

**37. Duisburger Kolloquium
Schiffstechnik / Meerestechnik**

**Das Schiff, die Offshore-Anlagen und die
Digitalisierung**
Ships, Offshore Structures and Digitization

9. und 10. Juni 2016

**Universität Duisburg-Essen und
Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.**

**Effizienter Einsatz
dynamischer Probelastungen an Rammpfählen von
offshore Konstruktionen – Planung und Praxis**

Dr.-Ing. Matthias Schallert

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller

GSP Gesellschaft für
Schwingungsuntersuchungen
und dynamische Prüfmethoden
mbH

GSP · Steubenstr. 46 · 68163 Mannheim · Tel. 0621 33 13 61 · FAX 0621 34 35 8
ok@gsp-mannheim.de, ms@gsp-mannheim.de www.gsp-mannheim.de

Inhalt

1 Einleitung

2 Grundlagen der dynamischen Probelastung - High-strain Methode

- 2.1 Prinzip, Messtechnik, Ergebnisse
- 2.2 Normung und Richtlinien
- 2.3 Qualifikation der Prüfinstitute und des Prüfpersonals

3 Monitoring der Pfahlrammung für Offshore-Konstruktionen

- 3.1 Anforderungen an Planung und Durchführung
- 3.2 Herausforderung Offshore-Baustelle, Beispiele

4 Fazit

Literatur zum Thema

1 Einleitung

Die dynamische Pfahlprobelastung wird weltweit seit vielen Jahren zum Nachweis der axialen Pfahltragfähigkeit eingesetzt, ist in vielen Ländern in Normung und Richtlinien aufgenommen und gilt als Stand der Technik für die Qualitätssicherung von Pfählen. Das Verfahren ist an Land, im Hafenaufbau und küstennahen Gebieten sowie offshore bei der Rammung von Gründungspfählen von Plattformen der Öl- und Gasindustrie sowie seit einigen Jahren auch von Gründungen von Windenergieanlagen und Umspannplattformen in Nord- und Ostsee herkömmliche Praxis.

Der Beitrag beschreibt die Möglichkeiten der dynamischen Pfahlprobelastung und auf der Grundlage der Erfahrungen der vergangenen Jahre, die Besonderheiten und Herausforderungen für dessen Anwendung offshore.

2 Grundlagen der dynamischen Probelastung - High-strain Methode

2.1 Prinzip, Messtechnik, Ergebnisse

Durchführung und Auswertemethoden der dynamischen Probelastung sind für Deutschland ausführlich in EA-Pfähle (2012) beschrieben. Die Erfahrungen der letzten 40 Jahre mit dem Verfahren für allen Arten von Pfählen bezüglich der Anwendung der eindimensionalen Wellentheorie sowie eine Vielzahl von Fallstudien wurden u.a. auf der Baugrundtagung, den Pfahl-Symposien der TU Braunschweig und den 4-jährlich stattfindenden Spezialkonferenzen „Application of Stress Wave Theory to Piles“ präsentiert. Die wesentlichen Grundlagen sind in kurzer Form in diesem Abschnitt beschrieben.

Für den Nachweis der axialen Tragfähigkeit von Pfählen ist es erforderlich, ein Mehrfaches der Gebrauchslast als Belastung aufzubringen. Derart hohe Kräfte entstehen z.B. beim Auftreffen einer bewegten Masse auf einen Gegenstand. Dieser Effekt wird beim Rammen und bei der dynamischen Probelastung von Pfählen genutzt.

Zur Zeit des Auftreffens des Rammhämmers auf der Pfahloberfläche wird lediglich der Pfahlkopf bewegt. Diese Bewegung wird durch die elastischen Eigenschaften des Pfahles als Stoßwelle an die tiefer liegenden Pfahlbereiche weitergegeben. Die Welle wandert durch den Pfahl und wird am Pfahlfuß reflektiert. Nach einer gewissen Zeit (einige tausendstel Sekunden) trifft die reflektierte Stoßwelle am Pfahlkopf ein. Solange der Pfahl nicht in einen Boden eingebunden ist, ist die Geschwindigkeit $v(t)$ an der Kontaktfläche der Pfahlkopfkraft $F(t)$ proportional:

$$F(t) = (EA / c) * v(t)$$

E : Elastizitätsmodul des Pfahlmaterials,

A : Querschnittsfläche,

c : Wellengeschwindigkeit, $c = (E/\rho)^{1/2}$.

