunds können von Suction Bucket-Gründungen nur in geringem Maße ausgeglichen werden, daher sollte das Gefälle des Meeresbodens 1° nicht übersteigen.

Mit dem Ziel einer systematischen Abschätzung der Eignung größerer Offshore-Gebiete in Deutschland wurde im Rahmen dieses Projekts zunächst ein Kriterienkatalog erstellt in dem verschiedene Bodeneigenschaften hinsichtlich Ihrer Eignung als Baugrund für Suction Bucket-Fundamente bewertet wurden.

Auf Basis dieses Kriterienkatalogs sollte beispielhaft für die Nordsee eine erste Abschätzung vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wurde auf verfügbares Datenmaterial zurückgegriffen um eine erste Annäherung zu ermöglichen. Es ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass die Datensätze für Nord-und Ostsee aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit auf vergleichsweise wenigen Beprobungen beziehungsweise Vermessungen basieren. Mit dem Ziel einer vollständigen Abdeckung wurden die Messwerte in die Fläche extrapoliert.

Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung stand als flächenmäßig umfangreichstes Datenmaterial zunächst eine digitale Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Nordsee) seitens des BSH zur Verfügung, die auf der Klassifikation von Figge basiert), jedoch nicht die gesamte Fläche der deutschen Nordsee umfasste. Die in diesem Datensatz vorliegenden Informationen beschränken sich auf die oberflächennahen Bodenschichten (ungefähr die obersten 20 cm). Es können jedoch, in Abhängigkeit der Auslegung der Suction Bucket-Gründungsstruktur, die obersten 20 m für den Lastabtrag von Relevanz sein. Für die tieferliegenden Einheiten sind keine systematischen Untersuchungen verfügbar, sodass sich für eine erste Betrachtung auf die oberflächennahen Schichten beschränkt werden musste.

Neben der generellen Verteilung der Oberflächensedimente war eine weitere relevante Information für die Standortbewertung der Verlauf des früheren Elbe-Urstomtals (siehe Abbildung II.33). In diesem Bereich finden sich unter einer meist recht dünnen Deckschicht aus Sanden, durchgehend sehr weiche, bindige Sedimentschichten, deren Vorkommen aus o.g. Gründen der Karte der Oberflächensedimente nicht zu entnehmen ist.

Obwohl der Nordseeboden im Allgemeinen vergleichsweise einheitlich aufgebaut ist, können sich örtlich die Baugrundbedingungen im Maßstab von nur wenigen Metern deutlich ändern. Insbesondere trifft dies auf Bereiche zu in denen glaziale Rinnenstrukturen (Tunneltäler) auftreten.

Der Verlauf dieser subglazialen Rinnen, die häufig eine sehr heterogene Füllung aufweisen und dadurch ein erhöhtes Risiko für Suction Bucket-Gründungen (allerdings auch für andere Gründungstypen) darstellen ist, daher eine weitere wichtige Standortinformation (Abbildung II.34). Auch diese Strukturen sind durchgehend von jüngeren Sedimenten bedeckt und somit in der Karte der Oberflächensedimente nicht zu erkennen.



Abbildung II.33: Verlauf des ehemaligen Elbeurstromtals im deutschen Nordseegebiet. Datengrundlage: (GPDN)

Die Kartierung des früheren Elbeurstromtals basiert v.a. auf der Auswertung eigener mehrkanalseismischer und sedimentechographischer Daten, das prognostizierte Auftreten subglazialer Rinnen basiert auf Literaturangaben und auf eigenen seismischen Vermessungen.



Abbildung II.34: Vermuteter Verlauf subglazialer Rinnen im deutschen Nordseegebiet. Datengrundlage: (GPDN)

Im Zuge des laufenden Projekts eröffnete sich die Möglichkeit auf einen neuen, deutlich erweiterten und überarbeiteten Datensatz zuzugreifen (Oberflächensedimentverteilung der deutschen Nordsee, Geopotenzial Deutsche Nordsee GPDN) der nun auch das komplette deutsche Nordseegebiet umfasste und in dem die neuesten Erkenntnisse aus der Forschung berücksichtigt wurden. Die somit nun verfügbare deutlich verbesserte Datengrundlage rechtfertigte eine vollständige Überarbeitung, bzw. ein neues Aufsetzen des Standortanalysemodells im laufenden Projekt.

