

Aktuelle Untersuchungen an Suction Buckets für Offshore-Windenergieanlagen – das ProBucket-Projekt

Suction Buckets sind etablierte Gründungselemente für Offshore-Öl- und -Gasplattformen, die bisher in der Offshore-Windindustrie nur vereinzelt eingesetzt wurden. Diese Fundamente können zusammen mit der Unterstruktur installiert werden, wodurch zusätzliche Offshore-Operationen wie das Grouting von Transition Pieces oder von Jacket-Beinen vermieden werden. Außerdem werden bei der Installation von Suction Buckets, im Gegensatz zu Pfahlgründungen, minimale akustische Emissionen erzeugt, sodass zusätzliche schallreduzierende Maßnahmen überflüssig sind. Aus diesen Gründen gelten Suction Buckets als eine praktikable und potenziell kostengünstige Gründungslösung für Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Das Forschungsvorhaben ProBucket wurde 2020 initiiert und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Durch die geplanten vielfältigen physikalischen und numerischen Untersuchungen strebt das Vorhaben an, die Unsicherheiten der existierenden Bemessungsverfahren zu verringern. In diesem Beitrag werden die aktuellen Herausforderungen zum Design und zur wirtschaftlichen Umsetzung von Suction Buckets für OWEA erläutert. Darüber hinaus werden die Forschungsaktivitäten von ProBucket beschrieben.

Stichworte Suction Caisson; Suction Bucket; Bucket-Fundamente; Offshore-Windenergie

Current investigations on suction buckets for offshore wind energy turbines – the ProBucket project

Suction buckets are established offshore foundations for oil and gas platforms that have been used only marginally in the wind energy sector. These foundations can be installed together with the substructure, avoiding additional offshore operations such as grouting of transition pieces or jacket legs. Furthermore, unlike pile foundations, installing suction buckets is essentially silent, so no additional noise-reducing measures are necessary. For these reasons, suction buckets are a viable and potentially cost-effective foundation solution for offshore wind turbines. The ProBucket research project started in 2020 and is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. The project aims to reduce the uncertainties of the various design procedures through physical and numerical investigations. This paper explains the current challenges for designing and economical implementation of suction buckets for offshore wind turbines. Furthermore, the research activities of ProBucket are described.

Keywords suction caisson; suction bucket; bucket foundation; offshore wind energy

1 Einleitung

1.1 Suction Buckets für Offshore-Strukturen

Der weitere Ausbau der Offshore-Windenergie ist zur Umsetzung der Energiewende essenziell. Nach [1] entfallen 15–35 % der gesamten Kosten einer Offshore-Windenergieanlage auf die Gründungsstruktur. Um eine nachhaltige Weiterentwicklung der Offshore-Windenergie sicherzustellen, sind die Kosten der Gründungselemente durch die Validierung existierender Auslegungsmethoden und die Erforschung neuer Technologien zu reduzieren. Bucket-Fundamente, auch Suction Caissons oder Suction Buckets genannt, sind erprobte Gründungselemente, die seit Jahrzehnten weltweit im Offshore-Öl- und -Gasbereich verwendet werden. Diese können alternativ zu Pfahlgründungen umweltfreundlich eingesetzt werden und bieten folgende Vorteile:

- Der Installationsvorgang ist schallemissionsarm und entspricht daher den Vorschriften des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie [2].

- Die Einbindetiefe von Bucket-Gründungen liegt nur zwischen 15 und 25 % der Einbindelänge konventioneller Pfahlgründungen. Dies erweitert die Einsatzmöglichkeiten von Bucket-Fundamenten bei schwierigen Bodenverhältnissen, z. B. bei tiefliegenden Felschichten.
- Beim Ausbringen eines Jackets mit Buckets entfällt der erste Schritt der Pfahlinstallation. Gründungselemente und Unterstruktur werden in einem Arbeitsschritt installiert. Dies reduziert den Zeitaufwand des Installationsvorgangs und erhöht somit die Wirtschaftlichkeit der Windenergieanlage.
- Der Rückbau erfolgt vergleichsweise einfach durch die Umkehr des Installationsprozesses.

In der Offshore-Windbranche hat dieses Konzept jedoch erst kürzlich das Prototypenstadium erreicht. Zwischen 2018 und 2022 wurden 145 Offshore-Windturbinen der letzten Generation (8–10 MW) mit dreibeinigen Jacket-Strukturen auf Suction Buckets in Betrieb genommen [3–5]. Erste Empfehlungen zum Bucket-Design sind in der DIN 18088-4 enthalten [6]. Trotz dieser positiven Entwicklung und erster kommerzieller Anwendung sind

zahlreiche Fragen bei der Dimensionierung von Bucket-Gründungen noch offen.

1.2 Stand der Wissenschaft

In den 1990er-Jahren wurden Suction Buckets für Jacket-Strukturen zur Gründung von Offshore-Öl- und -Gasplattformen entwickelt [7, 8]. Weitere Forschungen zu Bucket-Gründungen als Fundamente für Offshore-Windenergieanlagen begannen in den 2000er-Jahren, zunächst an der Oxford University [9] und der Aalborg University [10], dann an der University of Western Australia [11] und an der Leibniz Universität Hannover [12]. Die Herausforderungen des Designs von Suction Buckets liegen sowohl in geotechnischen Aspekten wie der Installierbarkeit sowie im statischen und zyklischen Tragverhalten während der Betriebsphase als auch in strukturellen Aspekten wie dem Beulen der Schürze während der Installationsphase. Der Beulwiderstand wurde bis jetzt meistens durch numerische Simulationen untersucht [13–15]. Zu den jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der analytischen und numerischen geotechnischen Modellierung von Bucket-Fundamenten gehören z. B. Frameworks zur Ermittlung von Interaktionsdiagrammen [16], erweiterte numerische Analysen des statisch und zyklisch horizontal belasteten Fundaments [17] sowie Untersuchungen zur Kontaktfestigkeit bei vertikal drainierter Beanspruchung [18]. In der Geotechnik wurde in den letzten Jahren das axiale Verhalten von Bucket-Fundamenten sowohl in der geotechnischen Zentrifuge als auch unter normalen Schwerkraftbedingungen getestet [19–25]. In jüngerer Vergangenheit sind auch Konstruktionsrichtlinien [26], DIN-Normen [6] sowie Offshore-Standards [27] zum Thema Suction Buckets erschienen. In der DIN [6] wird die Beobachtungsmethode als Nachweisverfahren empfohlen, da laut dieser Normvorgabe der Entwurf von Gründungen mit Suction Buckets durch Berechnung noch nicht zur gesicherten Ingenieurerfahrung gehört.

