

Zur Bemessung von Pfählen für Offshore- Windenergieanlagen unter statischen und zyklischen Lasten

Prof. Dr.-Ing. M. Achmus
Dr.-Ing. K. Abdel-Rahman
M. Sc. Y.-S. Kuo

Leibniz Universität Hannover
Institut für Grundbau, Bodenmechanik
und Energiewasserbau (IGBE)
Appelstr. 9A, D-30167 Hannover

Fon: ++49 511 762-4155
Fax: ++49 511 762-5105
E-Mail: achmus@igbe.uni-hannover.de
www.igbe.uni-hannover.de

Zur Bemessung von Pfählen für Offshore-Windenergieanlagen unter statischen und zyklischen Lasten

1 Einleitung

Für in den deutschen Offshoregebieten geplante Windparks kommen als Gründungskonstruktionen Monopiles sowie Jacket- und Tripodstrukturen in Frage. Die Optimierung dieser Strukturen ist für die Konkurrenzfähigkeit von Offshore-Windenergie von großer Bedeutung. Am Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Leibniz Universität Hannover werden seit einigen Jahren Untersuchungen zum Tragverhalten sowohl der großen Monopiles als auch der vom Durchmesser her kleineren Pfähle für Jackets und Tripods durchgeführt.

Betrachtet wird dabei das Verhalten unter (statisch angenommenen) Bemessungslasten als auch das bei Offshoreanlagen besonders wichtige Verhalten unter zyklisch wiederholten Belastungen. Die Analysen beschränken sich dabei derzeit auf dränierte Belastungen, d. h. auch bei zyklischer Belastung wird unterstellt, dass keine nennenswerten Porenwasserüberdrücke auftreten.

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über einige Ergebnisse der Untersuchungen gegeben.

2 Zur Bemessung von Monopiles

Die Untersuchungen des Tragverhaltens erfolgen anhand dreidimensionaler numerischer Simulationen. Das den Berechnungen zugrunde gelegte System des Monopiles ist in Bild 1 dargestellt. Die wesentlichen Geometrieparameter sind die Einbindelänge L , die Höhe des Lastangriffspunktes h sowie der Außendurchmesser des Monopiles und die Wandstärke des Stahlrohrs t . Für die Berechnungen wurde ein Baugrundaufbau aus einheitlich mitteldichtem oder einheitlich dichtem Sand angesetzt, die Berechnungsverfahren können aber ohne Weiteres auch auf bindige Böden oder geschichteten Baugrund übertragen werden.

Bezüglich des Tragverhaltens von Monopiles unter statischer Bemessungslast wurde in Achmus et al. (2005) und Abdel-Rahman & Achmus (2005) berichtet. Zusammenfassend ist festzustellen, dass das in der Offshoretechnik üblicherweise angewandte p-y-Verfahren nach API-Richtlinie (API 2000) für Monopiles nicht ohne Weiteres eingesetzt werden kann, da bei großen Durchmessern die Anwendungsgrenzen dieses Verfahrens überschritten werden. Es empfehlen sich hier derzeit numerische Berechnungen, bei denen besonderer Wert auf die realistische Modellierung der (spannungsabhängigen) Bodensteifigkeit zu legen ist.