Auf Grundlage der verfügbaren Daten sollten den deutschen Offshore-Gebieten in der Nordsee Risikoklassen zugeordnet werden. Zu diesem Zweck wurde jeder relevanten und verfügbaren Flächeninformation (z.B. dem Oberflächensedimenttyp) ein Wert zugewiesen, der das Risiko beschreiben sollte in diesem Abschnitt einen für Suction Buckets ungeeigneten Standort anzutreffen.

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein solcher Wert nicht zwingend die tatsächliche Eignung beschreibt, da für eine solche Aussage die Datengrundlage nicht ausreichend ist. Es ist möglich und auch erwartungskonform, dass die tatsächliche Eignung eines Standorts von der so bestimmten Risikoklasse regelmäßig abweicht (also z.B. gute Eignung des Bodens in Gebieten mit hoher Risikoklasse, oder schlechte Eignung in Gebieten mit geringem Risiko).

Die folgende Tabelle fasst die verschiedenen identifizierten geotechnischen Risiken im Hinblick auf Bodentypen, Geologie, bzw. die generellen Standortbedingungen zusammen:

Eigenschaft	Risiko v.a. für IP=Installation, BC=Tragfähigkeit, DI=Deformation/Schrägstellung
(Sehr) weiche Bodenbedingungen (tonige/siltige/organische Bodenty- pen)	IP, BC, DI
(Sehr) weiche Böden im Liegenden von eigtl. geeigneten Untergründen (z.B. ehemaliges ElbeUrstromtal,)	(IP), BC, DI
Subglaziale Tunneltäler mit hetero- gener Füllung, insbesondere Ge- schiebemergel (Steine, Blöcke) oder Weichsedimenten	IP
Hoher Kiesanteil => hohe Permeabili- tät	IP
Geschichtete Böden (gering durchläs- sige Böden in generell durchlässigem Baugrund	IP
(Sehr) harte Böden (high undrained shear strength)	IP
Shallow Gas Vorkommen	unbestimmtes Risiko,vor allem für Be- triebsphase
Geringe Wassertiefe (< 25-30m)	IP
Untergründe mit Neigungen >1°	IP, BC, DI

In Abhängigkeit der jeweiligen Risikoabschätzung für die verschiedenen Paramater wurden Risikowerte wie folgt zugewiesen:

- 0 = geringes Risiko
- 1 = bedingtes Risiko
- 2 = moderates Risiko
- 3 = erhöhtes Risiko

Da die vorliegenden Informationen prinzipiell stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind, umfasst der Wertebereich weder den Fall "kein Risiko", also einen vollständigen Risikoausschluss, noch den Fall "sicher ungeeignet" also ein Risiko von 100%.

Eine Ausnahme hiervon bildet der Parameter: "Wassertiefe", für dessen Bestimmung ein hochauflösendes Modell vorliegt (BSH, siehe Abbildung II.35) und dessen Unsicherheit als sehr gering einzuschätzen ist. Potenzielle Standorte die sich in Wassertiefen < 20 m befinden, wurden von vornherein verworfen.



Abbildung II.35: Bathymetrische Karte des deutschen Nordseegebiets (Quelle: BSH)

Das Modell der Nordsee-Oberflächensedimente liegt in zwei unterschiedlichen Klassifikationen vor:





Abbildung II.36: Verteilung der Oberflächensedimente in der deutschen Nordsee nach Folk



Abbildung II.37: Verteilung der Oberflächensedimente in der deutschen Nordsee nach DIN 18311

Während die Klassifikation nach Folk Böden lediglich anhand ihrer Hauptkorngrößenverteilung unterteilt, berücksichtigt die Klassifikation nach DIN18311 u.a. den wichtigen Parameter 'Konsistenz' bei bindigen Böden, bzw. fokussiert auf den Kiesund den Feinkornanteil bei nichtbindigen Böden (siehe Abbildung II.38)



Abbildung II.38: Sedimentklassifikation nach Folk und DIN 18311

Aufgrund der für unsere Zwecke besseren Eignung wurde die folgende Risikobewertung anhand der Klassifikation nach DIN18311 vorgenommen:

Klassifikation nach DIN 18311	Risikobewertung 0=geringes Risiko 1=bedingtes Risiko 2=moderates Risiko 3=erhöhtes Risiko		
Nichtbindige Böden			
NB1 + NB2	0		
NB3	1		
NB4	2		
NB5	3		
Bindige Böden			
BOB1 (breiig)	3		
BOB2 (weich-steif)	2		
BOB3 (halbfest)	2		
BOB4 (fest)	3		
Zusatzklasse			
S (Steine und Blöcke)	3		

 Tabelle II-15: Risikobewertung anhand der Klassifikation nach DIN 18311

Da das Gebiet des Elbe Urstromtals wie oben beschrieben meist aus weicheren Sedimenten aufgebaut ist, die unter einer dünnen Decke rezenter Sandschichten anstehen, ist hier das Risiko für Suction Bucket-Gründungen erhöht (3).

Subglaziale Tunneltäler sind in der Nordsee weiter verbreitet als noch vor wenigen Jahren angenommen. Sie weisen nicht selten heterogene Füllungen auf, die beispielsweise Geschiebemergel und Weichsedimente enthalten. In diesem Fall wären die Baugrundbedingungen für Suction Buckets eher ungünstig. Jedoch sind viele Angaben aus der Literatur bezüglich des genauen Verlaufs solcher Strukturen mit einer erhöhten Unsicherheit belastet, sodass das Risiko nicht zu hoch angesetzt werden kann. Das vermutete Auftreten dieser Strukturen wird daher mit einem Risiko von 1 klassifiziert.

Die die verschiedenen hier betrachteten Baugrundrisiken voneinander weitgehend unabhängig sind, oder zumindest in ihrer Abhängigkeit zueinander nicht qualifiziert werden können, wurden die einzelnen Risiken für die finale Risikoabschätzung addiert.

Die auf diese Weise generierten Risikoklassen liegen im Wertebereich zwischen 0 und 7 (Abbildung II.39). Eine darüber hinausgehende qualitative Einordnung, bzw. eine Benennung der einzelnen Klassen wurde an dieser Stelle nicht für sinnvoll erachtet.

Eingehende Darstellung



Abbildung II.39: Risikobewertung des deutschen Nordseegebiets im Hinblick auf den Einsatz von Suction Bucket-Gründungsstrukturen

II.1.1.31 Bewertung der Standortanalyse

Die in diesem Projekt durchgeführte Standortanalyse für das deutsche Nordseegebiet zeigt ein uneinheitliches Bild. Generell scheinen sich weite Gebiete, insbesondere auch die geplanten Windparkflächen in der deutschen Nordsee (Abbildung II.40), prinzipiell für den Einsatz von Suction Bucket-Gründungsstrukturen zu eignen. Ein erhöhtes Risiko, sehen wir u.a. für Gebiete, die sich im Verlauf des ehemaligen Elbeurstromtals befinden. In anderen Bereichen erscheint das Risiko für diesen Fundamenttyp im Allgemeinen eher gering.



Abbildung II.40: Risikoklassen vor dem Hintergrund geplanter Offshore-Windparks

Es sei an dieser Stelle jedoch noch einmal ausdrücklich hervorgehoben, dass sich diese Risikoanalyse nur auf das vorhandene und verfügbare Datenmaterial stützen kann. Insbesondere die zwangsläufige Beschränkung auf die obersten Sedimentschichten ist problematisch und muss bei jeder Bewertung stets entsprechend berücksichtigt werden. Es kann sich bei einer solchen Standortanalyse nur um eine erste Annäherung handeln.

II.1.1.32 Fazit Standortanalyse

Es bleibt aufgrund der sehr lückenhaften Datenlage unerlässlich, betreffende Gebiete im Vorfeld jeweils gezielt zu erkunden. Es empfiehlt sich zu diesem Zweck eine kombinierte Untersuchung unter Einbeziehung geologischer, geotechnischer und geophysikalischer Methoden. Während geologische und geotechnische Untersuchungen wichtige punktuelle Informationen und Parameter liefern (Sedimenttyp, Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, etc.), können diese Erkenntnisse mittels geophysikalischer Untersuchungen in die Fläche übertragen werden, sodass ein dreidimensionales geologisches Baugrundmodell entwickelt werden. Eine Herausforderung an die geophysikalische Vermessung stellt die für diesen Fundamenttyp spezifische Anforderung der Detektion kleinerer Objekte (Steine) im Sediment bis in Tiefen von 20 m (ggf. darüber hinaus) und mit Durchmessern von nur wenigen Dezimetern dar. Insbesondere in sandigen Umgebungen gelangt man hinsichtlich der Signaleindringung herkömmlicher hochauflösender Messsysteme (z.B. Sedimentecholote), die eine Darstellung kleinerer Objekte theoretisch ermöglichen, schnell an physikalische Grenzen. Ggf. ist daher die Entwicklung neuer geophysikalischer Methoden empfehlenswert, bzw. notwendig, um für diesen Fundamenttyp geeignete Vermessungen durchführen zu können.

