

Numerische Untersuchung zum Tragverhalten von Bucketgründungen für Offshore-Windenergie-Anlagen

K. Abdel-Rahman¹, M. Achmus²

1 Einführung

Zur Zeit werden in der Nord- und Ostsee mehrere Offshore-Windparks für Wassertiefen von bis zu 30 m geplant. Die Gründungskonstruktion solcher Offshore-Windparks ist eine entscheidende Komponente bei der Errichtung der Windparks. Die meisten der in der Nordsee bereits installierten Windenergieanlagen sind auf Monopiles gegründet. Eine Alternative dazu könnte die Bucketgründung darstellen.

Diese innovative Gründungsform wurde in jüngster Zeit entwickelt und für kleinere Abmessungen bereits erprobt (e.g. Feld 2001 und Ibsen et al. 2004). Hierbei handelt es sich um einen oben geschlossenen Stahlzylinder relativ großen Durchmessers, welcher mittels Unterdruck in den Baugrund eingebracht wird (Abb. 1).

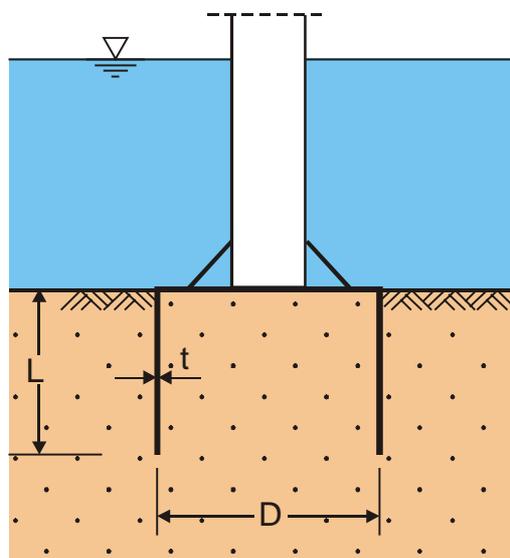


Abbildung 1: Bucketgründung (schematisch)

¹ Dr.-Ing., Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau,
Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover, Tel. ++49 511-762 2273;
khalid@igbe.uni-hannover.de

² Prof. Dr.-Ing., Vorstand des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau,
Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover, Tel. ++49 511-762-4155;
achmus@igbe.uni-hannover.de

Das Einbringen mittels Unterdruck wurde zwar für Offshorebauwerke bereits eingesetzt („suction caissons“), für Offshore-Windenergieanlagen muss aber Neuland betreten werden, was die erforderlichen großen Abmessungen des Buckets angeht.

Da für die genannten Gründungskonstruktion bislang keine durch Messungen oder Erfahrungen abgesicherten Bemessungsverfahren vorliegen, ist eine rechnerische Prognose des Tragverhaltens – verbunden mit der messtechnischen Kontrolle des Bauwerks- bzw. Bodenverhaltens (Beobachtungsmethode) – erforderlich. Zur Prognose des Tragverhaltens von Buckets unter Horizontalkraft- und Momentenbelastung wurden numerische Berechnungen mit dem Programmsystem ABAQUS (2005) durchgeführt.

2 Bucketgründungen

Die Bucketgründung wurde aus der in der Offshoretechnik bereits vielfach eingesetzten Saug-Senkkastründung (suction caisson) entwickelt. Im Grundsatz handelt es sich hier um eine Mischform aus Pfahl- und Schwergewichtsgründung, die Installation der Gründungskonstruktion erfolgt jedoch völlig anders. Mittels eines im Hohlraum zwischen Kopfplatte und Seeboden erzeugten Unterdrucks wird der Bucket in den Untergrund eingepresst (Abb. 2). Eine wichtige Bedingung für den Erfolg der Installation ist natürlich die Hindernisfreiheit des Baugrunds.