1.3 Das ProBucket-Projekt

Das vom BMWK geförderte ProBucket-Konsortium (Bild 1) wurde 2020 zusammengestellt, um Suction

Buckets für Offshore-Windenergieanlagen als umweltfreundliche und wirtschaftliche Gründungsvariante zu optimieren und Unsicherheiten in der Bemessung zu verringern. Zum Erreichen dieses Ziels werden auf Basis klein- und großmaßstäblicher Modellversuche sowie begleitender detaillierter numerischer und analytischer Simulationen die sensitiven Aspekte des Suction-Bucket-Designs untersucht. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen können Bemessungsmodelle weiterentwickelt und validiert werden. Folgende Forschungsthemen leiten sich hieraus ab:

- Bewertung der geotechnischen Nachweismethoden zur Installation und ihr Einfluss auf das betriebliche Tragverhalten,
- Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren zur Abbildung des zyklischen Tragverhaltens,
- Entwicklung zuverlässigkeitsbasierter Methoden zur realistischen Einschätzung des Beulrisikos,
- Kosten- und Risikoanalysen bei unterschiedlichen Offshore-Szenarien zum realistischen Vergleich mit anderen Gründungskonzepten.

Im Folgenden werden die im ProBucket geplanten Forschungsaktivitäten beschrieben und die ersten Ergebnisse dargestellt.

2 Physikalische Untersuchungen

Die im Projekt durch multimaßstäbliche Modellversuche untersuchten Design-Aspekte sind:

- die Installation – strukturelle Integrität am Ende der Installation, z. B. Beulen der Bucket-Schürze, und das Design des Einbringungsverfahrens, z. B. Ermittlung des erforderlichen und kritischen Unterdrucks,
- das Tragverhalten des Fundaments unter axialzyklischer Belastung.

Bild 2 zeigt die zyklischen Lastfälle, die in den letzten Jahren von verschiedenen Forschungsgruppen untersucht wurden und die das ProBucket-Konsortium anstrebt zu validieren und zu ergänzen.



Bild 1 Das ProBucket-Konsortium
The ProBucket consortium

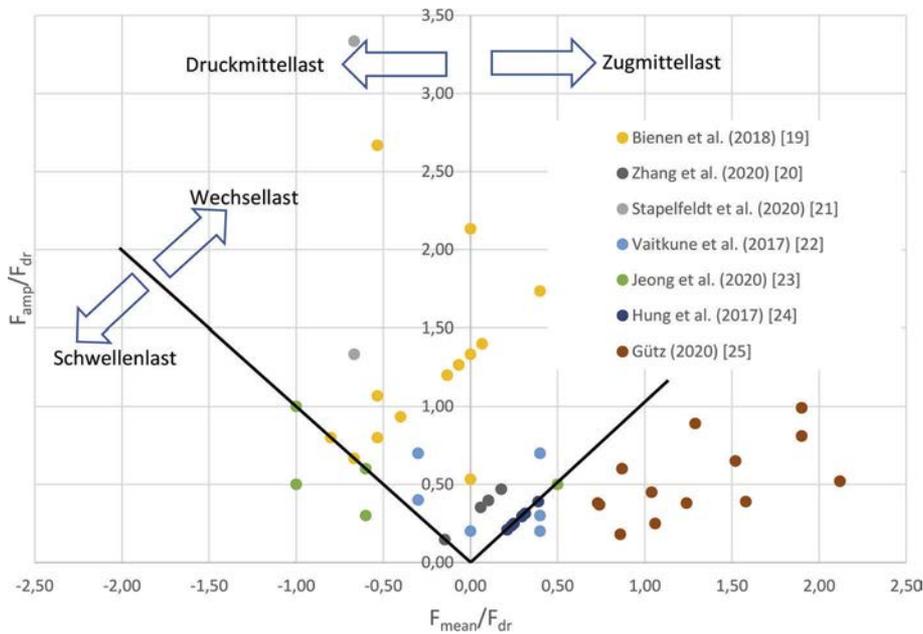


Bild 2 Zusammenstellung der in den letzten Jahren von verschiedenen Forschungsgruppen getesteten zyklischen Lastszenarien:

F_{amp} = Lastamplitude, F_{mean} = Mittellast, F_{dr} = dränierte Tragfähigkeit

Compilation of cyclic load scenarios tested in recent years by various research groups:

F_{amp} = load amplitude, F_{mean} = mean load, F_{dr} = drained load capacity

2.1 Geotechnische Modellversuche

In den kleinmaßstäblichen Versuchen an einem Bucket mit einem Durchmesser $D = 0,61$ m und einer Höhe von $L = 0,61$ m ($L/D = 1$) soll das Tragverhalten der Gründung unter zyklischen Zug- und Drucklasten vom Institut für Geotechnik (IGtH) der Leibniz Universität Hannover (LUH) untersucht werden. Kleinmaßstäbliche Versuche bei der einfachen Erdbeschleunigung (1g-Versuche) sind im Gegensatz zu Versuchen in geotechnischen Zentrifugen oder großmaßstäblichen Versuchen mit einem geringeren Aufwand verbunden. Mit dem gewählten Aufbau (Bild 3) kann etwa ein Versuch je Woche realisiert werden, sodass im Rahmen des Projekts 20–30 kleinmaßstäbliche Versuche durchgeführt werden können. Die Abmes-

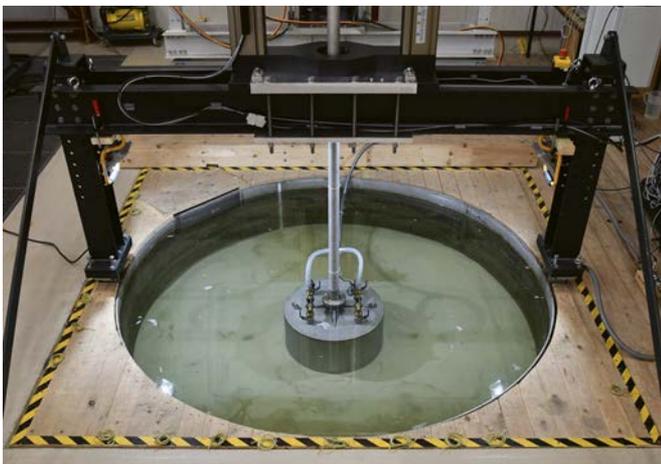


Bild 3 Versuchsstand am IGtH mit Belastungsrahmen, Versuchsbehälter mit Sand und Modellfundament bei angeschlossenem Unterdrucksystem

Test stand at the IGtH with loading frame, test container with sand and model foundation with connected negative pressure system

sungen des Versuchsbehälters sowie die Eigenschaften des verwendeten Sands können [25] entnommen werden.

