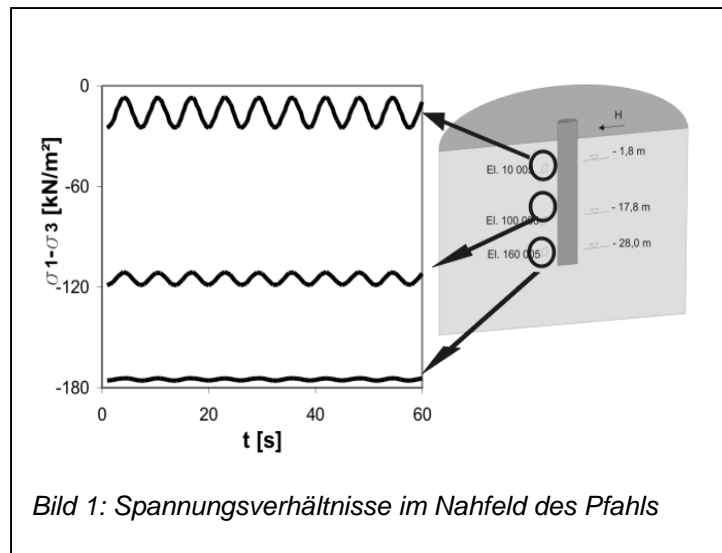


Bewertung des Betriebsverhaltens von Monopile-Gründungen mit Hilfe zyklischer Elementversuche

Dipl.-Ing. Peter Hinz, Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen,
peter.hinz@uni-due.de

Das Bemessungskonzept für Monopile-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen verlangt neben einem Nachweis für das Extremereignis einen Nachweis für das Betriebsverhalten der Anlage. Bei einer angestrebten Lebensdauer von 50 Jahren wird so die mögliche Veränderung der Bettung durch die zyklischen Einwirkungen berücksichtigt. Dabei bietet es sich für eine ingenieurpraktische Anwendung an, den Monopile auf Basis des Bettungsmodulverfahrens mit nichtlinearen Federkennlinien quasistatisch zu berechnen. Bisherige Untersuchungen zeigen jedoch Unsicherheiten bei der Wahl der Modellparameter, wenn, wie bei diesen Anlagen, sehr große Zyklenzahlen zu erwarten sind. Deshalb muss für den Nachweis des Betriebsverhaltens das Langzeitverhalten des Bodens vorab mittels zyklischer Elementversuche beurteilt werden.

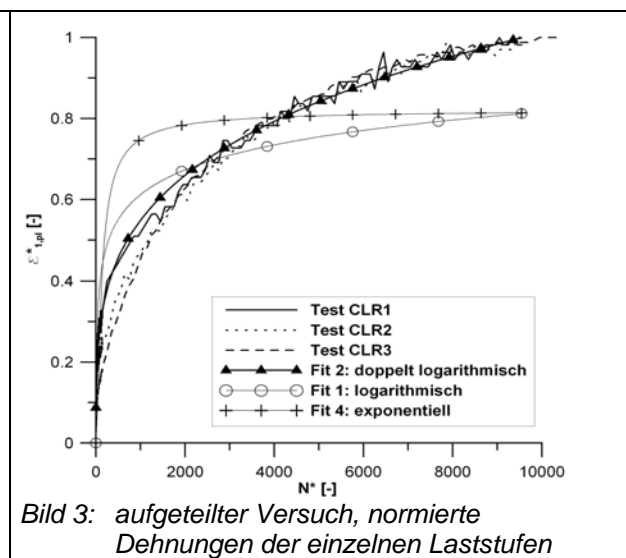
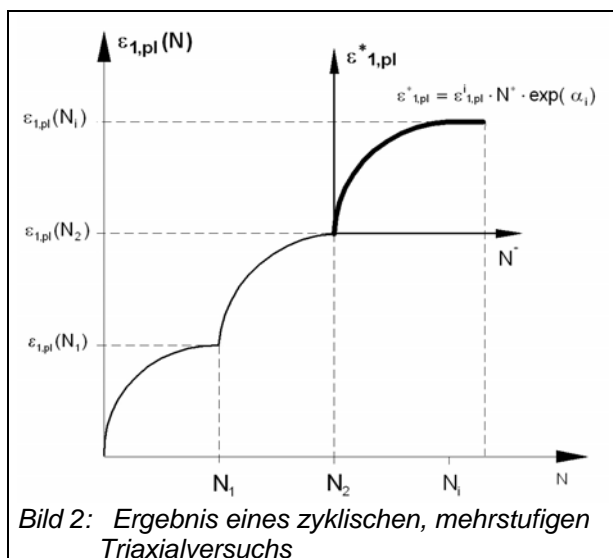
Für eine Monopile-Gründung wird anhand der Spannungsverteilung im Nahfeld des Pfahls (Bild 1) gezeigt, welches Bodenverhalten im Einflussbereich des Pfahls repräsentativ ist. Es existieren kritische Bereiche mit großen zyklischen Belastungsverhältnissen bei geringen Spannungsniveaus und Bereiche mit geringem Einfluss der zyklischen Belastung. Demnach sind verschiedene zyklische Elementversuche mit unterschiedlichen Randbedingungen nötig, um die zyklische Festigkeit des Bodens zu ermitteln. Diese wird durch eine festgelegte Anzahl von Lastspielen mit einem