Der Proportionalitätsfaktor EA/c (Impedanz Z) ist ein Maß für den dynamischen Gesamtwiderstand des Pfahles. Die Pfahlkopfkraft ergibt sich aus Messung der Dehnungen und Multiplikation mit dem Elastizitätsmodul E und der Querschnittsfläche A im Messquerschnitt:

$$F(t) = \varepsilon(t) \cdot E \cdot A.$$

Die Pfahlkopfgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Zeitintegral der gemessenen Beschleunigung:

$$v = \int a \, dt.$$

Durch eine weitere Integration wird die Verschiebung des Pfahlkopfes bestimmt. Der Endwert der Verschiebung nach Abschluss des Stoßvorgangs kann als bleibende Setzung mit konventionellen Mitteln (Nivellement o.ä.) kontrolliert werden.

Die in den Pfahl eingeleitete Energie ergibt sich als Zeitintegral über die Kraft und Geschwindigkeit:

$$E(t) = \int F(t) \cdot v(t) \, dt.$$

Der Maximalwert dieser übertragenen Energie ist wegen Energieverlusten in der Rammhaube bzw. im Rammfutter geringer als die potentielle Energie des Rammgeräts.

Bei der dynamischen Probelastung wird die Pfahltragfähigkeit getrennt nach Mantelreibung und Spitzendruck bestimmt. Die Wirkung der Mantelreibung setzt der durch den Stoß verursachten Bewegung des Pfahls einen Widerstand entgegen. Die Geschwindigkeit des Pfahles reduziert sich und wird geringer als die der Kraft proportionale Geschwindigkeit. Diese Verlangsamung verursacht Teilreflexionen der Welle, Refraktionen, die am Pfahlkopf als eine Abweichung der Normalkraft und der Geschwindigkeit von der Proportionalität festgestellt werden.

Diese Abweichungen geben an, wie stark der Pfahl eingebunden und wie groß der diese Abweichung verursachende Widerstand am Pfahlmantel ist. Ein Teil der Welle wandert weiter bis zum Pfahlfuß. Die Reflexion der Welle am Pfahlfuß ist abhängig von der Größe der Pfahlfußbewegung und dem durch die Bewegung hervorgerufenen Spitzenwiderstand.

Messtechnik

Ein wesentlicher Parameter zur Festlegung der erforderlichen Messtechnik ist die Art der Pfahlinstallation, oberhalb und / oder unterhalb des Wasserspiegels.

Bei Unterwasserrammung sind Kabelverbindungen von den einzelnen Sensoren zum Messgerät zur Datenübertragung erforderlich. Bei Rammung oberhalb der Wasserlinie kann auf Funktechnik zur Datenübertragung zurückgegriffen werden. Bild 1 zeigt dafür die am Pfahl instrumentierte Messtechnik mit Dehnungs-, Beschleunigungssensor und kabelloser Datenübertragungsbox (links), installiert an einer Pfahlkopfseite (Mitte) sowie ein Messgerät (Pile Driving Analyzer) zur Steuerung und Speicherung der Messung (rechts) während des Monitoring der „Überwasser“-Rammung im OWP Bard Offshore 1. In der Regel werden die Messgrößen jedes einzelnen Rammschlags aufge-

zeichnet. Diese sowie daraus abgeleitete Parameter werden in Echtzeit auf dem Monitor visualisiert. Auf diese Weise ließ sich der gesamte Rammvorgang überwachen.



Bild 1: Sensoren und Sendeeinheit (links und Mitte), Messgerät mit Empfängereinheit und Sensoren am Pfahl während des Monitoring der „Überwasser“-Rammung im OWP Bard Offshore 1 (rechts)

Für das Monitoring der Rammung unter Wasser kommen im Vergleich zur „Überwasser“-Rammung spezielle wasserdichte Sensoren und Messkabel zum Einsatz, die für unterschiedliche Wassertiefen ausgelegt sind. Die einzelnen Sensoren werden am Pfahl mit entsprechenden Steckverbindungen mit einem Hauptmesskabel verbunden, das die Datenübertragung von den Sensoren zur Messstation auf dem Installationsschiff gewährleistet. Dieses Kabel ist mit einer Zugsicherung ausgestattet, so dass auch bei den Strömungs- und Wellenverhältnissen in der Nordsee eine sichere Datenübertragung möglich ist.