Die Installation des Fundaments erfolgt mittels Unterdruck, um den Einfluss der Änderung des Bodengefüges durch den Installationsvorgang in den Versuchen zu berücksichtigen. Dazu wird das Fundament zunächst mithilfe der Prüfmaschine auf eine Einbindetiefe von $z = 0,12$ m ($z/D = 0,2$) in den Boden eingedrückt. Die hierzu nötige Kraft von etwa $F = 2,5$ kN wird in den folgenden Stufen des Einbaus als Auflast beibehalten. Anschließend wird das Fundament durch, mit zunehmender Einbindetiefe gesteigerten, Unterdruck in den Boden eingesaugt. Bei einer Einbindetiefe von $z/D = 0,9$ wird der Unterdruck verringert, bis keine weitere Verschiebung auftritt. Um den Kontakt zwischen Boden und Deckelunterseite sicherzustellen, wird das Fundament dann bei konstantem Unterdruck mit einer konstanten Verschiebungsrates in den Boden gedrückt, die zugehörige Kraft aufgezeichnet und die Steifigkeit als Ableitung der Kraft nach der Verschiebung bestimmt. Diese nimmt zunächst ab, bis die Widerstandskräfte aus Mantelreibung und Spitzendruck überwunden sind. Ein deutlicher Anstieg dieser Steifigkeit weist darauf hin, dass vollständiger Kontakt zwischen Boden und Deckel vorliegt (Bild 4).

Nach dem Einbau wird die drainierte Zugtragfähigkeit F_{dr} bestimmt. Dazu wird bei geöffneten Ventilen sehr langsam eine Verschiebung von $\Delta z = 1,5$ mm aufgebracht, sodass keine maßgeblichen Unterdrücke im Boden entstehen.

Im Anschluss wird das Fundament bei geschlossenen Ventilen axial sinusförmig mit 5000 Zyklen belastet. Die

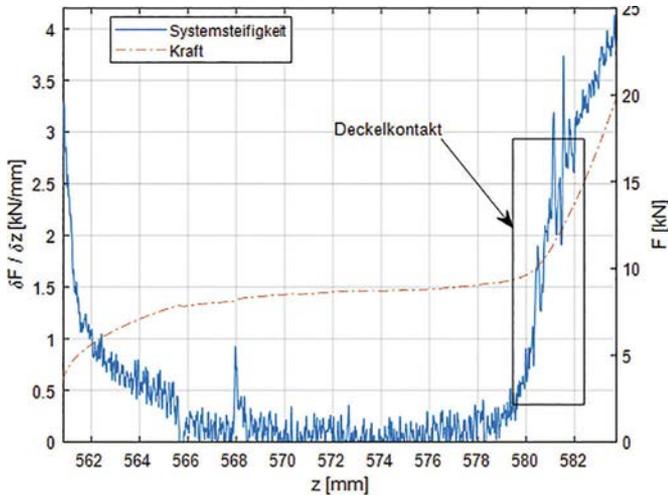


Bild 4 Verlauf von Kraft und Steifigkeit der Systemantwort bei Aufbringen der Verschiebung zur Sicherstellung des Deckelkontakts: F = vertikale Kraft, z = Eindringungstiefe
Evolution of force and stiffness of the system response when applying the displacement to ensure the lid contact: F = vertical force, z = penetration depth

Belastungsfrequenz beträgt in den meisten Versuchen 1 Hz. Amplitude und Mittellast werden dabei auf die zuvor ermittelte drainierte Tragfähigkeit bezogen und liegen innerhalb $F_{\text{mean}}/F_{\text{dr}} = [-1;4]$ (Drucklasten positiv) und $F_{\text{amp}}/F_{\text{dr}} = [0;2]$. Ergänzend werden einige Versuche mit monotoner Belastung durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse werden im Nachgang mit einem mechanisch-hydraulisch gekoppelten Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) nachgerechnet. Messungen von Porenwasserdrücken sowie der Verschiebung des Fundaments ermöglichen die Validierung der Berechnungen.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen in Kombination mit den numerischen Berechnungen können dann verwendet werden, um Ansätze zur Beschreibung des Tragverhaltens von Bucket-Fundamenten unter zyklischen Axiallasten weiterzuentwickeln. Dabei sollen auch die in diesem Projekt ebenfalls durchgeführten großmaßstäblichen Versuche berücksichtigt werden. Die Durchführung von Versuchen in unterschiedlichen Maßstäben (s. u.) ermöglicht auch die Identifikation von Skalierungseffekten.

Die geotechnischen großmaßstäblichen Modellversuche werden im Projekt vom Fraunhofer IWES und dem Testzentrum Tragstrukturen Hannover (TTH) der LUH durchgeführt. Die Versuche finden in der Grundbauversuchsgrube des TTH statt [28]. Ähnlich wie bei den vorgenannten kleinmaßstäblichen Modellversuchen werden die Suction Buckets durch Unterdruck installiert und anschließend zyklisch belastet. Die Versuchsprogramme von klein- und großmaßstäblichen Modellversuchen werden unter Berücksichtigung der internationalen Literatur (s. Bild 2) gemeinsam ausgelegt. Durch die großskaligen Modellversuche werden Maßstabeffekte untersucht und



Bild 5 Installation eines Suction Buckets mit $D = 1,6$ m und $L = 1,42$ m in der Grundbauversuchsgrube des TTH
Installation of a Suction Bucket with $D = 1,6$ m and $L = 1,42$ m in the geotechnical test pit of the TTH

die in den Abschn. 3.1 und 4 vorgestellten Forschungsaktivitäten unterstützt. Bild 5 zeigt die Unterdruckinstallation eines Modellfundaments mit $D = 1,6$ m und $L = 1,42$ m ($L/D = 0,89$).

2.2 Strukturelle Modellversuche

Die Schürze eines Suction Buckets ist eine schlanke, dünnwandige Stahlschale, die meistens aus fertigungstechnischen Gründen ohne jegliche Aussteifungen ausgeführt wird. Im eingebauten Zustand ist die Schürze komplett im Boden eingebunden und wird hierdurch seitlich gehalten und stabilisiert. Bei der Installation ist dieser Zustand noch nicht erreicht und die Gefahr eines Beulversagens besteht. Um v. a. FE-basierte Bemessungsmethoden von Suction Buckets zu validieren, werden vom Fraunhofer IWES im TTH klein- und großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, Spannungszustände und Versagensmechanismen der Schürze während der Installation genauer zu erfassen und besser verstehen zu können. Dafür werden großmaßstäbliche Probekörper für geotechnische Versuche mit Messtechnik zur Erfassung der Stahlspannungsverläufe während der Installation ausgestattet. Des Weiteren werden Beulversuche an kleinmaßstäblichen Probekörpern auf dem Spannungsfeld des TTH durchgeführt. Die Probekörper sind zum einen dünnwandige, nicht ausgesteifte Stahlzylinder und zum anderen mehrfach segmentierte Schalenkonstruktionen mit einer höheren Steifigkeit. Die Bucket-Modelle weisen eine Länge und einen Durchmesser von ca. 0,5 m bei einer Wanddicke von 1,0 mm auf. Die ersten Versuche wurden bei den definierten Lagerungsbedingungen einer Festeinspannung sowie mit definiert in die Schale eingebrachten Imperfektionen durchgeführt. Die Oberfläche der imperfekten Probekörper wurde vorab mittels Fotogrammetrie vermessen. Stetig zunehmender Unterdruck, erzeugt durch eine Vakuumpumpe, ist die Belastung. Die Verformungen der Schale wurden während des Ver-