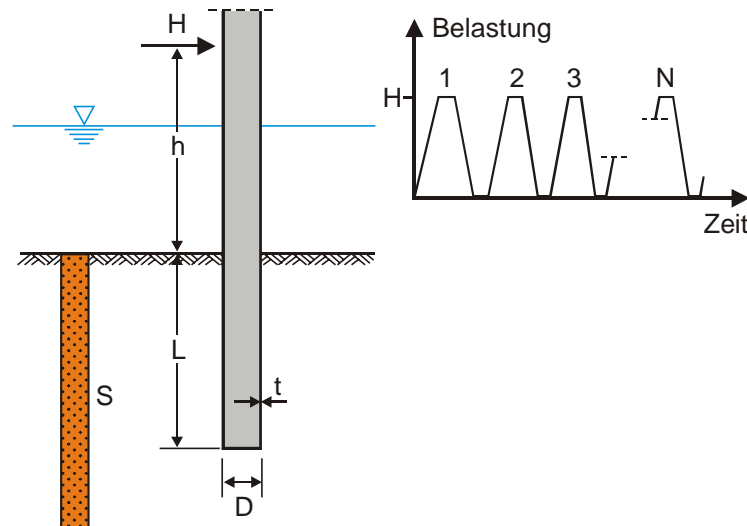


Bild 1 Systembezeichnungen beim Monopile

Während für statische Belastung eine numerische Simulation des Tragverhaltens zumindest möglich ist, gibt es für zyklische Belastung kein anerkanntes Verfahren zur Abschätzung der zu erwartenden Verschiebungszunahme. Im Standard Baugrunderkundungen (BSH 2003) wird gefordert, auf Grundlage bodenmechanischer Versuche das Systemverhalten unter zyklischer Last zu beurteilen. Ein solches Verfahren wurde am IGBE entwickelt (s. auch Achmus et al. 2007a, Achmus et al. 2007b) und wird in seinen Grundzügen nachfolgend kurz beschrieben.

2.2 Numerisches Verfahren für die Berücksichtigung zyklischer Lasten

In zyklischen Triaxialversuchen lässt sich die Verformungszunahme einer Bodenprobe unter zyklischen Lasten experimentell untersuchen. Nach Untersuchungen von Huurman (1996) lässt sich die Entwicklung der bleibenden axialen Dehnung durch folgende Gleichung näherungsweise beschreiben:

$$\varepsilon_{1,p,N} = \varepsilon_{1,p,N=1} N^{m_1} \quad \text{mit} \quad m_1 = b_1 X^{b_2}$$

Hierin ist der Parameter X das zyklische Spannungsverhältnis:

$$X = \frac{\sigma_{1,cyc}}{\sigma_{1,f}}$$

Die Parameter b_1 und b_2 sind Bodenkenngrößen. Diese Größen lassen sich durch eine Serie zyklischer Triaxialversuche bestimmen.

Die Zunahme der plastischen Dehnung kann als Abnahme der Steifigkeit eines Bodenelementes interpretiert werden:

$$E_{S,N} = E_{S,N=1} N^{-m_1}$$

Diese Gleichung für die Steifigkeitsreduktion wird in dem entwickelten numerischen Verfahren genutzt. Die Berechnung des Tragverhaltens eines Monopiles erfolgt mit einem dreidimensionalen Finite Elemente-Modell. In einem ersten Schritt erfolgt die Berechnung für statische Belastung und damit die Ermittlung der Pfahlverschiebung nach dem ersten Zyklus ($N = 1$). Anschließend werden die Elementsteifigkeiten abhängig vom Spannungszustand vor und nach Aufbringen der zyklisch wirkenden Last und abhängig von der Anzahl der Lastzyklen angepasst, wobei der Ansatz von Hurrman zum Einsatz kommt. Schließlich erfolgt eine Neuberechnung für die zyklische Belastung. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine explizite Modellierung, d.h. das Systemverhalten nach N Lastzyklen wird nicht durch N -malige Ent- und Wiederbelastung berechnet (wobei die Dehnungsakkumulation sich dann implizit aus dem Stoffgesetz ergeben müsste), sondern durch einmalige Berechnung mit entsprechend der Zyklenzahl angepassten Bodenparametern.

Ein Problem bei der Übertragung des Hurrman-Modells für das Verhalten im Triaxialversuch auf das zu behandelnde System ist, dass sich beim horizontal belasteten Pfahl nicht nur die größte Hauptspannung σ_1 , sondern auch die kleinste Hauptspannung σ_3 und vor allem auch die Hauptspannungsrichtungen mit dem Aufbringen der zyklischen Belastung ändern, vgl. Bild 2. Für die Berechnung eines charakteristischen zyklischen Spannungsverhältnisses X wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Es werden zunächst getrennt für den Ausgangszustand vor Aufbringen und den Zustand nach Aufbringen der zyklischen Last Spannungsverhältnisse $X_a^{(0)}$ und $X_a^{(1)}$ für jedes Bodenelement berechnet (vgl. Bild 2):

$$X_a^{(0)} = \frac{\sigma_1^{(0)}}{\sigma_{1,f}^{(0)}} \quad , \quad X_a^{(1)} = \frac{\sigma_1^{(1)}}{\sigma_{1,f}^{(1)}}$$

- Mit diesen Werten wird das zyklische Spannungsverhältnis X wie folgt ermittelt:

$$X = \frac{X_a^{(1)} - X_a^{(0)}}{1 - X_a^{(0)}}$$

Dieser Parameter charakterisiert die Belastungszunahme eines Elements infolge der zyklischen Last. Er kann – wie das zyklische Spannungsverhältnis gemäß der Hurrman-Gleichung – maximal 1 werden. Werte $X < 0$, die sich ebenfalls ergeben können, wenn die deviatorische Beanspruchung eines Elementes durch die zyklische Last verringert werden, bleiben unberücksichtigt, d. h. in diesem Fall bleibt die Bodensteifigkeit unverändert.