dazugehörigen Spannungsniveau bestimmt. Es ist jedoch wegen der stochastischen Einwirkungen nicht ohne weiteres möglich, die Belastung in Größe und Abfolge vorherzusagen. Für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen bedeutet dies, dass die stochastischen Einwirkungen vereinfachend zu Spannungskollektiven verschiedener Spannungsniveaus und Lastspielanzahlen zusammengefasst werden müssen und dass die Belastungsvorgeschichte des Bodens bekannt sein muss. Allerdings stehen bis zum jetzigen Zeitpunkt nur unzureichende Anhaltswerte über die Belastungsabfolge für Offshore-Gründungen zur Verfügung, um eine exakte zyklische Bodenfestigkeit zu bestimmen. Lediglich anhand von Messdaten können die Belastungsereignisse nach Intensität und Anzahl gruppiert werden. Diese notwendigen Angaben sind bislang nicht umfassend dokumentiert, da die vorliegenden Datenmengen offenbar einen zu geringen Zeitraum umfassen und vom Standort abhängig sind. Die Konsequenz daraus ist, dass die Randbedingungen in den einzelnen zyklischen Elementversuchen beliebig formuliert werden können. Dies wiederum hat zur Folge, dass die zyklische Festigkeit des Bodens nicht eindeutig quantifiziert wird und je nach Änderung der Randparameter verschiedene Bereiche für die Steifigkeit und damit letztendlich für die Pfahlbettung ermittelt werden.

Um die tatsächlichen Spannungsverhältnisse so exakt wie möglich nachzuempfinden, sind kraftgesteuerte zyklische Triaxialversuche geeignet. Die Spannungsverhältnisse kann man vorab in Finite-Elemente-Berechnungen quantifizieren. So wird es möglich, an einem Bodenelement die Hauptspannungsverläufe festzuhalten und auf die Experimente zu übertragen. Dabei sieht man z.B., dass die horizontale Pfahlkopfverschiebung sowohl auf der aktiven als auch auf der passiven Erddruckseite eine Rotation der Hauptspannungen verursacht. Diese Rotation kann bei gleichzeitig bekanntem Spannungszustand nicht ohne weiteres abgebildet werden, in einem herkömmlichen Triaxialgerät ist dies nicht möglich. Der damit begangene Fehler wird bisher jedoch als vernachlässigbar eingestuft. Die Zyklenzahl wird während des Versuchs solange erhöht, bis die Dehnungsgeschwindigkeit sich kaum noch ändert oder sogar null wird. Der Einfluss der Periode wird entscheidend, wenn die Akkumulation von Porenwasserüberdrücken betrachtet werden soll.

Die Versuche werden als Mehrstufenversuche mit i.d.R. wachsenden zyklischen Belastungsverhältnissen gefahren. Beim Auswerten der Versuche kann man die einzelnen Stufen voneinander trennen und als Einzelversuche auffassen, siehe Bild 2. In einem zweiten Schritt werden die Dehnungen normiert, siehe Bild 3. Man erkennt, dass alle Belastungsstufen einer Bodenprobe im Dehnungs-Zyklenzahl-Diagramm die gleiche Steigung aufweisen.



Die Auswertung zyklischer Triaxialversuche führt je nach Bodenart zu verschiedenen Dehnungsentwicklungen. Nach Gotschol (2002) sind prinzipiell verschiedene mathematische Ansätze geeignet, um einen funktionalen Zusammenhang zwischen der akkumulierten Dehnung und der Zyklenzahl herzustellen. Unsere Experimente an bindigem Boden zeigen, dass ein doppeltlogarithmischer Ansatz am besten geeignet ist, diesen Verlauf anzunähern.

