

Vorgehensweise bei der FE-Analyse von Monopiles unter hohen Zyklenzahlen

Dipl.-Ing. Peter Hinz

Dr.-Ing. Kerstin Lesny

Prof. Dr.-Ing. Werner Richwien

Universität Duisburg-Essen

Institut für Grundbau und Bodenmechanik

Universitätsstr. 15

Fon: ++49 201 183-4505

Fax: ++49 201 183-2870

E-mail: peter.hinz@uni-due.de

Internet: www.uni-essen.de/grundbau

1 FE-Analyse von Monopiles

1.1 Pfahlverhalten unter zyklischer Horizontalbeanspruchung

Zyklische Horizontalbeanspruchungen von Monopiles können zu akkumulierten plastischen Dehnungen im Boden und unter Umständen zu unzulässigen Verformungen und Schiefstellungen führen. Im Nahfeld des Monopiles existieren in Pfahlkopfnähe kritische Bereiche mit großen Spannungsänderungen bei verhältnismäßig kleinem geostatischen Spannungsniveau, siehe Abbildung 1. In größeren Tiefen dagegen hat die zyklische Belastung wegen des abnehmenden Anteils der veränderlichen Spannungen bei gleichzeitig wachsender geostatischer Auflastspannung einen eher geringen Einfluss. Ist der Monopile ausreichend dimensioniert, bleiben die akkumulierten Verformungen innerhalb eines zulässigen Toleranzbereichs. Dann tritt eine Stabilisierung des Systems ein, bei dem der Verformungszuwachs über die Nutzungsdauer kleiner werden oder vollständig abklingen.

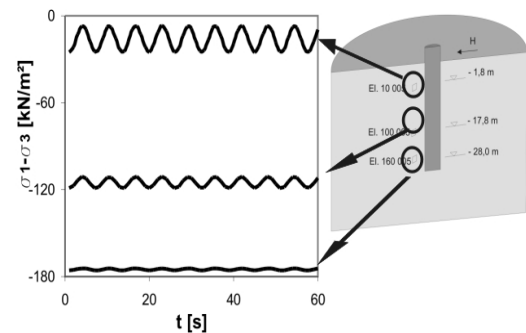


Abb. 1: Spannungsverhältnisse am Monopile

1.2 Möglichkeiten zur Berücksichtigung einer zyklischen Beanspruchung

Bisherige numerische Untersuchungen von Gründungen unter zeitlich veränderlicher Belastung erfassen oft nur geringe Zyklenzahlen auf der Basis inkrementeller Stoffansätze, bei denen neben den elastischen Dehnungen auch der plastische Dehnungszuwachs für jeden Zyklus berechnet wird, siehe Abbildung 2a. Selbst wenn es die Computerleistung erlauben würde, auf diese rechenintensive, implizite Weise einen Monopile über eine Lebensdauer von einigen Jahren numerisch abzubilden, so stellt die erreichbare Genauigkeit der FE-Berechnung ein Problem dar. Da diese Ergebnisse stets Näherungslösungen sind, summieren sich systematische Fehler durch vereinfachende Modellannahmen oder numerische Lösungsverfahren auf, die unter monotoner Belastung normalerweise vernachlässigbar sind. Das Rechenergebnis wäre mit Unsicherheiten behaftet.

Um das Langzeitverhalten von Böden zu untersuchen, sind daher explizite Stoffansätze (Abbildung 2b) erforderlich. Im Gegensatz zu den impliziten Stoffansätzen wird die Akkumulation der plastischen Dehnung über ein empirisches Modell explizit abgebildet. Derartige Stoffgesetze wurden von GOTSCHOL (2002) und WICHTMANN (2005) entwickelt. Für die Verformungsberechnung eines Monopiles nach beliebiger Zeit sind diese Ansätze jedoch noch nicht geprüft worden. Wünschenswert wäre eine geschlossene FE-Analyse, die jedoch nicht ohne Weiteres möglich ist. Deshalb wird eine ingenieurpraktische Vorgehensweise vorgeschlagen, mit der die numerische Analyse des Tragverhaltens unter hoher Zyklenzahl

durchgeführt werden kann. Die Berechnung mit diesem Ansatz entspricht grundsätzlich der eines monoton beanspruchten Monopiles, wobei jedoch berücksichtigt wird, dass die Bodeneigenschaften von der Zyklenzahl und der Größe der Belastung beeinflusst werden.