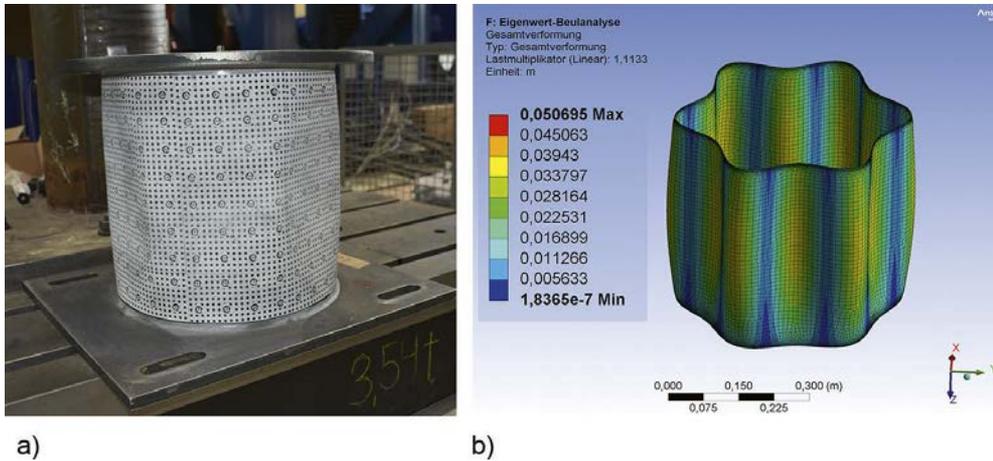


Bild 6 a) Probekörper nach dem Beulversagen, b) die erste Eigenform des FE-Modells mit Nachbildung der elastischen Dichtung
a) Test specimen after buckling failure, b) the first eigenmode of the FE model with modelling of the elastic seal

suchs mit digitaler Bildkorrelation erfasst. Die ersten Ergebnisse zeigten eine deutliche Unabhängigkeit der endgültigen Beulform der zylindrischen Probekörper von der Anzahl der eingebrachten Imperfektionen (sog. eigenformaffines Beulen). Beispielhaft zeigt Bild 6 einen durch Beulen versagten Versuchskörper sowie seine erste Eigenform.

Bei der Versuchsdurchführung zeigten sich einige zusätzliche Herausforderungen. Durch die Unterdruckbelastung muss der Probekörper gasdicht sein, dabei kann die Abdichtung z.B. durch elastische Klebstoffe erfolgen. Dies beeinflusst wiederum die seitliche Lagerung der Schürze und damit die Beulform. Da es während der Installation des Buckets innerhalb der Schürze zu einem kombinierten Spannungszustand aus Axial- und Umfangsdruck kommt, führt dies in Kombination mit den komplexen Lagerungsbedingungen zu rechenintensiven FE-Modellen und einer aufwendigen Modellierung der Versuche.

3 Analytische und numerische Untersuchungen

3.1 Ingenieurmodelle für die Auslegungsphase

Im Rahmen des Projekts wird seitens der Firma GuD Consult GmbH die ingenieurmäßige Ausarbeitung von Bemessungsregeln für die Auslegungsphase von Bucket-Fundamenten im Hinblick auf den Einfluss der geologischen Gegebenheiten bearbeitet. Die Ingenieurmodelle greifen dabei auf analytische Methoden, basierend auf theoretischen Überlegungen und empirischen Ausarbeitungen, zurück, können sich aber ebenfalls der numerischen Unterstützung mittels FE-Methoden bedienen.

Dabei wird im Rahmen der FE-Modellierung der Wirtschaftlichkeit insofern Rechnung getragen, als dass die komplexen bodenmechanischen Vorgänge mit einfachen und allgemein zugänglichen Randwertmodellen der FE-Methoden dargestellt werden. Mithilfe der Software Plaxis 2D kann der komplexe Prozess des Einbaus eines

Buckets auf ein zweidimensionales und rotationssymmetrisches Modell reduziert werden. Je nach Materialmodell des Bodenkörpers können damit die grundlegenden Materialparameter für die Erfassung der Effekte bei der Einbringung/Belastung des Buckets adjustiert werden. Beispiele für solche wichtigen Effekte sind die Dilatation des Bodens sowie der Einfluss einer Strömung in Richtung des vom Bucket eingeschlossenen Bodens bei Aufbringen des Unterdrucks.

Die Kombination von vertikaler und horizontaler Belastung des Buckets im Betriebszustand wird dann mithilfe der Software Plaxis 3D anhand eines dreidimensionalen Modells simuliert. Dabei werden sowohl die geometrischen Verhältnisse in den Modellversuchen als auch die Bucket-Struktur mitsamt Aussteifungen und Kopplungszylinder maßstabsgetreu abgebildet. Bild 7 zeigt das FE-Modell des Modellversuchs mit $D = 1,6$ m und $L = 1,42$ m (s. Bild 5) durch die Software Plaxis 3D.

Im Gegensatz zur 2D-Simulation wird im 3D-Modell von einer WIP-Konfiguration (wished in place) ausgegangen, also einem unbelasteten Bucket und Bodenkörper nach der Installation. Während statische Belastungen durch einzelne Berechnungsphasen abgebildet werden können, bedient man sich bei der zyklischen Beanspruchung spezieller Entfestigungsmodelle. Mit Hinblick auf den Abgleich der rechnerischen Simulationsergebnisse mit den Modellversuchen (Abschn. 2.1) werden die bodenmechanischen Eigenschaften des verwendeten Sands in Laborversuchen untersucht und das numerische Bodenverhalten bestmöglich kalibriert. Dabei kommt der realitätsnahen Erfassung der Abhängigkeit der Bodenparameter von der Lagerungsdichte des Bodens eine besondere Bedeutung zu. In Bild 8 ist die Kalibrierung der Schubsteifigkeit bei kleinen Dehnungen G_0 zu sehen, welche für drei unterschiedliche Porenzahlen e in dynamischen Vibrationsversuchen (Resonant-Column-Versuch) bestimmt wurde. Die errechneten Materialparameter werden anschließend in die Software übergeben, um Simulationen mit einem realitätsnahen Materialmodell durchführen zu können.