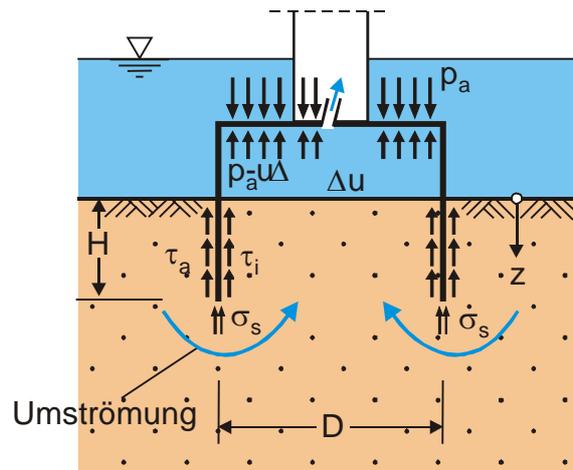


Abbildung 2: Bucketgründung während des Einbringens

Die mobilisierte Einpresskraft ergibt sich als Produkt aus dem realisierten Unterdruck und der inneren Querschnittsfläche des Buckets zuzüglich des Eigengewichts der Gründungsstruktur. Der Eindringwiderstand resultiert aus den am äußeren und inneren Umfang wirkenden Mantelreibungsspannungen (τ_a, τ_i) sowie dem Spitzenwiderstand (σ_s) am Bucketfuß.

Durch den Unterdruck während des Eindringvorgangs wird eine Wasserströmung im Boden von außen in den Bucket hinein induziert. Durch diese Strömung kann es bei zu großen hydraulischen Gradienten zu einem hydraulischen Grundbruch kommen. Dies würde zu Auflockerungen des Gründungsbodens und gegebenenfalls zu einem unkontrollierten Einsinken des Buckets führen. Ein zulässiger Unterdruck darf daher nicht überschritten werden (vgl. Feld 2001).

Aus durchgeführten Berechnungen ergibt sich, dass in homogenem mitteldichtem Sandboden für einen Bucketdurchmesser von 15 m eine Eindringtiefe von rd. 10 bis 13 m und für einen Bucketdurchmesser von 20 m von rd. 13 bis 17 m erreichbar sein müsste (Abb. 3).

Da bisher kaum Erfahrungen vorliegen, werden hier sicher erreichbare Tiefen von 8 m bzw. 10 m angesetzt.

Für Bucketgründungen mit diesen Abmessungen in mitteldichtem Sandboden wurde das Tragverhalten mit Finite Elemente- Berechnungen (ABAQUS 2005) untersucht.

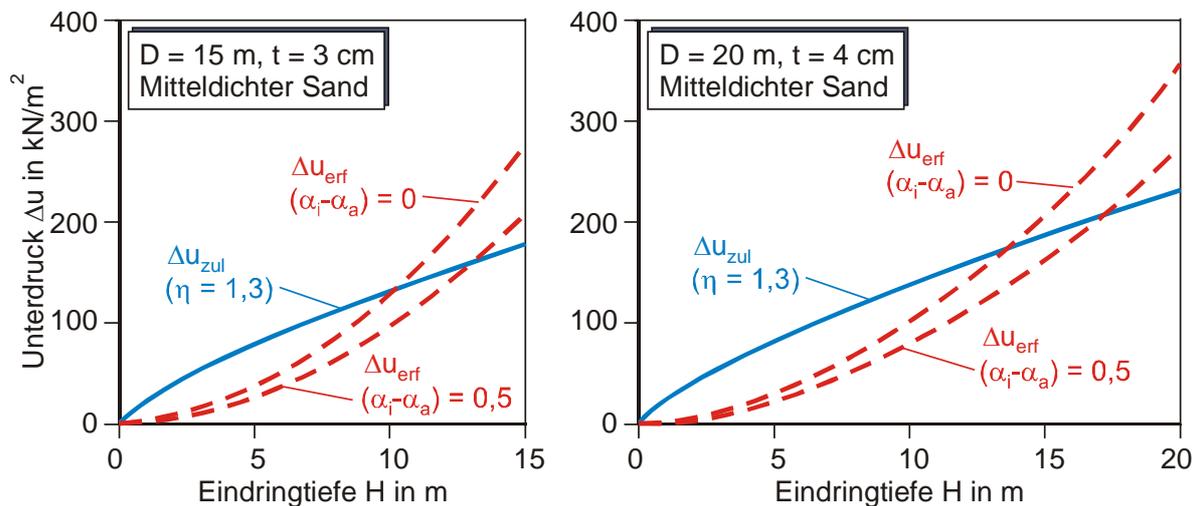


Abbildung 3: Erforderliche und zulässige rechnerische Unterdrücke zum Einbringen von Buckets in mitteldichten Sandboden

3 Numerische Modellierung des Tragverhaltens unter statischer Belastung

Für die Berechnung des Tragverhaltens unter Berücksichtigung der komplexen Interaktionen zwischen dem Bucket und dem Baugrund sind in der Regel numerische Berechnungsverfahren einzusetzen, die allerdings einen erheblichen Zeit- und Rechenaufwand sowie Erfahrung mit derartigen Methoden erfordern.