II.1.1.33 Gegenüberstellung der Ergebnisse und Ziele

Als Gesamtziel des Forschungsvorhabens WindBucket [BMWi FKZ 0325406A, 2012-2014] wurde die Beurteilung der Machbarkeit, der Anwendungsmöglichkeiten und grenzen sowie die ökologische und ökonomische Betrachtung von Suction Bucket-Fundamenten für den deutschen Offshore-Bereich verfolgt. Ergänzend sollte ein Bemessungskonzept für einen Prototypen erstellt sowie alternative Bauweisen für eine Suction Bucket-Gründung untersucht und numerische Simulationen zum Gesamtstrukturverhalten durchgeführt werden.

Die vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES im Verbundprojekt gesetzten Ziele umfassten numerische und praktische Arbeiten. Es sollten Suction Bucket-Gründungen in ein Gesamtanlagenmodell integriert und für Sensitivitätsanalysen verwendet werden. Weiterhin sollten im Rahmen der Planung, des Aufbaus und der Inbetriebnahme eines Versuchsstandes für kleinmaßstäbliche Experimente mit Suction Buckets Modellgesetze und Skalierungsmodelle erarbeitet sowie ein numerisches Modell des kleinmaßstäblichen Demonstrators erstellt werden. Die Eignung des Nordseebodens als Baugrund für Suction Bucket-Fundamente sollte ergänzend untersucht werden.

Auf der Grundlage der vorgestellten Ergebnisse (Abschnitt II.1.1 bis II.1.1.32), konnten alle Ziele realisiert werden.

Mit dem Gesamtanlagenmodell wurden vollständige aero-hydro-servo-elastische Simulationen für zwei Extremlastfälle sowohl mit gelenkig gelagerten Fußknoten als auch mit voll eingespannten Fußknoten durchgeführt. Es wurde bei dem geparkten Lastfall mit gelenkiger Lagerung eine maximale Zugkraft von rd. Z =12 MN berechnet. Zudem wurden Ermüdungslasten für die Gründung für einen 35-Std-Bemessungssturm (BSH) berechnet. Es wurde eine Sensibilitätsanalyse nach der Definition eines Interface (in Form eines DDL) zwischen dem Programm ADCos und dem feder-basierten Suction Bucket Modell durchgeführt. Hierbei wurde die Geometrie des Buckets variiert und die maximalen Verschiebungen mit Hilfe von verschiedenen Simulationen ermittelt. Durch die Implementierung des Bucket-Modells mit nicht linearen Federn in die Gesamtanlagensimulationen wurden realistischere Verformungsprognosen für verschiedene Prototyp-Geometrien ermittelt.

Experimentelle Untersuchungen zur Installation und zum Bucket-Tragverhalten konnten in einem entwickelten Teststand für kleinmaßstäbliche Modellversuche durchgeführt werden. Der aufgebaute Versuchsstand bietet eine reproduzierbare Testumgebung für die experimentellen Arbeiten sowie die Möglichkeit verschiedener Aspekte der Boden-Bucket-Interaktionen in einem nordseetypischen Modellsand zu untersuchen. Durch die durchgeführten Modellversuche zum axialen Bucket-Tragverhalten konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich des transienten sowie des statisch post-zyklischen Zugtragverhaltens von Suction Buckets gewonnen werden. Der Einfluss der zyklischen Belastung auf die vertikale Zugtragfähigkeit ist jedoch noch nicht sicher berechenbar (Abschnitt II.1.1.28). Aus diesem Grund sind weitere experimentelle Untersuchungen mit zyklischen Lasten notwendig. Im Vordergrund steht die genauere Abschätzung der Zugtragfähigkeit für eine eventuell partielle Berücksichtigung der Tragreserven infolge des Unterdrucks bei der Bucket-Bemessung.

