

Zur Beultragfähigkeit von Suction Buckets

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Malte Gottschalk
geboren am 04. Mai 1983 in Hannover

2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Tag der Promotion: 24. Oktober 2016

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Heft 33

Malte Gottschalk

Zur Beultragfähigkeit von Suction Buckets

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2016

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Institut für Stahlbau
Appelstr. 9A
30167 Hannover

<http://www.stahlbau.uni-hannover.de>

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5128-5

ISSN 1617-8327

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Schaumann, der mich bei der Anfertigung dieser Arbeit betreut und die Erstberichterstattung übernommen hat. Sein Engagement, sein anhaltendes Interesse an meiner Arbeit und die durch ihn geschaffenen, hervorragenden Arbeits- und Ausbildungsbedingungen haben maßgebend zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Besonderen Dank schulde ich Herrn Professor Schaumann für die fachlichen, überfachlichen aber auch fachfremden Gespräche, die für mich von äußerst großem Wert waren und mir wichtige Impulse gegeben haben.

Für die Übernahme des Korreferats gebührt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Ummerhofer. Seine Anregungen haben mir neue Blickwinkel aufgezeigt. Ebenfalls sei Herrn Professor Dr.-Ing. Martin Achmus für das Mitwirken in der Promotionskommission und Herrn Professor Dr.-Ing. Steffen Marks für die Übernahme des Vorsitzes herzlich gedankt.

Die Grundlage für die vorliegende Arbeit bildete das Verbundforschungsvorhaben "Suction Bucket Gründungen als innovatives und montageschallreduzierendes Konzept für Offshore-Windenergieanlagen" (WindBucket) (Fkz 0325406B), welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanziell gefördert wurde. Für die finanzielle Förderung bedanke ich mich herzlich.

Einen großen Dank möchte ich all meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Stahlbau für die sehr gute Zusammenarbeit aussprechen. Das äußerst angenehme Arbeitsklima sowie die stets gute Diskussionsbereitschaft bei fachlichen Fragestellungen waren mir eine große Hilfe. Namentlich möchte ich mich ganz herzlich bei Frau Dr.-Ing. Stefanie Steppeler bedanken. Auf ihre spontane Unterstützung und allzeitige Bereitschaft auch komplexe Sachverhalte gemeinsam zu diskutieren, konnte ich mich stets verlassen. Großer Dank gebührt ihr auch für die sehr gewissenhafte und kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Zu guter Letzt geht mein besonderer Dank an meine Familie und insbesondere an meine Frau Claudia für ihre moralische Unterstützung und den großen Einsatz, mit dem sie mir den Freiraum für die Fertigstellung dieser Arbeit geschaffen hat. Für ihre sorgfältige und interessierte Durchsicht der Arbeit und die durchdachten Anmerkungen bedanke ich mich herzlich. Unsere Töchter Mira und Ella haben mir durch ihre Fröhlichkeit stets neue Kraft gegeben und mir den Blick für das Wesentliche gestärkt.

Malte Gottschalk

Kurzfassung

Zur Eindämmung der installationsbedingten Schallemissionen beim Rammen herkömmlicher Pfahlgründungen für Offshore-Windenergieanlagen werden neuartige Einbringverfahren und Verankerungsarten gesucht. Eine emissionsreduzierte Installation wird unter anderem durch Suction Buckets ermöglicht, welche seit einigen Jahrzehnten in der Öl- und Gasindustrie als Plattformgründungen eingesetzt werden. Trotz der bekannten Beulgefährdung finden sich in der Literatur keine detaillierten und auf aktuellen Methoden beruhenden Untersuchungen zum Beulverhalten von Suction Buckets, welche für eine gleichzeitig zuverlässige und kostengünstige Bemessung der Stahlstruktur erforderlich sind. Für eine optimale Bemessung im Grenzzustand „Beulen“ bietet sich das GMNIA-Verfahren nach DIN EN 1993-1-6 (2010) an, welches vom Anwender die Festlegung von Ersatzimperfektionen verlangt.

In dieser Arbeit werden einerseits das typische Beulverhalten eines exemplarischen Suction Buckets numerisch analysiert und andererseits die Auswirkungen repräsentativer Imperfektionen auf die resultierenden Beulwiderstände und Versagensformen systematisch untersucht und bewertet. Untersuchungsbegleitend werden gleichzeitig Modellierungs- und Berechnungsempfehlungen für die Beullastermittlung von Suction Buckets im Lastfall „Installation“ abgeleitet.

In dem eingesetzten FE-Strukturmodell wird die Lagerung durch den Baugrund mittels nichtlinearer Bodenersatzfederelemente realisiert, deren Kennlinien systemabhängig aus einem geotechnischen FE-Modell entwickelt werden.