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von Bucketgründungen wurden dreidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen mit dem Programmsystem ABAQUS (2005) durchgeführt. Sowohl der Bucket als auch der Boden wurden mit Volumenelementen diskretisiert. Es wurden folgende Modelle untersucht und modelliert:

- i) Ein Bucket mit einem Außendurchmesser von $D = 15,0$ m, einer Wanddicke von $t = 3$ cm und einer Einbindelänge in homogenen, mitteldicht gelagerten Sand von $L = 8$ m.
- ii) Ein Bucket mit einem Außendurchmesser von $D = 20,0$ m, einer Wanddicke von $t = 4$ cm und einer Einbindelänge in homogenen, mitteldicht gelagerten Sand von $L = 10$ m.

In der schrittweisen Berechnung wurden zunächst der Initialspannungszustand für homogenen Sandboden generiert und danach die Bodenelemente im Bereich des Buckets durch Bucketelemente ersetzt. Danach wurde die Vertikallast zur Berücksichtigung des Eigengewichts der Windenergieanlage im Modell eingesetzt.

Abschließend wurde die Horizontal-belastung stufenweise aufgebracht. Dabei wurden verschiedene Angriffshöhen h der Belastung über Seeboden und damit Kombinationen von Horizontalkraft H und Biegemoment $M = H \cdot h$ realisiert.

Eine Ansicht des Finite Elemente-Netzes ist in Abb. 4 dargestellt. Der Boden wurde bis zu einem Abstand von der Bucketachse von mindestens dem 3-fachen Bucketdurchmesser sowie bis zu einer Tiefe unter Bucketfuß von mindestens dem 2-fachen Bucketdurchmesser diskretisiert, um Randeinflüsse aus den Modellrändern zu minimieren.

Das Reibungsverhalten in der Grenzfläche Bucket/Boden wurde durch Kontaktelemente modelliert, wobei der Wandreibungswinkel mit $\delta = 0,67 \phi'$ angesetzt wurde.

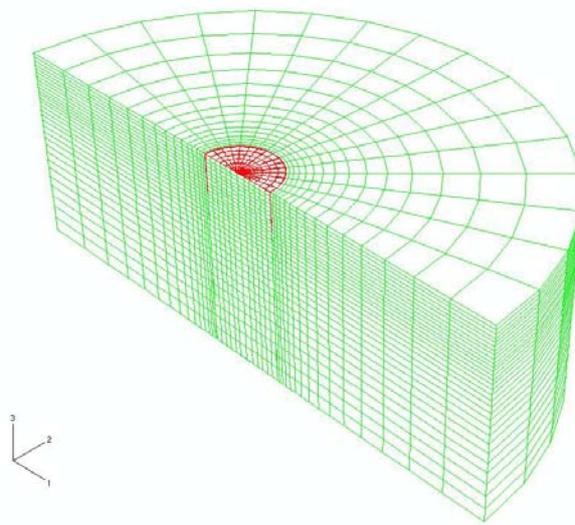


Abbildung 4: Dreidimensionales Finite-Elemente-Modell

Von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Ergebnisse numerischer Berechnungen von Boden-Bauwerks-Interaktionen ist die Modellierung des Stoffverhaltens des Bodens. Für die behandelte Aufgabenstellung ist zum Einen die Erfassung von Bruchzuständen im Boden und zum Anderen die Berücksichtigung des im Allgemeinen nichtlinearen Spannungs-Verformungsverhaltens von Boden wesentlich. Es wurde das vom Abaqus-Programm bereitgestellte elastoplastische Materialgesetz mit Mohr-Coulomb'schem Bruchkriterium verwendet.

Dieses originär im elastischen Bereich mit linearer Elastizität arbeitende Stoffgesetz wurde erweitert durch einen spannungsabhängigen Ansatz des Steifemoduls gemäß folgender Gleichung:

$$E_s = \kappa \sigma_{at} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{at}} \right)^\lambda \quad (1)$$

Hierin ist $\sigma_{at} = 100 \text{ kN/m}^2$ eine Referenzspannung und σ_m ist die aktuelle mittlere Hauptspannung im betrachteten Bodenelement. Die Parameter κ und λ sind Bodenkennwerte, Anhaltswerte für diese Parameter sind z. B. in EAU (2004) angegeben.