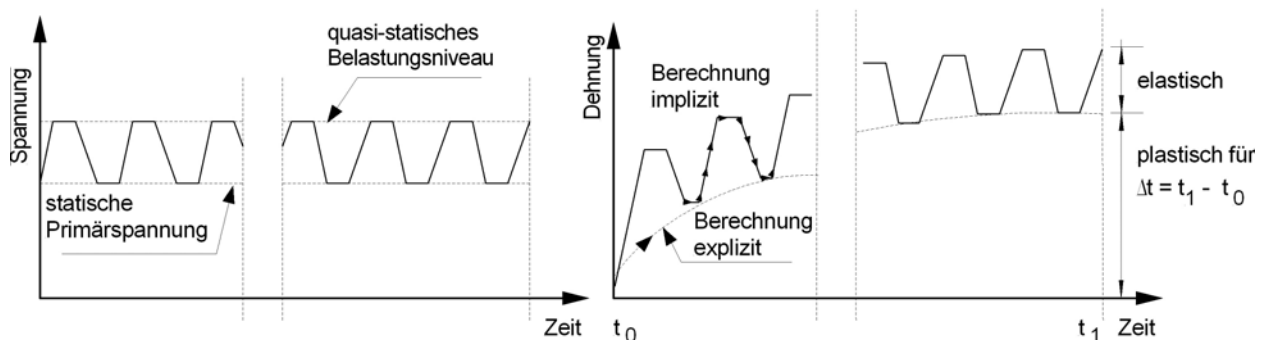


Abb. 2: Impliziter und expliziter Berechnungsansatz

2 Vorgeschlagener Berechnungsgang

Um die Verformungen eines Monopiles über seine Lebensdauer zu ermitteln, wird eine Vorgehensweise angestrebt, die alle relevanten Parameter enthält und gleichzeitig ingenieurpraktisch anwendbar ist. Für die FE-Berechnung eines Monopiles unter hohen Zyklenzahlen bedeutet dies:

- 1.) Ermittlung der Belastungsverhältnisse (für Seegang: Wellenverteilungsdiagramm und Wellenhöhenüberschreitungsdiagramm)
- 2.) Berechnung der auftretenden Spannungsverhältnisse im Nahfeld des Monopiles (1. FE-Analyse, Bodenspannungen z.B. in Abhängigkeit von der Wellenhöhe)
- 3.) Bestimmung der zyklischen Tragfähigkeit des Bodens mit Hilfe von zyklischen Elementversuchen für die vorher unter Pkt. 2.) ermittelten Spannungsverhältnisse
- 4.) Ermittlung der Teilverformungen je Belastungsstufe und der Gesamtverformung unter der angestrebten Lebensdauer für die Bodenprobe (Element) unter Annahme der konsequenten Form der Miner-Regel
- 5.) Berechnung des Monopiles mit angepassten Bodeneigenschaften (2.FE-Analyse)

Die unter Pkt. 3.) notwendigen bodenmechanischen Laborversuche zur Bestimmung der zyklischen Festigkeit und die Ermittlung der Teil- und Gesamtverformungen für die angestrebte Lebensdauer unter Pkt. 4.) werden im Folgenden nicht erläutert. Sie sind u. a. Gegenstand des Hauptbeitrages.