Für weitere Details wird hier auf Achmus et al. (2007a, 2007b) verwiesen.

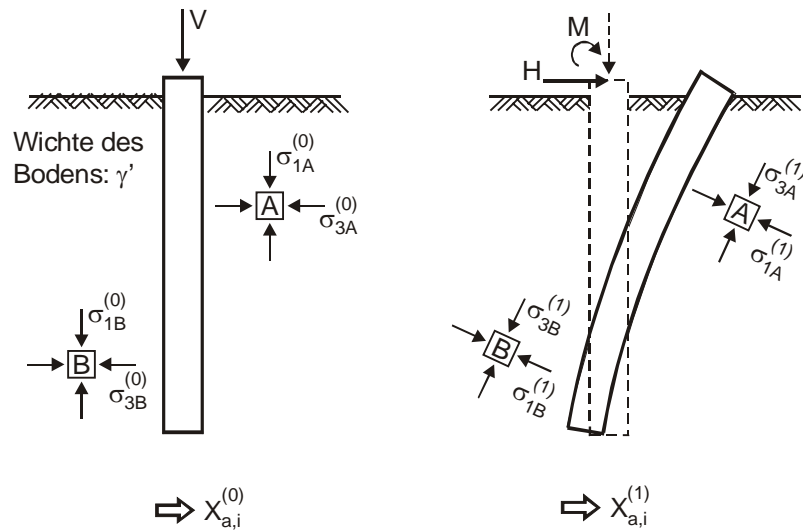


Bild 2 Ermittlung der Spannungsverhältnisse $X_a^{(0)}$ und $X_a^{(1)}$

Mit diesem Berechnungsverfahren erhaltene Ergebnisse für die relative Verschiebungszunahme sind in Bild 3 empirischen Ansätzen gegenübergestellt. Tendenziell werden die Ergebnisse nach diesen Ansätzen durch das numerische Modell bestätigt. Allerdings ergibt sich aus dem neu entwickelten Berechnungsverfahren auch, dass das Maß der Verformungszunahme eines Monopiles von der Belastung und den Systemrandbedingungen abhängig ist. Für mitteldichten Sand ist die Zunahme bei gleicher Belastung größer als für dichten Sand. Bei gleicher Lagerungsdichte führt eine Belastung durch Horizontalkraft und zusätzliches Moment ($h/L = 1$) zu einer größeren Zunahme als für den Fall einer reinen Horizontalkraft ($h/L = 0$). Daraus kann gefolgert werden, dass die Verformungsakkumulationsrate vom relativen Belastungsniveau abhängt, d.h. vom Verhältnis der betrachteten Belastung zur Grenzlast des Systems.

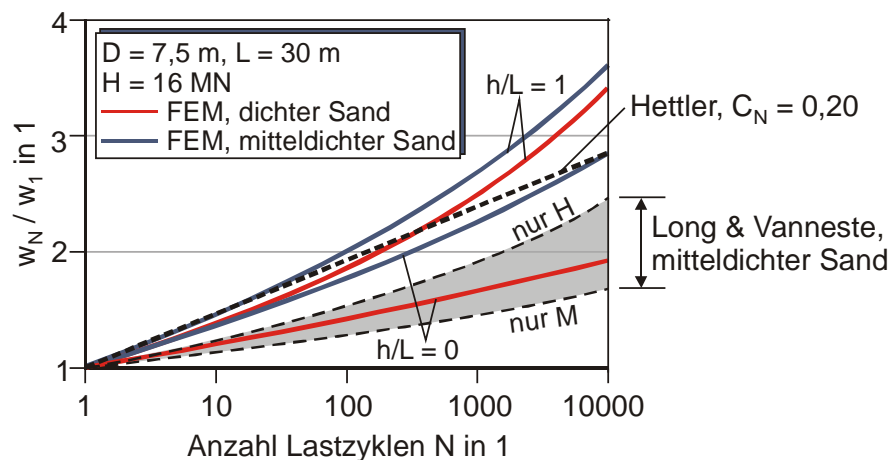


Bild 3 Berechnete relative Zunahme der Verschiebung in Seebodenhöhe

3 Zur Bemessung von Pfählen für Jacket- und Tripodgründungen

Bei Jacket- und Tripodgründungen werden in den Ecken der aufgelösten Gründungskonstruktion Pfähle mit (üblichen) Durchmessern bis max. rd. 2,5 m angeordnet. Diese Pfähle werden überwiegend axial bzw. vertikal, aber auch lateral bzw. horizontal beansprucht.