Am geometrisch perfekten System wird ein ausreichender Widerstand der Struktur gegen Beulversagen auf Grundlage des MNA/LBA-Verfahrens nach DIN EN 1993-1-6 nachgewiesen und das typische, elastisch-plastische Beulverhalten des Suction Buckets bei verschiedenen Einbindetiefen festgestellt. Die Untersuchungen am imperfekten System umfassen eigenformaffine und kollapsaffine Imperfektionen sowie Ringbeul- und Aufstandsimperfektionen, die jeweils mit mehreren Imperfektionsamplituden und Einbindetiefen der Mantelschale im Baugrund kombiniert werden.

Die Untersuchungsergebnisse bilden die Basis für einen bewertenden Vergleich der Imperfektionsarten hinsichtlich ihrer Eignung für eine zuverlässige Abminderung des Beulwiderstands auf ein realistisches Niveau. Für das untersuchte Suction Bucket werden hierfür einzig eigenformaffine Imperfektionen als geeignet identifiziert.

Eine dominierende Rolle einzelner Imperfektionsformen, wie beispielsweise der 1. Beuleigenform, kann nicht festgestellt werden. Insgesamt ist eine große Variantenvielfalt „anregender“ Imperfektionsformen zielführender als die Suche nach der „ungünstigsten“ Imperfektion. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass für eine zuverlässige Ermittlung der unteren Grenze der Beulwiderstände zwingend mehrere Imperfektionsformen und -amplituden zu berücksichtigen sind.

Abstract

To control the installation-related noise emissions from the driving of conventional pile foundations of offshore wind turbines novel installation methods and anchorage types are sought-after. Amongst others, an emission reduced installation is enabled by suction buckets that have been employed as platform foundations in the oil- and gas industries for several decades. Despite the well-known danger of buckling no detailed investigations on the buckling behaviour can be found in literature that are based on currently valid Methods. Such investigations are essential for a simultaneously reliable and cost-efficient design of the steel structure. For an optimal design in the limit state “shell buckling” an appropriate procedure is the GMNIA-method according to DIN EN 1993-1-6 (2010), that requires the user to define equivalent imperfections.

In this thesis, on the one hand the typical shell buckling behaviour of an exemplary suction bucket is numerically analysed and on the other hand the impact of representative imperfections on the resulting buckling resistances and deformation shapes are systematically investigated and evaluated. Accompanying the examination modelling and calculation recommendations for the buckling load calculation of suction buckets in the load case “installation” are derived simultaneously.

In the deployed structural FE-model the soil resistance is modelled by nonlinear spring elements, whose characteristics are system-dependently developed from a geotechnical FE-model.

Using the geometrically perfect system a sufficient resistance of the structure against shell buckling is demonstrated, based on the MNA/LBA-method according to DIN EN 1993-1-6 and the suction buckets typical elastic-plastic buckling behaviour is ascertained at various installation depths. The examinations of the imperfect system encompass eigenmode-affine and collapse-affine imperfections as well as ring buckle and skirt tip contact area imperfections, that are combined with several imperfection amplitudes and embedment depths of the skirt each.

The examination results form the basis for a judging comparison of the imperfection types concerning their suitability for a reliable reduction of the buckling resistance onto a realistic level. In case of the examined suction bucket only eigenmode-affine imperfections are identified to be suitable for this purpose.

There is no dominant role of certain imperfection shapes like for example the 1st buckling eigenmode detectable. In general, a large variety of “stimulating” imperfections is more efficient than searching for the “worst” imperfection. Furthermore, the results indicate that several imperfection shapes and amplitudes are necessarily taken into account in order to obtain the lower bound of buckling resistances reliably.

Schlagwörter

Schalenbeulen, Stahl, Suction Bucket, Stabilität, Imperfektionen, Offshore-Windenergie

Keywords

Shell buckling, Steel, Suction Bucket, Stability, Imperfections, Offshore wind energy

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Lösungsweg.....	4
2	Stand der Forschung und Technik	7
2.1	Suction Buckets	7
2.1.1	Entwicklung und Einsatzgebiete.....	7
2.1.2	Herstellung und Installation.....	10
2.1.3	Betriebsbelastungen	13
2.1.4	Beullastbestimmung und Bemessungsansätze	15
2.2	Beulwiderstand unversteifter Kreiszyinderschalen.....	17
2.2.1	Historische Entwicklung	17
2.2.2	Stabilitätsverhalten von Schalen	19
2.2.3	Imperfektionen	22
2.2.4	Einwirkungen und Lagerung	23
2.3	Bemessungskonzepte nach Eurocode 3	26
2.3.1	Spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis	27
2.3.2	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler MNA- und LBA-Berechnung.....	28
2.3.3	Numerisch gestützter Beulsicherheitsnachweis mittels globaler GMNIA- Berechnung	30
2.3.4	Ersatzimperfektionen für die numerische Berechnung der Beulsicherheit	32
2.4	Fazit für die eigenen Untersuchungen.....	34
3	Numerische Modellbildung	37
3.1	FEM-Strukturmodell	37
3.1.1	Elementtypen.....	37
3.1.2	Materialmodell Stahl	38
3.1.3	Geometrie	39
3.1.4	Lasteinleitung und Lagerung.....	41
3.2	Baugrundmodell.....	42
3.2.1	Möglichkeiten der Baugrundmodellierung	42
3.2.2	Baugrundparameter.....	43