Ein noch offener Aspekt der experimentellen Untersuchungen ist die Übertragbarkeit der Testergebnisse auf die reale Größe. Die aus den Modellgesetzen (Tabelle II-4) hergeleiteten Übertragungsfaktoren ermöglichten keine zuverlässige direkte Übertragung der Testergebnisse auf den realen Maßstab. Eine genauere Prognose des Prototyptragverhaltens könnte hier nur in Kombination mit empirischen Modellfaktoren erfolgen, die aus Experimenten mit Modellfamilien gewonnen werden müssen. Es wird daher empfohlen weitere experimentelle Untersuchungen mit Suction Buckets in verschiedenen Maßstäben, insbesondere im großen Maßstab, durchzuführen.

Als Ergebnis der Standortanalyse für die AWZ Deutschland, Bereich Nordsee, kann das Anwendungsrisiko für eine Suction Bucket-Gründung insgesamt als "überwiegend gering bis moderat" bewertet werden. In einigen Nordsee-Untergrundbereichen liegt jedoch auch ein aus geotechnischer Sicht erhöhtes Anwendungsrisiko (z. B. infolge Steine/Blöcke im Baugrund) vor. Eine Darstellung der prinzipiellen Eignung des deutschen Nordseebodens für eine Suction Bucket –Gründung liefert die erstellte grundlegende geotechnische Karte mit Risikoklassen (Abbildung II.40). Sie dient als erste Orientierung für Einsatzrisiken im Vorfeld von geotechnischen Voruntersuchungen sowie für Vorplanungen. Die globale Risikoeinschätzung zum Bucket-Einsatz erfolgte auf der Grundlage von teilweise nur sehr grob aufgelösten Geo-Daten. Die geotechnische Karte mit Risikoklassen soll daher eine detaillierte Erkundung des geologischen Untergrundes/Baugrundes sowie auch der Meeresbodenoberfläche am jeweiligen Standort nicht ersetzen.

Nach den positiven Einschätzungen der Projektpartner Fraunhofer IWES, OVERDICK, Leibniz Universität Hannover und Senvion hinsichtlich der technischen Machtbarkeit einer 4-beinigen Jacket-Struktur mit einer Suction Bucket-Gründung für OWEA sollen die Ergebnisse dieser Untersuchungen zur Identifizierung und Umsetzung strategischer Entwicklungslinien für die Entwicklung von experimentell abgesicherten Bemessungsgrundlagen für Bucket-Gründungen anhand von großmaßstäblichen Modellversuchen genutzt werden. Eine dafür konzipierte Testeinrichtung steht im Testzentrum Tragstrukturen Hannover zur Verfügung.

Die großmaßstäblichen Tests mit Suction Buckets sind dringend erforderlich. Sie dienen für die schnellstmögliche Schaffung der planerischen und ingenieurtechnischen Voraussetzungen für die Errichtung einer OWEA als Prototyp einer 4er-Jacketkonstruktion mit Suction Buckets für größere Wassertiefen in einem Zeitraum von 3-4 Jahren.

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die wichtigsten Positionen der Aufwendungen, die dem Fraunhofer IWES bei der Projektbearbeitung entstanden sind, sind in Tabelle II-16 aufgelistet. Eine detaillierte Auflistung dem Aufwendungen ist dem Verwendungsnachweis für Zuwendungen auf Kostenbasis des Fraunhofer IWES zu entnehmen.

Kostenart	Geplante Aufwendungen (als % der bewilligten Aufwendungen)	Tatsächlichen Auf- wendungen (als % der bewilligten Aufwendungen)	Differenz zum Plan in%
Personalkosten	81,75%	85,49%	+3,74%
Investitionskosten	12,24%	13,34%	+1,1%
Reisekosten	2,26%	1,32%	-0,94%
Zusätzliche Kosten	3,75%	1,85%	-1,90%
Summe			~ +2%

Tabelle II-16: Aufwendungen

Die geplanten Aufwendungen wurden um ca. 2% überschritten.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit

Gegenwärtig werden Offshore-Windenergieanlagen in der deutschen Nord- und Ostsee überwiegend auf Pfahlgründungen gegründet. Die Ramminstallation ist aus Kostengründen zwar das am häufigsten eingesetzte Offshore-Installationsverfahren für Pfähle, bringt aber erhebliche Schallemissionen mit sich, die die marine Fauna beeinträchtigen. Durch die Untersuchungen zur Machbarkeit einer umweltverträglichen, technisch sicheren und auch wirtschaftlicheren Offshore-Gründungsvariante vergrößert sich künftig das Auswahlspektrum für die Planer und Konstrukteure. Als logische Konsequenz sollte sich die Wettbewerbsfähigkeit im Bereich Trag- und Gründungsstrukturen verbessern.