Bei der Axialbeanspruchung sind insbesondere Zuglasten, welche überdies auch zyklisch auftreten, bemessungsrelevant. Hier besteht besonderer Forschungsbedarf, um die Gründungspfähle in wirtschaftlicher Hinsicht zu optimieren. Nach verschiedenen Untersuchungen wird mit dem üblichen Bemessungsansatz nach API (2000) die Tragfähigkeit relativ langer Pfähle in dichten Sanden unterschätzt, während sich bei kurzen Pfählen auch eine Überschätzung ergeben kann (s. hierzu auch Achmus et al. 2007c).

Als besonders kritisch gelten zyklische Zuglasten von Pfählen. Hierdurch ergibt sich eine Reduktion der Kontaktspannungen zwischen Pfahl und Boden und damit der Grenzmantelreibung, was zu einer Verformungszunahme und gegebenenfalls zum Verlust der Tragfähigkeit führt. In Bild 4 sind beispielhaft Ergebnisse von zyklischen Pfahlzugversuchen (Anzahl der Zyklen bis zum Erreichen des Bruchzustands) nach Jardine & Standing (2000) wiedergegeben. In der derzeitigen Bemessungspraxis wird in der Regel die zyklische Last auf maximal 20% der statischen Grenzlast begrenzt, um zyklisches Versagen auszuschließen. Genauere Ansätze, die auf Grundlage von zyklischen Pfahltests unter Ansatz der tatsächlich an Offshore-Windenergieanlagen zu erwartenden zyklischen Zuglasten erarbeitet werden könnten, würden hier sicherlich eine wirtschaftliche Optimierung ermöglichen.

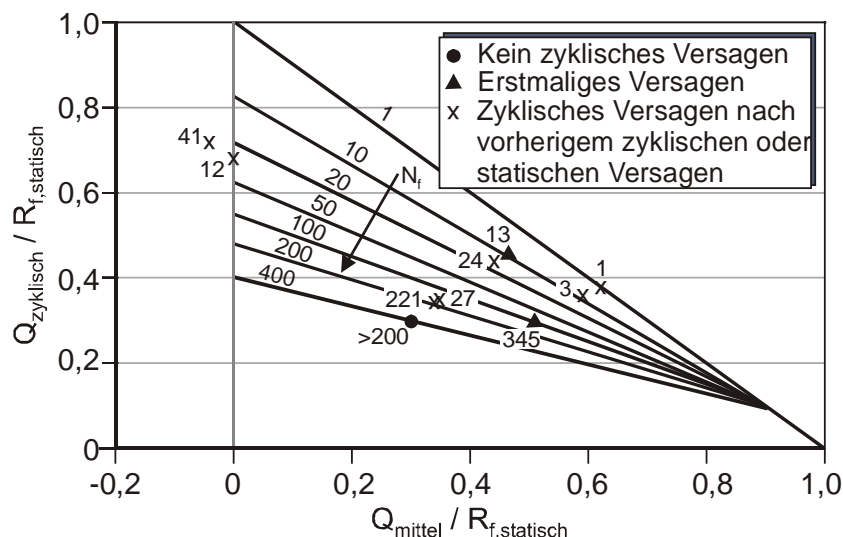


Bild 4 Ergebnisse zyklischer Pfahltests und daraus abgeleitetes Bemessungsdiagramm nach Jardine & Standing (2000)

3.1 Einfluss kombinierter Horizontal- und Vertikalbelastung

In der Praxis wird die Abtragung von Lateral- und Axialbelastungen durch Pfähle getrennt und unabhängig voneinander behandelt. Tatsächlich besteht hier eine gegenseitige Beeinflussung. Insbesondere wird die axiale Steifigkeit eines Pfahls durch eine laterale Beanspruchung reduziert.