3 Modellierung des Systems

3.1 Grundlagen der Modellierung

Grundsätzlich sind für die Erstellung des FE-Modells die Geometrie, die Randbedingungen und das Materialverhalten zu formulieren. Je nach Modellierungsaufwand und Fragestellung kann der schwerpunktmäßigen Bearbeitung dieser Parameter unterschiedliche Bedeutung zukommen. Die Erfassung der Belastung und die Abbildung des Materialverhaltens stellen jedoch die wichtigsten Punkte dar.

3.2 Ermittlung der Belastung

Wegen der stochastischen Einwirkungen ist es nicht ohne Weiteres möglich, die Belastung in Größe und Abfolge vorherzusagen. Es stehen aber für den Seegang Wellenverteilungsdiagramme zur Verfügung, aus denen die Häufigkeiten von zu erwartenden Wellenhöhenüberschreitungen für Langzeitbetrachtungen berechnet werden können, siehe Abbildung 3.

Somit ist es zumindest für die Wellen möglich, die Belastung eines Monopiles mit zugehöriger Zyklenzahl anzugeben. Der Einfluss veränderlicher Wind- und Strömungskräfte auf die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen muss noch entsprechend untersucht werden.

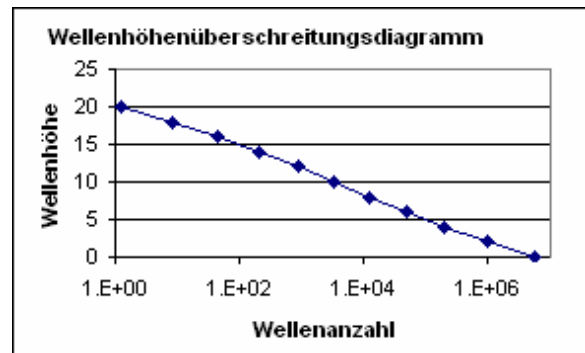


Abb. 3: Wellenhöhenüberschreitungen für die Nordsee ($T=1$ a)

3.3 Berechnung der auftretenden Spannungen im Boden

Durch die FE-Analyse kann das Spannungs- und Dehnungsniveau des Bodens im Nahfeld des Monopiles relativ genau berechnet werden. Die dabei berechneten Spannungen sind vom verwendeten Stoffgesetz abhängig. Für die hier durchgeführten grundsätzlichen Untersuchungen, die relativ zueinander verglichen werden, ist ein elastisch-plastisches Stoffgesetz mit einer Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb geeignet. Die Steifigkeit wird mit der Tiefe linear zunehmend modelliert.

Die Auswertung der numerischen Berechnung liefert direkt die Spannungszustände im Boden. Führt man diese Berechnung für verschiedene Einwirkungen durch, so lässt sich eine Bandbreite der Bodenbeanspruchung in Abhängigkeit dieser Einwirkung angeben. Ausgangswerte für die Belastung bilden hier z.B. die ermittelten Wellenhöhen aus dem Wellenhöhenüberschreitungsdiagramm. Es wird nun für jede Wellenhöhe mit zugehöriger Belastung die Systemantwort unter quasi-statischen Verhältnissen berechnet.

In Abbildung 4 sind die Spannungsänderungen im Boden aufgetragen, wobei die zugehörige Zyklenzahl der Auftretenswahrscheinlichkeit einer Wellenhöhe entspricht. Die größeren Spannungsänderungen werden durch wenige große Wellen und die kleineren Spannungsänderungen durch viele kleine Wellen verursacht. In Abbildung 5 erkennbar sind die mit zunehmender Tiefe wachsenden geostatischen Auflastspannungen, gekennzeichnet durch den zunehmenden hydrostatischen Spannungsanteil p und die Spannungszuwächse infolge der Horizontalbeanspruchung, gekennzeichnet durch eine zunehmende Hauptspannungsdifferenz q . Unberücksichtigt bleibt dabei die auftretende Rotation der Hauptspannungen. Deren Einfluss wird vorerst vernachlässigt, weil sie in bodenmechanischen Elementversuchen nur mit einer sehr komplexen Versuchstechnik abgebildet werden kann und die Effekte durch die Akkumulation plastischer Dehnungen auch so berücksichtigt werden können.