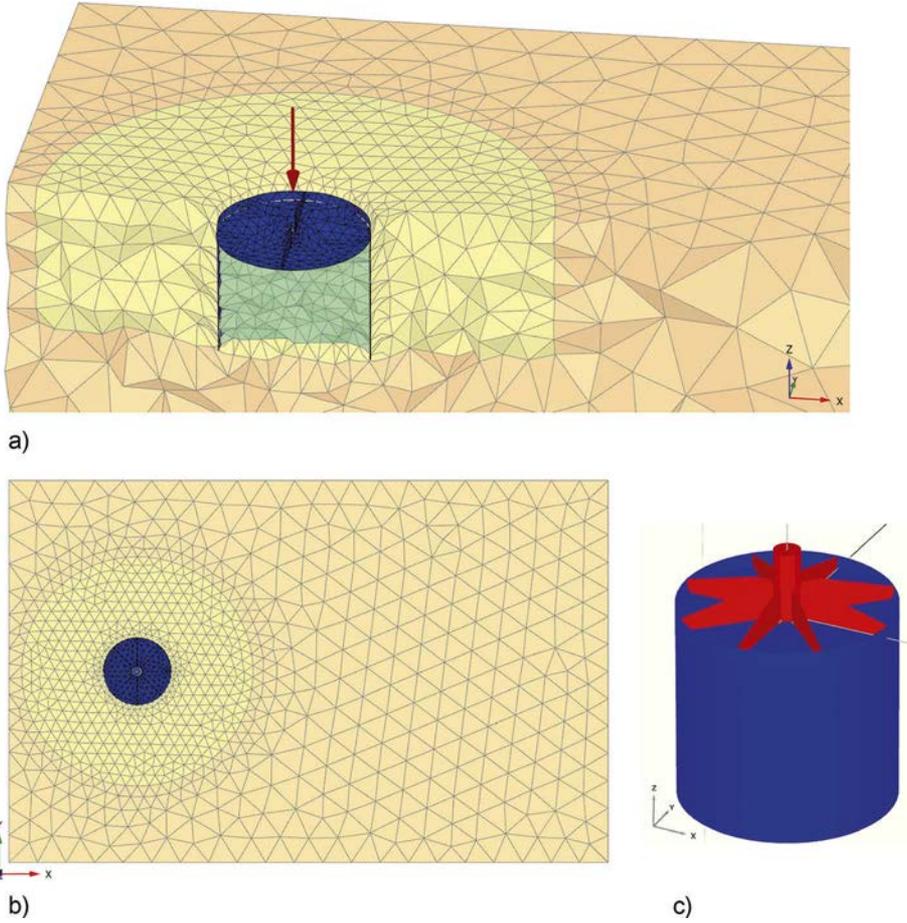


Bild 7 a) Seitenansicht vertikaler Schnitt durch das Modell, b) Draufsicht der Grunbauversuchgrube des TTH, c) Isometrie eines im TTH getesteten Bucket-Fundaments (s. a. Bild 5)
 a) Side view of vertical section through the model, b) top view of the foundation test pit of the TTH, c) isometry of a bucket foundation tested in the TTH (see also fig. 5)

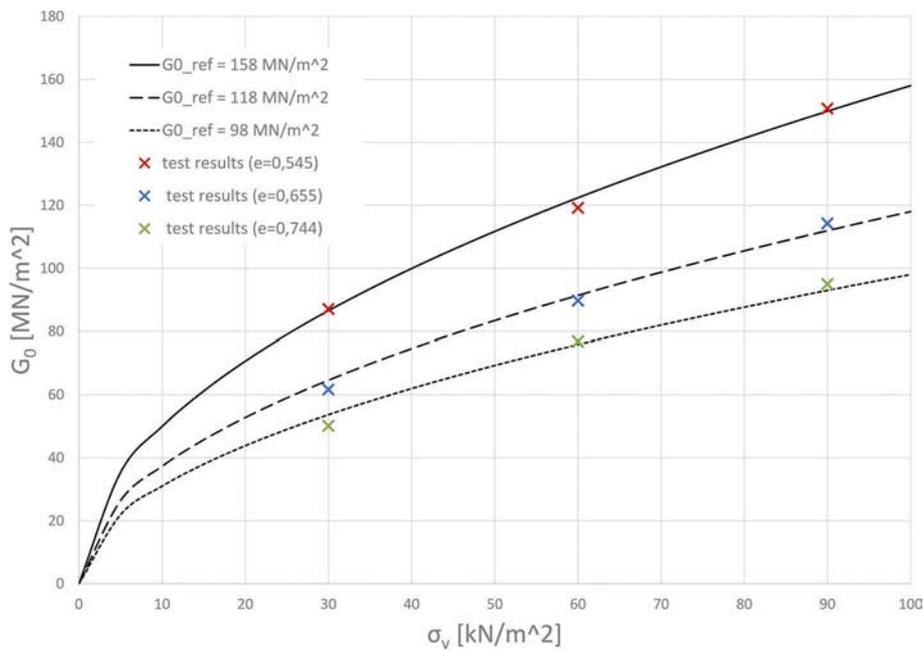


Bild 8 Kalibrierung des Schubmoduls des Versuchssands bei kleinen Dehnungen anhand von Laborversuchen mit unterschiedlichen Lagerungsdichten: G_0 = Schubmodul bei kleinen Dehnungen, σ_v = vertikale Spannung
 Calibration of the small strain shear modulus of the test sand using laboratory tests with different bearing densities: G_0 = shear modulus at small strains, σ_v = vertical stress

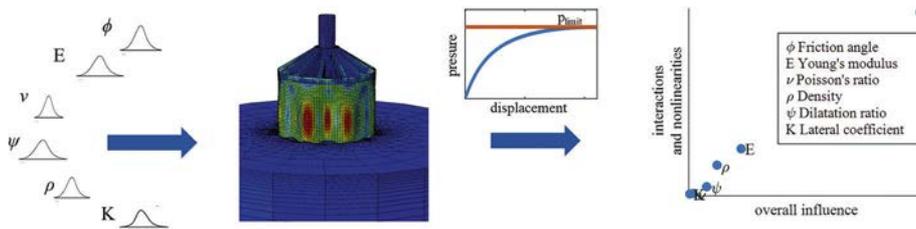


Bild 9 Sensitivitätsanalyse der Bodenparameter
Sensitivity analysis of soil parameters

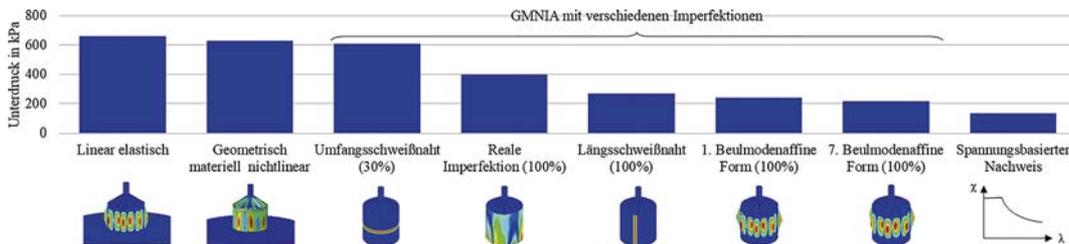


Bild 10 Vergleich verschiedener Analysen sowie verschiedener Imperfektionsformen
Comparison of different analyses and different imperfection forms