3.3	Kennlinien der Bodenersatzfedern	44
3.3.1	Radiale Bettungssteifigkeit.....	45
3.3.2	Mantelreibung	47
3.3.3	Spitzendruck	47
3.4	Belastungssituation während der Installation	48
3.5	Imperfektionsmodellierung	52
3.6	Interpretation numerischer Ergebnisse.....	53
3.6.1	Plastischer Beulwiderstand auf Basis von MNA.....	53
3.6.2	Elastisch-plastischer Beulwiderstand auf Basis von GMNA und GMNIA.....	56
3.6.3	Berücksichtigung von Gleitwegen	57
3.7	Validierung der numerischen Ergebnisse	58
3.7.1	Netz-Diskretisierungsgrad.....	58
3.7.2	Verzweigungspunkte in geometrisch nichtlinearen Analysen	60
3.7.3	Bodenersatzfedern.....	62
4	Beullastermittlung am perfekten System	65
4.1	Einfluss der Deckelkonstruktion	65
4.1.1	Untersuchungsumfang.....	66
4.1.2	Belastung und Lagerung	66
4.1.3	Ergebnisse.....	66
4.2	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	69
4.2.1	Belastung und Lagerung	69
4.2.2	Ergebnisse.....	69
4.3	Beulverhalten der geometrisch perfekten Struktur	72
4.3.1	Untersuchungsumfang.....	72
4.3.2	Belastung und Lagerung	73
4.3.3	Ergebnisse.....	74
4.4	Zusammenfassung	76
5	Einfluss verschiedener Imperfektionsformen auf das Beulverhalten	79
5.1	Eigenformaffine Imperfektionen	79
5.1.1	Untersuchungsumfang.....	79
5.1.2	Imperfektionsformen	81
5.1.3	Belastung und Lagerung	84
5.1.4	Ergebnisse.....	85

5.1.5	Zuverlässigkeitsprüfung	94
5.1.6	Zusammenfassung	96
5.2	Kollapsaffine Imperfektionen	98
5.2.1	Untersuchungsumfang	98
5.2.2	Imperfektionsform	98
5.2.3	Belastung und Lagerung	99
5.2.4	Ergebnisse.....	99
5.2.5	Zusammenfassung	103
5.3	Ringbeulen	104
5.3.1	Untersuchungsumfang	104
5.3.2	Imperfektionsform	104
5.3.3	Belastung und Lagerung	105
5.3.4	Ergebnisse.....	105
5.3.5	Zusammenfassung	109
5.4	Aufstandsimperfektionen.....	110
5.4.1	Untersuchungsumfang	110
5.4.2	Generierung der Anfangsimperfektion.....	111
5.4.3	Belastung und Lagerung	112
5.4.4	Ergebnisse.....	112
5.4.5	Zusammenfassung	117
5.5	Ergebnisvergleich und Schlussfolgerungen	118
6	Zusammenfassung und Ausblick	125
6.1	Zusammenfassung	125
6.2	Ausblick	130
7	Verzeichnisse	131
7.1	Literaturverzeichnis.....	131
7.1.1	Normen und Richtlinien.....	131
7.1.2	Handbücher, Aufsätze, Dissertationen, Artikel, Präsentationen	132
7.2	Abbildungsverzeichnis	140
7.3	Tabellenverzeichnis	143
Anhang A	Ergebnisse der GMNIA-Berechnungen mit eigenformaffinen Imperfektionen	144
Anhang B	Ergebnisse der GMNIA-Berechnungen mit Ringbeulen.....	149