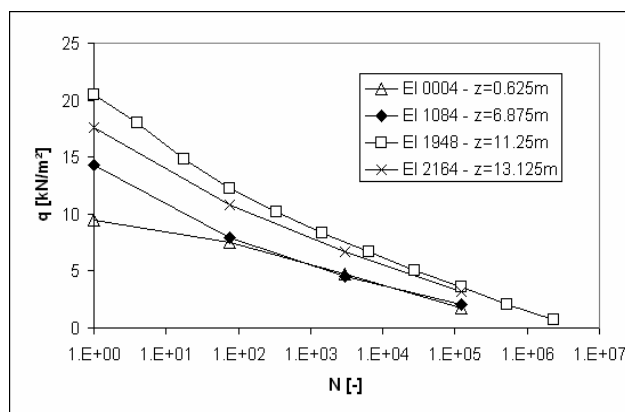


Abb. 4: Spannungsänderungen einer FE-Berechnung in verschiedenen Bodentiefen (Pfahllänge =35 m, D=6 m)

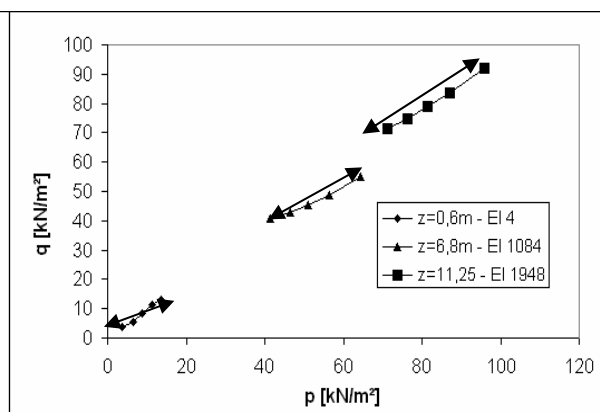


Abb. 5: Spannungsverhältnisse in Abhängigkeit von der Zyklenzahl über verschiedene Tiefen

Zu Abbildung 4 gehört die Tabelle 1, aus der neben dem Betrag von hydrostatischer und Deviatorspannung auch die Spannungsänderung einschließlich Zyklenzahl für den Ort der maximalen Bettungsspannung hervorgeht. Mit zunehmender Wellenhöhe H wachsen die Spannungsänderungen an. Mit diesen Werten werden die Randbedingungen eingegrenzt, die in zyklischen Elementversuchen zu berücksichtigen sind, siehe auch dazu unseren Hauptbeitrag (Lesny et al., 2007).

Tab. 1: Spannungsverhältnisse am Ort des max. Bodenwiderstands ($T=1a$)

Stufe [i]	H [m]	N [-]	p [kN/m ²]	$\sigma_3 - \sigma_1$ [kN/m ²]	$\Delta(\sigma_3 - \sigma_1)$ [kN/m ²]
0	0	(Ausgangszustand)	71,2	71,3	0
1	1	2.519.666	72,2	71,9	0,67
2	3	1.782.403	74,3	73,4	2,1
3	5	408.046	76,4	74,9	3,6
4	7	93.414	78,3	76,3	5,1
5	9	21.385	80,3	77,9	6,6
6	11	4.896	82,3	79,6	8,3
7	13	1.121	84,5	81,4	10,1
8	15	257	87,1	83,6	12,2
9	17	59	89,7	86,0	14,8
10	19	13	93,2	89,3	18,0
11	20,2	1	95,9	91,9	20,5