3.2 Probabilistische Beulanalyse

Am Institut für Stahlbau, LUH, werden verschiedene Einflussfaktoren auf die Beultragfähigkeit von Suction Buckets numerisch untersucht. Besonders hervorzuheben sind hier geometrische Imperfektionen, die aus dem Herstellungsprozess resultieren, sowie die nichtlineare Randbedingung, die sich aus der Einbindung in den Boden ergibt. Diese Faktoren beeinflussen die Tragfähigkeit deutlich. Um den Einfluss dieser Faktoren zu quantifizieren sowie die Streuung der Faktoren zu berücksichtigen, sind probabilistische Beulanalysen notwendig. Dafür wurde im Rahmen des Projekts ein FE-Modell für geometrisch materiell nichtlineare Analysen (GMNIA) erstellt. Das Suction Bucket wird im Modell über Schalenelemente abgebildet. Der es umgebende Boden wird mit 3D-Hexaederelementen modelliert. Werkstoffeigenschaften des Stahls und Bodens werden mit elasto-plastischen Materialgesetzen beschrieben, da das Plastizieren des Bodens eintritt, bevor die Tragfähigkeit des Buckets erreicht ist. Die geometrischen Imperfektionen werden in Form von Knotenverschiebungen aufgebracht. Die Berechnung mit streuenden Einflussfaktoren wurde für die probabilistischen Analysen automatisiert. Mithilfe des Modells werden kritische Einbindetiefen, der Einfluss von verschiedenen Boden- und Strukturparametern untersucht sowie Verfahren ermittelt, um ungünstige Imperfektionsmuster zu ermitteln. Erste Ergebnisse im Hinblick auf die Bodenbauwerk-Interaktion zeigen, dass v. a. der Reibungswinkel einen Einfluss auf die Beultragfähigkeit hat. Dieser ist maßgeblich für das nichtlineare Verhalten des Bodenmodells verantwortlich. Eine schematische Abbildung der Sensitivitätsuntersuchung im Hinblick auf die Bodenparameter ist in Bild 9 dargestellt.

Um den Einfluss geometrischer Imperfektionen zu untersuchen, wurden zunächst Imperfektionsformen angesetzt,

die für Stabilitätsanalysen von Stahlschalen häufig Anwendung finden: beulmodenaffine Imperfektionen und Schweißnahtvertiefungen. Der Einfluss von geometrischen Imperfektionen ist im Vergleich zu linear elastischen Verzweigungsrechnungen oder geometrisch materiell nichtlinearen Analysen deutlich erkennbar (Bild 10). Die Prozentangaben hinter der Imperfektionsform beziehen sich auf die angesetzte Amplitude im Verhältnis zur maximal anzusetzenden Amplitude nach DIN EN 1993-1-6 [29], welche zur größten Traglastreduktion führt. Ferner konnte identifiziert werden, dass v. a. längs der Schale verlaufende Imperfektionsformen einen besonders ungünstigen Einfluss haben [30]. Weitere Arbeiten befassen sich mit der stochastischen Modellierung von realitätsnahen Imperfektionsmustern. Die Modellierungsansätze sollen mit den Modellversuchen, die in Abschn. 2.2 beschrieben werden, validiert werden.

4 Innovative Suction-Bucket-Designs als Ankerlösungen

Im Gesamtvorhaben adressiert Tractebel Overdick GmbH (OV) die Entwicklung und Untersuchung von innovativen Suction-Bucket-Lösungen, insbesondere im Einsatz als Anker für schwimmende OWEA. OV wird hier neue Konzepte erarbeiten und Eingabedaten für die Ausführung von Modellversuchen bereitstellen (Abschn. 2). OV wird ebenfalls an Empfehlungen für zukünftige Entwurfs-Richtlinien mitarbeiten.

In den letzten 25 Jahren hat OV bereits mehrere Offshore-Plattformen mit Suction Buckets entworfen und weltweit installiert. Entsprechend sollen diese Erfahrungen nun als Grundlage für die Weiterentwicklung und Optimierung für den Einsatz im Offshore-Windsektor dienen. Die Skalierbarkeit der Produktion und eine Opti-

mierung der ökonomischen Aspekte stehen hier neben der Untersuchung von technischen Grenzen im Fokus. Suction Buckets werden v. a. ab Wassertiefen von 40 bis 50 m zum Einsatz kommen. Neben der Funktion als Gründungselement von feststehenden Fundamenten für OWEA etabliert sich zusehends der Markt als Ankerlösung für schwimmende Fundamente. Das Marktpotenzial der schwimmenden Fundamente ist hierbei auch um ein Vielfaches höher als das der feststehenden OWEA-Fundamente. Entsprechend wichtig wird die Optimierung der Verankerungssysteme und der Anker selbst.

Vor diesem Hintergrund wird die Tractebel Overdick GmbH im Forschungsvorhaben verschiedene Suction-Bucket-Varianten für die Verankerung von schwimmenden Anlagen in Bereichen mittlerer bis großer Wassertiefe untersuchen und entwickeln. Die Besonderheit eines Ankers für schwimmende Anlagen liegt darin, dass ein Anker auch für mehrere schwimmende Fundamente eingesetzt werden kann. Die Lasten aus den Verankerungsseilen und -ketten wirken dabei gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen. Weiterhin können auch abhebende Kräfte entstehen, die es zu untersuchen gilt und die entsprechend im Entwurf des Suction Buckets berücksichtigt werden müssen. Das Suction Bucket hat daher sehr viel Potenzial, die ideale Verankerungsmethode von schwimmenden Windenergieanlagen zu werden. Insbesondere, wenn eine große Anzahl von OWEAs mit einer optimierten Anzahl von Ankern in Zukunft zum Standard wird. Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten von OV richten sich daher, unter Berücksichtigung der Kernaspekte des zukünftigen Offshore-Windenergiemarkts, auf die Optimierung von Suction Buckets als Ankerlösungen. Neben den technischen Eigenschaften wird auch die Skalierbarkeit bis hin zu einer Serienproduktion im großen Stil und entsprechend die Verringerung der Gesamtkosten eine tragende Rolle spielen. Weiterhin sind neben der (stahlbaulichen) Fertigung auch Aspekte wie Transport und Installation zu berücksichtigen.

5 Wirtschaftliche Analyse

Die Forschungsarbeiten von Tractebel Engineering GmbH (TE) umfassen folgende Aspekte:

- Kostenschätzung für Gründung und Logistik anhand exemplarischer Anwendungsfälle,
- TCO-Analyse (Total Cost of Ownership, Abschätzung der wirtschaftlichen Potenziale),
- Analyse und Prognose der zu erwartenden Anforderungen des Offshore-Windenergiemarkts,
- Ausarbeitung eines Geschäftsfalls,
- Einsatz der durch neue Erkenntnisse gewonnenen Werte aus den o. g. Teil-Arbeitspaketen in der TCO-Analyse.