Zur Quantifizierung und Beurteilung dieses Einflusses wurden numerische Berechnungen für kombiniert horizontal und vertikal belastete Pfähle in Sandboden ausgeführt. In Bild 5 ist das berechnete axiale Pfahltragverhalten (d. h. Setzung bzw. Hebung abhängig von der Vertikalbelastung) für unterschiedliche Belastungsrichtungen wiedergegeben. Details zu diesen Berechnungen und weitere Ergebnisse sind Achmus et al. (2007c) sowie Abdel-Rahman & Achmus (2006) zu entnehmen. Es ergibt sich, dass die kombinierte Beanspruchung zumindest bei der Bestimmung der axialen Pfahlverformungen berücksichtigt werden sollte.

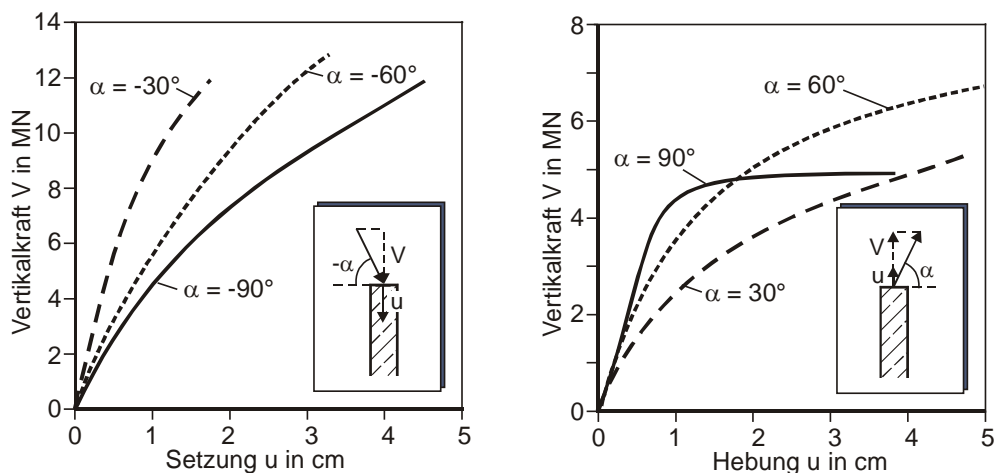


Bild 5 Pfahlsetzung unter geneigter Drucklast (links) bzw. Pfahlhebung unter Zuglast (rechts) für Vertikalpfähle $D = 3 \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$ in Sandboden

4 Literatur

Abdel-Rahman, K., Achmus, M. (2005). *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.

Abdel-Rahman, K., Achmus, M. (2006). *Numerical modelling of combined axial and lateral loading of vertical piles*. 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Graz, Sept. 2006.

Achmus, M., Abdel-Rahman, K., Peralta, P. (2005). *Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopiles für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen*. Pfahl-Symposium 2005, Braunschweig.

Achmus, M., Abdel-Rahman, K. (2005). *On the design of monopile foundations with respect to static and quasi-static cyclic loading*. Copenhagen Offshore Wind, Int. Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, October 2005.

Achmus, M., Abdel-Rahman, K., Kuo, Y.-S., Peralta, P. (2007a). *Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopilegründungen unter zyklischer Belastung. Pfahl-Symposium 2007, Braunschweig.*

Achmus, M., Abdel-Rahman, K., Kuo, Y.-S. (2007b). *Numerical Modelling of Large Diameter Steel Piles under Monotonic and Cyclic Horizontal Loading. 10th Int. Symposium on Numerical Models in Geomechanics (NUMOG X), Rhodes, Greece, April 25-27 (submitted and accepted).*

Achmus, M., Abdel-Rahman, K., tom Wörden, F. (2007c). *Geotechnical Design of Piles supporting Foundation Structures for Offshore Wind Energy Converters. 17th Int. Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference (ISOPE-2007), Lisbon, Portugal, July 1-6 (submitted and accepted).*

API (2000). *Recommended Practice for Planning, Designing and Construction Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. API Recommended Practice 2A-WSD (RP2A-WSD), 21st edition, American Petroleum Institute, Dallas.*

BSH (2003). *Standard Baugrunderkundungen – Mindestanforderungen für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.*

Huurman, M. (1996). *Development of traffic induced permanent strains in concrete block pavements. Heron, 41(1), pp. 29-52.*

Jardine, R.J, Standing, J.R. (2000). *Pile load testing performed for HSE cyclic loading study at Dunkirk, France. Offshore Technology Report-OTO 2000-007.*