3.4 Berechnung des Monopiles mit angepassten Bodeneigenschaften

Unter Anwendung der konsequenten Form der Miner-Regel kann die Zyklenzahl ermittelt werden, die notwendig ist, um an einem Bodenelement unter einer bestimmten Spannungsänderung ein vorher definiertes Verformungskriterium zu erfüllen. Liegt diese Zyklenzahl über der zu erwartenden Zyklenzahl, dann können die Verformungen des Monopiles berechnet werden. Dazu wird der ideale Elastizitätsmodul (Abbildung 6) direkt aus triaxialen Mehrstufenversuchen abgeleitet, mit dem in einem zweiten Durchlauf der nun angepassten FE-Berechnung die Systemverformungen ermittelt werden können. Dabei bildet die Abminderung des Elastizitätsmoduls als einzige Größe der fünf Stoffparameter des elastisch-plastischen Stoffgesetzes den gesamten Einfluss der zyklischen Belastung ab. Durch die angepasste Steifigkeit im Pfahlkopfbereich wachsen die Verformungen weiter an, siehe Abbildung 7. Die so erhaltene Antwort spiegelt das Verhalten der Gründung über die Lebensdauer wider und führt zu mit der Zyklenzahl bzw. Zeit anwachsenden Verformungen unter der Berücksichtigung der Wellenverteilung. Zusätzlich sind die Verformungsbereiche eingezeichnet, die sich ergeben können, wenn das maximale Spannungsniveau am Pfahl um ± 10 bis ± 20 % abweicht. Prinzipiell muss bei jeder Berechnung, eine genaue Prüfung der Eingangswerte und des Ergebnisses auf Plausibilität sowie optimalerweise eine Prüfung durch Gegenüberstellen eines zweiten Berechnungsverfahrens erfolgen.

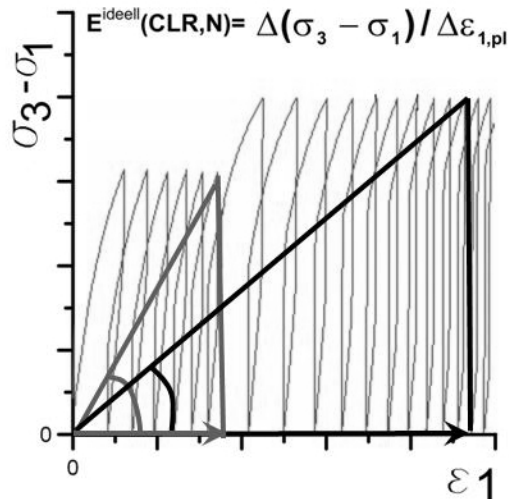


Abb. 6: Definition des ideellen Elastizitätsmoduls

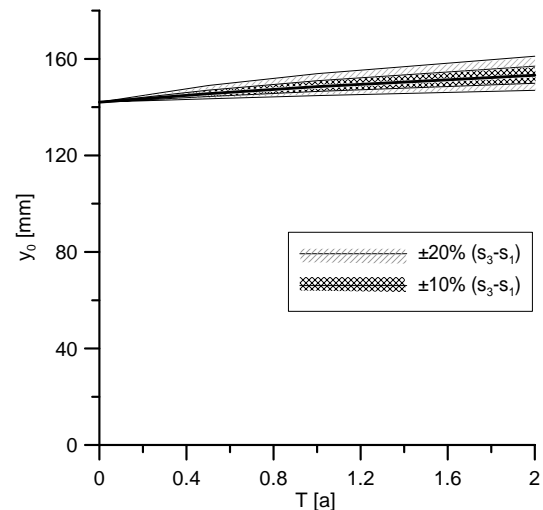


Abb. 7: Pfahlkopfverschiebung unter Wellenbelastung

Literatur:

Gotschol, A.: Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung, Schriftenreihe des Fachgebietes Geotechnik, Universität Kassel, Heft 12, 2002.

Lesny, K., Richwien, W., Hinz, P.: Bemessung von Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen, Hauptbeitrag zum Gigawind-Symposium, Hannover, 2007.

Wichtmann, T.: Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 38, 2005.