Zu Beginn wurde belastbares und miteinander vergleichbares Zahlenmaterial zusammengestellt. Um dies sicherzustellen, wurden mit den Projektpartnern OV und

ENGIE Daten von Offshore-Windparks (OWP) aus externen Quellen sowie aus eigenen Projekterfahrungen zusammengebracht und abgeglichen. Aufgrund der individuellen Charakteristika der realisierten OWP, u. a. unterschiedliche Inbetriebnahmezeitpunkte und Leistungsklassen der OWEA, zeigte sich, dass ein Vergleich nur eingeschränkt möglich ist. Somit ist diese Datensammlung nicht als endgültig zu betrachten, sondern wird kontinuierlich weiterentwickelt, um die Qualität der Datengrundlage für die wirtschaftliche Bewertung zu verbessern.

Mit den zusammengestellten Daten wurde daraufhin ein Wirtschaftlichkeitsanalysemodell nach dem TCO-Verfahren aufgestellt. Bei der Total-Cost-of-Ownership-Analyse werden sämtliche Kosten über die Gesamtlebensdauer betrachtet. Weiterhin wurden möglichst realistische Prognosen eines sehr dynamischen Markts angestellt, um damit auch die Zukunftsfähigkeit von Suction Buckets zu analysieren. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen hieraus flossen in die Ausarbeitung eines Geschäftsfalls ein. Der Geschäftsfall, für den Bucket-Fundamente wirtschaftlich vorteilhaft sein könnten, ist als sog. Referenzfall definiert, der mit den Projektpartnern abgestimmt wurde. Für diesen Referenzfall werden die Kosten der verschiedenen Alternativen anhand der bisher gesammelten Daten abgeschätzt und anschließend wird die TCO-Analyse durchgeführt. Im Rahmen der TCO-Analyse wird zum Referenzfall sowie den Vergleichstypen, Jacket-Struktur auf Pfahlgründungen und Monopile, auch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss und die Auswirkungen von Schlüsselparametern auf das wirtschaftliche Ergebnis zu bewerten, ebenso der Einordnung der mit Abschätzungen verbundenen Unsicherheit. Andererseits ist das Ziel dieser Sensitivitätsanalyse, die Aussagen zur wirtschaftlichen Bewertung von Bucket-Fundamenten über den individuellen Referenzfall hinaus zu formulieren. Angemessene und aus der Sicht der Praxis sinnvolle Sensitivitätsmerkmale, wie z. B. Wassertiefe, Entfernung zur Küste und Installationszeit, wurden mit dem Projektpartner OV besprochen und im Modell eingearbeitet. Aus den aktuellen Berechnungen lässt sich derzeit zusammenfassen, dass Bucket-Fundamente eine Alternative zu den bisher üblichen Fundamentarten darstellen können.

6 Zusammenfassung

Bucket-Fundamente stellen eine umweltfreundliche und potenziell kostengünstige Gründung für Offshore-Windenergieanlagen dar. Ziele des vom BMWK geförderten Forschungsprojekts ProBucket sind die Optimierung der geotechnischen und strukturellen Designverfahren dieses Fundaments sowie die Abschätzung seines wirtschaftlichen Potenzials. Modellversuche mit verschiedenen Maßstäben werden im Projekt durchgeführt. Ingenieurmodelle zum geotechnischen Tragverhalten sowie die probabilistische Analyse des Installationsrisikos werden durch die Modellversuche validiert. Im Hinblick auf zukünftige Offshore-Windparkentwicklungen mit schwimmenden Tragstrukturen werden im Projekt auch neue Bucket-

Ankerkonzepte erarbeitet. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse in Bezug auf andere Fundamentvarianten für Offshore-Windenergieanlagen zeigt, dass die Besonderheiten einer Jacket-Struktur auf Suction Buckets – sehr geringe Geräuschentwicklung bei der Installation, logistische Vorteile und Materialreduktion trotz der etwas komplizierteren Herstellung – mittelfristig die Entwicklung einer wirtschaftlichen Fundamentform mit entsprechenden Marktanteilen ermöglichen können.