Für die ersten Untersuchungen zur Modellierung einer Offshore-Substruktur mit Suction Buckets sind sowohl virtuelle als auch physikalische Modelle im kleinen Maßstab notwendig. Die numerischen Simulationen umfassen Gesamtanlagensimulationen, mit denen die ganze OWEA und ihre Komponenten simuliert werden sowie Gründungsmodelle, die die Boden-Bucket-Interaktionen abbilden. Ausgangspunkt für die Planung und Durchführung von kleinmaßstäblichen Modellversuchen sind die kaum dokumentierten Erkenntnisse zum Gesamtstrukturverhalten einer Bucket-Gründung unter offshore-typische Beanspruchungen.

Für die numerischen Simulationen mit einem Gesamtanlagenmodell ist die Anwendung einer speziellen Software, die die Implementierung von selbst geschriebenen Algorithmen zur Beschreibung der Boden-Struktur-Interaktion ermöglicht, notwendig. Somit kann das Gesamtstrukturtragverhalten realistischer abgebildet und als Grundlage zur Festlegung der Lastszenarien für die zyklischen Modellversuche im kleinen Maßstab genutzt werden.

Offshore-Feldversuche sowie Modellversuche in einer Zentrifuge sind mögliche Alternativen für die physikalische Modellierung einer OWEA-Gründung. Sie sind jedoch im Vergleich zu kleinmaßstäblichen 1g-Modellversuchen sehr kostspielig und technisch schwierig umzusetzen. Die durchgeführten kleinmaßstäblichen Modellversuche dienen zur Kalibrierung von numerischen Modellen und zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens einer Bucket-Gründung unter speziellen Lasteinwirkungen.

In diesen anfänglichen Forschungsarbeiten zur Beurteilung der Machbarkeit einer Suction Bucket-Gründung als Gründungsvariante für OWEA kann der zeitliche und finanzielle Aufwand bei der Durchführung der Gesamtsimulationen sowie bei der Planung, dem Aufbau, als auch bei der Durchführung und Auswertung der kleinmaßstäblichen Modellversuche als notwendig und angemessen angesehen werden.

II.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das erstellte Gesamtanlagenmodell mit einer Bucket-Bodenkopplung, die aus einem hochaufgelösten Boden-Bauteil-Modell bestimmt wurde, ermöglicht zum einen die realistischere Berechnung von Betriebs- und Extremlasten und zum anderen die Durchführung von Sensitivitätsanalysen. Mit Sensitivitätsanalysen werden Parameter mit relevantem Einfluss auf das Verhalten der OWEA identifiziert. Durch Gesamtanalgensimulationen können kritische Parametersets aufgezeigt werden. Für die Lastenermittlung bei weiteren OWEA mit Suction Buckets kann die Herangehensweise zur Modellierung der Boden-Bucket-Interaktionen im Gesamtanlagenmodell durch standortspezifische Anpassungen herangezogen werden.

Die gesammelten Erfahrungen aus der Planung, dem Aufbau und der Inbetriebnahme des entwickelten Teststands werden bei der Planung künftiger großmaßstäblicher Modellversuche mit Suction Buckets im Testzentrum Tragstrukturen Hannover genutzt. Dies betrifft auch die Erkenntnisse über Modellgesetze, Übertragbarkeit, Tragverhalten und die numerische Umsetzung. In dem entwickelten Teststand können zudem experimentelle Untersuchungen mit Suction Buckets zur Identifizierung von Maßstabseffekten und Modellfaktoren fortgesetzt werden. So können die in diesem Dokument vorgestellten Testergebnisse mit Testergebnissen aus Experimenten mit Suction Buckets in verschiedenen Modellgrößen verglichen werden. Die kleinmaßstäblichen Modellversuche können als Vorstufe der angedachten großmaßstäblichen Experimente mit Suction Buckets betrachtet werden.