Dieses Stoffgesetz hat den Vorteil, dass es allgemein sowohl für nichtbindige als auch für bindige Böden verwendet werden kann. Die im Rahmen der hier dargestellten Berechnungen angesetzten Stoffparameter sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Elemente des Buckets wurden als linear elastisch mit einem Elastizitätsmodul von $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MN/m}^2$ und einer Querdehnzahl von $\nu = 0,2$ modelliert.

Wichte γ'	11,0 kN/m ³
Steifigkeitsparameter κ	400
Steifigkeitsparameter λ	0,60
Querdehnzahl ν	0,25
Innerer Reibungswinkel φ'	35,0°
Dilatanzwinkel ψ'	5,0°
Kohäsion c'	0,1 kN/m ²

Tabelle 1: Verwendete Stoffparameter für mitteldichten Sand

4 Numerische Ergebnisse

Von besonderer Bedeutung für die Bemessung von Windkraftanlagen sind die Verformungen und dabei insbesondere die Verdrehung der Gründungskonstruktion und damit der Turmbasis, da ein störungsfreier Betrieb nur bei relativ geringen Schiefstellungen gesichert ist. Wesentliche Berechnungsergebnisse sind daher die Horizontalverschiebung und die Verdrehung des Buckets am Anschluss zur Turmkonstruktion.

Da die obere Bucketplatte zur Berücksichtigung des Turms und von Aussteifungen des Anschlusses sehr steif modelliert wurde, ergeben sich die genannten Verformungen als Schiefstellung und Verschiebung der Bucketplatte.

In Abb. 6 sind die Horizontalverschiebung und die Verdrehung der Gründungskonstruktion in Seebodenhöhe, also am Kopf des Buckets, abhängig von der Belastung angegeben. Zum Vergleich sind in der Grafik auch die ebenfalls mit Abaqus berechneten Ergebnisse für Monopilegründungen angegeben, siehe Abdel-Rahman & Achmus (2005) sowie Achmus et al. (2005).

Es zeigt sich, dass sich Bucketgründungen bei geringerem Belastungsniveau ähnlich steif oder sogar steifer als alternativ mögliche Monopiles verhalten. Bei höheren Belastungen nehmen die Verformungen jedoch stark zu. Grund dafür ist die gegenüber Monopiles deutlich geringere Einbindetiefe in den Baugrund.

Die Tragfähigkeit der Gründung für horizontale Belastung ist dadurch erheblich geringer, weshalb sich bereits bei geringeren Belastungen stark zunehmende Verschiebungen und Verdrehungen einstellen.

Bucketgründungen können nach diesen Ergebnissen durchaus eine Alternative zu Monopilegründungen darstellen. Bei hoher Belastung, d. h. zum Beispiel bei großer Wassertiefe, dürften die Anforderungen an die Steifigkeit der Gründungskonstruktion von Offshore-Windenergieanlagen jedoch eher mit Monopiles erreichbar sein.