Literatur

- [1] Bhattacharya, S. (2019) *Design of foundations for offshore wind turbines*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons Ltd.
- [2] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2013) *Offshore wind farms – Prediction of underwater sound: Minimum requirements on documentation*. Hamburg: Müller-BBM GmbH.
- [3] SPT Offshore (2018) *Aberdeen Offshore Wind Farm* [online]. Woerden: SPT Offshore. <https://www.sptoffshore.com/projects/aberdeen-offshore-wind-farm> [Zugriff am: 29. Juni 2022]
- [4] OffshoreWIND.biz (2018) *Framo Pumps for Borkum Riffgrund 2* [online]. Schiedam: OffshoreWIND.biz. <https://www.offshorewind.biz/2018/08/07/framo-pumps-for-borkum-riffgrund-2> [Zugriff am: 29. Juni 2022]
- [5] OffshoreWIND.biz (2021) *First Jacket In at Deepest Fixed Bottom Offshore Wind Farm* [online]. Schiedam: OffshoreWIND.biz. <https://www.offshorewind.biz/2021/10/11/first-jacket-in-at-deepest-fixed-bottom-offshore-wind-farm> [Zugriff am: 29. Juni 2022]
- [6] DIN 18088 (2019) *Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen*. Berlin: Beuth.
- [7] Tjelta, T. I. (1994) *Geotechnical aspects of bucket foundations replacing piles for the Europipe 16/11-E Jacket*. Proceedings 26. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, May 2–5, 1994.
- [8] Bye, A.; Erbrich, C.; Rognlien, B.; Tjelta, T. I. (1995) *Geotechnical design of bucket foundations*. Proceedings 27. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, May 1–4, 1995.
- [9] Byrne, B. W. (2000) *Investigations of suction caissons in dense sand* [Doctoral Thesis]. University of Oxford.
- [10] Liingaard, M. (2006) *Dynamic behaviour of suction caissons* [Doctoral Thesis]. Aalborg University.
- [11] Senders, M.; Randolph, M. F. (2009) *CPT-Based method for the installation of suction Caissons in Sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135, No. 1, pp. 14–25. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:1(14))
- [12] Thieken, K.; Achmus, M.; Schröder, C. (2014) *On the behavior of suction buckets in sand under tensile loads*. Computer and Geotechnics 60, pp. 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.04.004>
- [13] Pinna, R. (2004) *Buckling of suction caissons during installation* [Doctoral Thesis]. University of Western Australia.
- [14] Madsen, S. (2014) *Buckling of bucket foundations during installation* [Doctoral Thesis]. Aalborg University.
- [15] Gottschalk, M. (2016) *Zur Beultragfähigkeit von Suction Buckets* [Doctoral Thesis]. Leibniz Universität Hannover.
- [16] Jin, Z.; Yin, Z. Y.; Kotronis, P.; Li, Z.; Tamagnini, C. (2019) *A hypoplastic macroelement model for a caisson foundation in sand under monotonic and cyclic loadings*. Marine Structures 66, pp. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.02.002>
- [17] Bagheri, P.; Kim, J. M. (2019) *Evaluation of cyclic and monotonic loading behavior of suction bucket foundations used for offshore wind turbines*. Applied Ocean Research 91, 101865. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101865>
- [18] Nielsen, S. D. (2019) *Finite element modeling of the tensile capacity of suction caissons in cohesionless soil*. Applied Ocean Research 90, 101866. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101866>
- [19] Bienen, B.; Klinkvort, R. T.; O’Loughlin, C.; Byrne, B. W. (2018) *Suction caissons in dense sand, Part I: Installation, limiting capacity and drainage*. Géotechnique 68, No. 11, pp. 937–952. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.281>
- [20] Zahng, Y.; Sudhakaran, K.; Askarinejad, A. (2020) *Centrifuge Modelling of Suction Caissons Subjected to Cyclic Loading in Tension* in: Laue, J.; Bansal, T. [eds.] *4th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics*. ECPMG 2020, Luleå, Sweden, Sep. 7–8, 2020.
- [21] Stapelfeldt, M.; Bienen, B.; Grabe, J. (2020) *The influence of the drainage regime on the installation and the response to vertical cyclic loading of suction caissons in dense sand*. Ocean Engineering 215, 107105. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107105>
- [22] Vaitkune, E.; Ibsen, L. B.; Nielsen, B. N. (2017) *Bucket foundation model testing under tensile axial loading*. Canadian Geotechnical Journal 54, pp. 720–728. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0301>
- [23] Jeong, Y.-H.; Kim, J.-H.; Manandhar, S.; Ha, J.-G.; Park, H.-J.; Kim, D.-S. (2020) *Centrifuge modelling of drained pullout and compression cyclic behaviour of suction bucket*. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics 20, No. 2, pp. 59–70. <https://doi.org/10.1680/jphmg.18.00044>
- [24] Hung, L.-C.; Lee, S.; Tran, N. X.; Kim, S.-R. (2017) *Experimental investigation of the vertical pullout cyclic response of bucket foundations in sand*. Applied Ocean Research 68, pp. 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.06.006>
- [25] Gütz, P. (2020) *Tensile-Loaded Suction Bucket Foundations for Offshore Structures in Sand* [Doctoral Thesis]. Leibniz Universität Hannover.
- [26] Carbon Trust (2019) *Suction installed caisson foundations for offshore wind: Design guidelines*. Offshore Wind Accelerator.
- [27] Standard DNVGL-ST-0126 (2016) *Support structures for wind turbines*.
- [28] Wisotzki, E.; Foglia, A.; Schallert, M.; Quiroz, T. (2018) *Ermittlung des Pfahlgruppeneffekts einer Zweiergruppe offener Stahlrohrpfähle in Sand*. Geotechnik 41, H. 3, S. 174–185. <https://doi.org/10.1002/gete.201800006>
- [29] EN 1993-1-6 (2017) *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen*. Berlin: Beuth.
- [30] Böhm, M.; Schaumann, P. (2022) *Shell buckling simulations of suction buckets with stochastic and deterministic imperfection forms*. Journal of Physics Conference Series, 2265 042031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/4/042031>

Autorinnen und Autoren

Dr. Aligi Foglia (Korrespondenzautor)

aligi.foglia@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES

Merkurstraße 13

30149 Hannover

Tulio Quiroz

tulio.quiroz@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES

Merkurstraße 13

30149 Hannover

Viktor Widerspan

viktor.widerspan@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES

Merkurstraße 13

30149 Hannover

Dariya Heinrich

dariya.heinrich@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES

Merkurstraße 13

30149 Hannover

Georg Binsker

georg.binsker@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES

Merkurstraße 13

30149 Hannover

Dr.-Ing. Alexander Schenk

alexander.schenk@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES

Merkurstraße 13

30149 Hannover

Immo Sanders

sanders@igth.uni-hannover.de

Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik – ForWind

Appelstraße 9a

30167 Hannover

Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

achmus@igth.uni-hannover.de

Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik – ForWind

Appelstraße 9a

30167 Hannover

Dr.-Ing. Mareike Collmann

collmann@tth.uni-hannover.de

Leibniz Universität Hannover, Testzentrum Tragstrukturen – ForWind

Appelstraße 9a

30167 Hannover

Manuela Böhm

boehm@stahl.uni-hannover.de

Leibniz Universität Hannover, Institut für Stahlbau – ForWind

Appelstraße 9A

30167 Hannover

Prof. Dr. Peter Schaumann

schaumann@stahl.uni-hannover.de

Leibniz Universität Hannover, Institut für Stahlbau – ForWind

Appelstraße 9A

30167 Hannover

Waldemar Elsesser

elsesser@gudconsult.de

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

Darwinstraße 13

10589 Berlin

Dr. techn. Bert Schädlich

schaedlich@gudconsult.de

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

Darwinstraße 13

10589 Berlin

Dr.-Ing. Fabian Kirsch

kirsch@gudconsult.de

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

Darwinstraße 13

10589 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter

richter@gudconsult.de

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

Darwinstraße 13

10589 Berlin

Manfred Gose

manfred.gose@tractebel.engie.com

Tractebel Engineering GmbH, Energy Division

Friedberger Str. 173

61118 Bad Vilbel

Peter Pehl

peter.pehl@tractebel.engie.com

Tractebel Engineering GmbH, Energy Division

Friedberger Str. 173

61118 Bad Vilbel

Dr. Patric Kleineidam

patric.kleineidam@tractebel.engie.com

Tractebel Engineering GmbH, Energy Division

Friedberger Str. 173

61118 Bad Vilbel

Justus Maas

j.maas@overdick-offshore.com

Tractebel Overdick GmbH

Cremon 32

20457 Hamburg

Sercan Ibis

s.ibis@overdick-offshore.com

Tractebel Overdick GmbH

Cremon 32

20457 Hamburg

Klaas Oltmann

k.oltmann@overdick-offshore.com

Tractebel Overdick GmbH

Cremon 32

20457 Hamburg

Zitieren Sie diesen Beitrag

Foglia, A.; Quiroz, T.; Widerspan, V.; Heinrich, D.; Binsker, G.; Schenk, A.; Sanders, I.; Achmus, M.; Collmann, M.; Böhm, M.; Schaumann, P.; Elsesser, W.; Schädlich, B.; Kirsch, F.; Richter, T.; Gose, M.; Pehl, P.; Kleineidam, P.; Maas, J.; Ibis, S.; Oltmann, K. (2022) *Aktuelle Untersuchungen an Suction Buckets für Offshore-Windenergieanlagen – das ProBucket-Projekt*. Bautechnik 99, H. 9, S. 669–678.

<https://doi.org/10.1002/bate.202200065>