Nach kritischer Bewertung der Versuchsergebnisse können sie in die rechnerischen Nachweise einfließen. Für die Berechnung von Monopiles müssen bei Anwendung des Bettungsmodulverfahrens die Federkennlinien des Bodens festgelegt werden. Für deren Ermittlung kann das API-Verfahren verwendet werden, die Federkennlinien werden dann als p-y-Kurven bezeichnet. Dabei werden für dieses halbempirische Verfahren frühere Pfahltests herangezogen, die Vorgehensweise erfordert vergleichbare Randbedingungen für Pfahl und Baugrund. Einen anderen Weg gehen Norris (1986) und Ashour (2000) mit dem sogenannten Strain-Wedge-Modell, welches theoretisch begründete Pfahlverschiebungen bzw. Federkennlinien liefert. Dieses Modell auf Basis eines sich ausbildenden homogenen

Erddruckkeils wurde erweitert und erlaubt nun die Bezugnahme auf die zyklische Festigkeit durch Berücksichtigung einer bestimmten akkumulierten Dehnung, siehe *Richwien et al. (2006)*. Diese wird einem zyklischen Triaxialversuch entnommen und hängt direkt von der vorangegangenen zyklischen Belastung ab. Die Festigkeit des Bodens und somit die gesamte Geometrie des Dehnungskeils verändern sich dabei mit fortschreitender Belastung. Die Bilder 4 und 5 zeigen exemplarisch erste Berechnungen, in denen mit Hilfe des Strain-Wedge-Modells unter Hinzuziehung zyklischer Elementversuche die Pfahlkopfverschiebungen prognostiziert werden. Jedoch bleiben gerade bei besonders großen Zyklenzahlen Fragen offen, die, wie auch die Generierung von Porenwasserüberdrücken, Spaltbildung im oberen Kontaktbereich oder Auskolkung, nur durch Messungen an gebauten Monopile-Gründungen geklärt werden können.

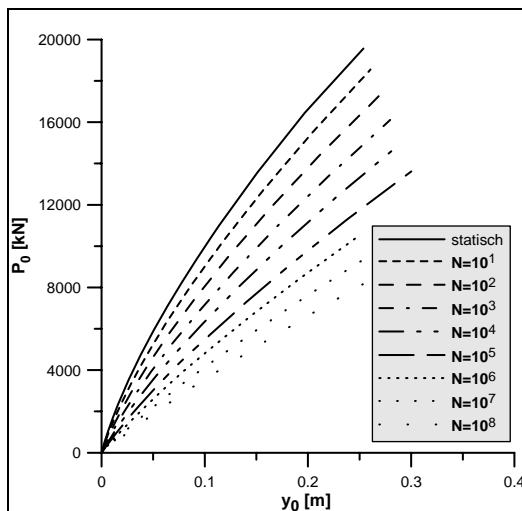


Bild 4: Horizontalbelastung über Pfahlkopfverschiebung

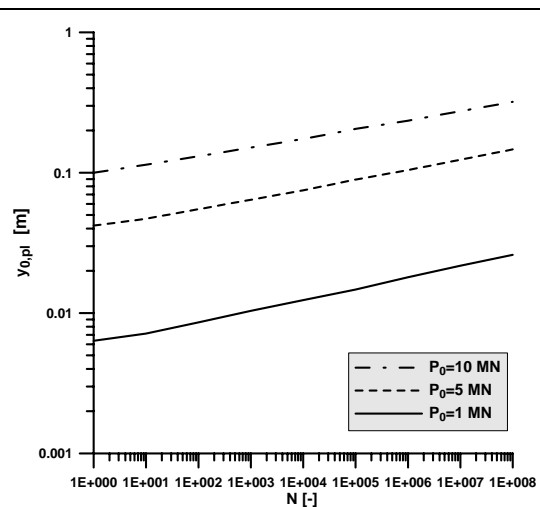


Bild 5: Pfahlkopfverschiebung über Zyklenzahl

Literatur:

API (2000): Recommended Practice for Planning, Design and Construction Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. American Petroleum Institute, Washington D.C.: API Publishing Services.

Ashour, M., Norris, G. (2000): Modelling Lateral Soil-Pile Response based on Soil-Pile Interaction, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, May 2000.

Gottschol, A. (2002): Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung, Heft 12, Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel.

Norris, G. (1986): Theoretically Based BEF Laterally Loaded Pile Analysis, 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore piling, Nantes.

Richwien, W., Lesny, K. und Hinz, P. (2006): Kapitel Tragstruktur – Gründung, Validierung bautechnischer Bemessungsmethoden für Offshore-Windenergieanlagen, Gigawindplus-Jahresbericht 2005.