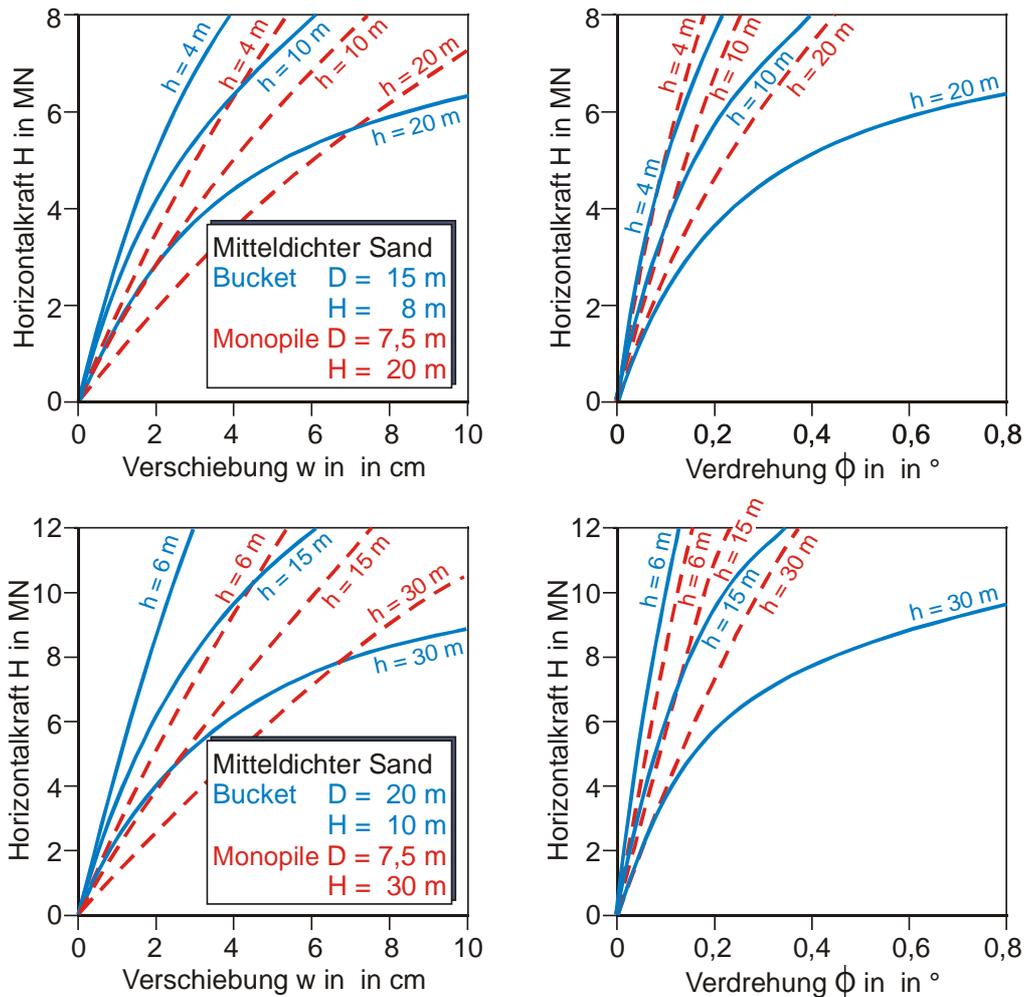


Abbildung 6: Last-Verschiebungskurven für Bucketgründungen und Vergleich mit Monopilegründungen in mitteldichtem Sand

5 Schlussfolgerungen

Bucketgründungen verhalten sich bei geringeren Belastungen steifer als Monopiles. Bei hohen Belastungen, wie sie bei Windenergieanlagen in großen Wassertiefen zu erwarten sind, nehmen die Verformungen jedoch stark zu und sind deutlich größer als bei Monopiles. Grund dafür ist, dass alternativ in Frage kommende Monopilegründungen wegen ihrer großen Einbindetiefe eine deutlich größere Grenzlast für Horizontalkraft- und Momentenbelastung aufweisen.

Bucketgründungen dürften damit eher für moderate Wassertiefen in Frage kommen. Für große Wassertiefen von z. B. 30 m und mehr sind voraussichtlich eher Monopiles oder andere Offshore-Gründungskonstruktionen wie Tripods oder Jackets geeignet.

Literatur

- [1] ABAQUS 2005. User Manual, Version 6.5.
- [2] Abdel-Rahman, K. & Achmus, M.: *Finite Element Modelling of horizontally loaded Monopile Foundations for Offshore Wind Energy Converters in Germany*. International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth, Australia, Sept. 2005.
- [3] Achmus, M.; Abdel-Rahman, K.; Peralta, P.: *Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopiles für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen*. Pfahlsymposium Braunschweig, 2005.
- [4] American Petroleum Institute (API): *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms- Working Stress Design*. API Recommended Practice 2A-WSD (RP2A-WSD), 21st edition, Dallas, 2000.
- [5] EAU 2004. *Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" – Häfen und Wasserstraßen*. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [6] Feld, T.: *Suction Buckets, a new innovative foundation concept, applied to Offshore Wind Turbines*. Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark, 2001.
- [7] Ibsen, L. B.; Schakenda, B.; Nielsen, S. A.: *Development of the bucket foundation for offshore wind turbines, a novel principle*. 3. Gigawind-Symposium "Offshore-Windenergie, Bau- und umwelttechnische Aspekte, Hannover, 2004.