Bezeichnungen

Lateinische Buchstaben

b_{imp}	%	Imperfektionsbreite
D_s	-	Lagerungsdichte
d_s	mm	Durchmesser der Mantelschale
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
F_{end}	N	Spitzenwert des Spitzendrucks je Federelement
F_{Jacket}	MN	anteiliges charakteristisches Jacketeigengewicht
f_{LG}	-	Laststeigerungsfaktor
f_y	N/mm ²	Streckgrenze
f_{yk}	N/mm ²	charakteristischer Werte der Streckgrenze
h_e	mm	Einbindetiefe
h_r	mm	Beulposition
h_s	mm	Höhe der Mantelschale
K	-	Erddruckbeiwert
k_0	-	Erddruckbeiwert
k_{GMNIA}	-	Kalibrierungsfaktor
l	mm	Schalenlänge
l_g	mm	relevante Messlänge
m	-	Anzahl der Meridianwellen
n	-	Anzahl der Umfangswellen
n_i	-	Toleranzniveau-Faktor
P_{cr}	N	elastische Knicklast
P_{Saug}	MPa	Unterdruck
R_{cr}	N/mm ²	idealer elastischer Referenzwiderstand
R_k	N/mm ²	charakteristischer Referenzwiderstand
R_{pl}	N/mm ²	plastischer Referenzwiderstand
r	mm	Radius
$r_{R,GMNA}$	-	bezogener elastisch-plastischer Beulwiderstand der perfekten Schale
$r_{R,GMNIA}$	-	bezogener elastisch-plastischer Beulwiderstand der imperfekten Schale
$r_{R,GMNIA,check}$	-	Ergebnis der numerischen Kalibrierungsberechnung
$r_{R,GNA}$	-	bezogener elastischer Beulwiderstand
$r_{R,test,known,check}$	-	bekanntes Versuchsergebnis
r_{Rcr}	-	bezogener idealer elastischer Referenzwiderstand
r_{Rd}	-	Bemessungsbeulwiderstand
$r_{Rk,known,check}$	-	bekannter charakteristischer Wert des Vergleichsbeulfalls
r_{Rpl}	-	bezogener plastischer Referenzwiderstand
s	-	Auflagersteifigkeit

s_{imp}	-	Imperfektions-Steifigkeitsfaktor
t	mm	Schalendicke
$\tan \delta$	-	Reibbeiwert
U_n	-	Imperfektionsamplitudenparameter der Herstelltoleranz- Qualitätsklasse
u	MPa	Unterdruck
u_{crit}	MPa	geotechnisch kritischer Unterdruck
u_{min}	MPa	geotechnisch erforderlicher Unterdruck
u_x	mm	Radialverschiebung
w	mm	lokale Imperfektionstiefe
$w^* = w_0/t$	-	auf Blechdicke bezogene Imperfektionsamplitude
w_0	mm	Imperfektionsamplitude

Griechische Buchstaben

α	-	elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor
α_{ov}	-	globaler elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor
α_θ	-	elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor für Umfangsdruck
α_x	-	elastischer Imperfektions-Abminderungsfaktor für Axialdruck
β_{ov}	-	globaler plastischer Bereichsfaktor
γ'	kN/m ²	Wichte unter Auftrieb
γ_{M1}	-	Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialwiderstandsseite
ΔU	-	Unterdruckdifferenz
Δw_k	mm	charakteristische Imperfektionsamplitude
η_{ov}	-	globaler Interaktionsexponent
λ	-	bezogener Schalenschlankheitsgrad
λ	-	lineare meridionale Biegehalbwellenlänge
λ_{ov}	-	bezogener globaler Schalenschlankheitsgrad
$\lambda_{ov,0}$	-	globaler vollplastischer Grenزشlankheitsgrad
μ_{max}	N	Spitzenwert der Mantelreibung pro Federelement
ν	-	Poisson-Zahl, Querkontraktionszahl
ρ_s	-	Stahlrohddichte
σ_{cr}	N/mm ²	ideale elastische Beulspannung
σ_θ	N/mm ²	horizontaler Erddruck
$\sigma_{\theta,Rcr}$	N/mm ²	ideale Umfangsbeulspannung
σ_{Rk}	N/mm ²	charakteristische Beulspannung
σ_u	N/mm ²	reale Beulspannung
σ_{va}	N/mm ²	vertikaler Erddruck, Schalenaußenseite
σ_{vi}	N/mm ²	vertikaler Erddruck, Schaleninnenseite

$\sigma_{x,Rcr}$	N/mm ²	ideale Meridianbeulspannung
σ_{xSi}	N/mm ²	ideale Beulspannung
$\tau_{x\theta,Rcr}$	N/mm ²	ideale Schubbeulspannung
φ'	°	dräniertes Reibungswinkel
χ	-	Beulreduktionsfaktor
χ_{ov}	-	globaler Beulreduktionsfaktor

Abkürzungen

EDR	European Design Recommendations
EW	Eigenwert
FEM	Finite-Elemente-Methode
GMNA	geometrisch materiell nichtlineare Analyse
GMNIA	GMNA mit Imperfektionen
GNA	geometrisch nichtlineare Analyse
GNIA	GNA mit Imperfektionen
LA	linear elastische Analyse
LBA	lineare Verzweigungsanalyse
MA	membrantheoretische Analyse
MNA	materiell nichtlineare Analyse
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
WEA	Windenergieanlage