Die grundlegende Orientierungskarte zur Darstellung der geotechnischen Risikoklassen für den Einsatz von Suction Bucket-Gründungen in der Nordsee kann künftig mit Geo-Daten aus Offshore-Messkampagnen mit geoseismischer Erkundungstechnologie, weiter entwickelt werden. Eine ähnliche Darstellung kann auch künftig für die Ostsee erstellt werden.

Weitere Untersuchungen mit Sucion Buckets können im Rahmen eines Nachfolgeprojekts realisiert werden. Im Fokus stehen großmaßstäbliche Experimente im Testzentrum Tragstrukturen Hannover zur Entwicklung der Bemessungsgrundlagen als wesentliche Voraussetzung für die Schaffung der notwendigen ingenieurtechnischen Anforderungen für die Errichtung eines OWEA-Prototyps mit Suction Buckets für größere Wassertiefen in einem Zeitraum von 3 bis 4 Jahren.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit (01.06.2012 bis 30.09.2014) wurden zahlreiche experimentelle Forschungsarbeiten mit Suction Buckets von der Aalborg University (DK) durchgeführt. Die kleinmaßstäblichen Tests mit lateraler Belastung umfassten das statische, zyklische und transiente Tragverhalten (Foglia/Ibsen, 2013; Foglia et al., 2014). Es wurde dort eine Ähnlichkeitstheorie für Suction Buckets unter lateraler Belastung entwickelt (Foglia/Ibsen 2013). In der Aalborg University wurden zudem mittelmaßstäbliche Modellversuche mit axial belasteten Suction Buckets unter verschiedenen Spannungsniveaus durchgeführt (Manzotti/Vaitkunaite, 2014).

Die veröffentlichen Forschungsarbeiten von Zhu et al. (2013) konzentrierten sich auf das lateral zyklische Tragverhalten von Suction Bucktes für Offshore-Windenergieanlagen in locker gelagerten Böden.

Im Bereich der numerischen Simulationen wurden Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik Hannover zum statischen lateralen Tragverhalten (Achmus et al. 2013) sowie zum axialen Tragverhalten von Suction Buckets unter schneller Belastung (Thieken et al. 2014) herausgegeben.

Statoil und Statkraft berichteten 2014 über mehr als 20 Installationstests mit Suction Buckets in 11 verschiedenen Standorten des Dudgeon Windpark. Einige Installationstests wurden in geschichteten Böden vorgenommen. Dazu zählt die intensive Offshore-Installationskampagne des Konsortium des Carbon Trust und Universal Foundation 2014. Ziel der Installationstests war die Überprüfung und Weiterentwicklung von Berechnungsansätzen für die Bucket-Installation sowie innovative Technologien für die Offshore-Installation einzusetzen. Im Offshore-Bereich wurde 2013 der Met Mast Dogger Bank East sowie der Met Mast Dogger Bank West mit Monopod-Bucket-Gründungen in den Seeboden verankert. Ein wichtiger Fortschritt wurde 2014 durch die Installation einer Suction Bucket-Jacket als Prototyp-Tragstruktur für eine OWEA gemacht. Die drei-beinige Struktur wurde im Offshore Windpark Borkum Riffgrund (Nordsee) in einer Wassertiefe von ca. 25 m installiert.

II.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

II.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Quiroz, T. (2014): Planung und Aufbau eines Teststandes für kleinmaßstäbliche Modellversuche an Gründungselementen für Windenergieanlagen. Vortrag am 12.11.2014 beim 2. Jahreskolloquium des Forschungsverbundes Windenergie. DLR, Braunschweig

II.6.2 Geplante Veröffentlichungen

Es ist vorgesehen, die Ergebnisse des Forschungsvorhabens in mehreren Zeitschriften zu veröffentlichen sowie bei nationalen Fachkonferenzen, Symposien und Kolloquien im Bereich Windenergie, Strukturkomponenten und Offshore-Geotechnik zu präsentieren. Ein Teil der hier vorgestellten Forschungsarbeiten soll im Rahmen einer Dissertation beim Fraunhofer IWES in der Schriftenreihe des Instituts für Geotechnik Hannover erscheinen.