Beim Monitoring unter Wasser sind je nach projektspezifischen Gegebenheiten evtl. besondere Maßnahmen zum Schutz der Kabelverbindungen und zur sicheren Kabelführung erforderlich, um deren Beschädigung bei Pfahlaufnahme und -installation zu vermeiden. Bild 2 zeigt Sensoren für das Monitoring unter Wasser.



Bild 2: Dehnungs- und Beschleunigungssensoren (links) für Messung bis in große Wassertiefen, Verbindung zum Hauptmesskabel mit Zugsicherung (Mitte), nach erforderlicher Länge konfigurierbares Messkabel von den Sensoren am Pfahl zur Messstation (rechts)

Ergebnisse

Die Messungen von Dehnung und Beschleunigung am Pfahlkopf während des Rammens und die Auswertung durch vollständige Modellbildung ermöglichen im Einzelnen die Bestimmung:

- der Spannungen im Pfahl,
- des tatsächlichen Energieeintrags in den Pfahl,
- des statischen und dynamischen axialen Rammwiderstandes,
- der statischen Tragfähigkeit getrennt nach Mantelreibung und Spitzendruck,
- der Mantelreibungsverteilung über die Tiefe,
- der Zunahme der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Eindringung.

Für die Auswertung werden bei homogenen Pfahleigenschaften die direkte CASE-Methode im Allgemeinen jedoch für alle Pfahlarten das erweiterte Auswertungsverfahren („CAPWAP“-Verfahren, Case Pile Wave Analysis Program) mit vollständiger Modellbildung des Pfahls im Boden, Systemidentifikation, expliziter Bestimmung des dynamischen Anteils am Pfahlwiderstand und Simulation der statischen Probelastung verwendet. Die Richtigkeit der Ergebnisse nach der CAPWAP - Methode konnte in zahlreichen Vergleichen mit statischen Probelastungen nachgewiesen werden. Bild 3 zeigt ein Beispiel für eine Messung und Bild 4 einen Ergebnisausdruck einer CAPWAP-Auswertung.

Mit Ergebnissen weiterer CAPWAP-Analysen bei verschiedenen Einbindetiefen und unter Berücksichtigung der mehraxialen Belastung, d.h. einer ausreichenden horizontalen Tragfähigkeit, wird eine mögliche Optimierung des Pfahldesigns für zukünftige WEA-Standorte bei vergleichbaren Baugrundeigenschaften geprüft. Dies kann eine erhebliche Kosteneinsparung zur Folge haben.

Durch die Messung von Dehnung und Beschleunigung am Pfahlkopf während der dynamischen Probelastung werden zusätzlich die Beanspruchung der Pfähle und die eingeleitete Energie erfasst. Dadurch lassen sich während des gesamten Rammvorgangs die Funktionalität des Rammsystems und die zulässigen Spannungen im Pfahl in Echtzeit überwachen. Bei Stahlpfählen dürfen die maximalen Spannungen beim Rammen 90% der charakteristischen Streckgrenze des Stahls nicht überschreiten (DIN EN 12699). Der Rammvorgang kann somit durch die Messung optimiert und das Entstehen von Pfahlschäden vermieden werden.

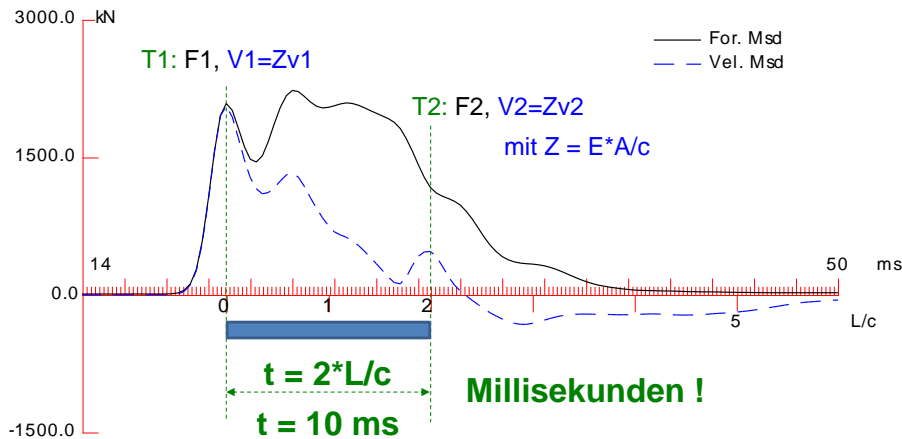


Bild 3: Dynamische Probelastung, Zeitverlauf von Kraft F und Geschwindigkeit V am Pfahlkopf

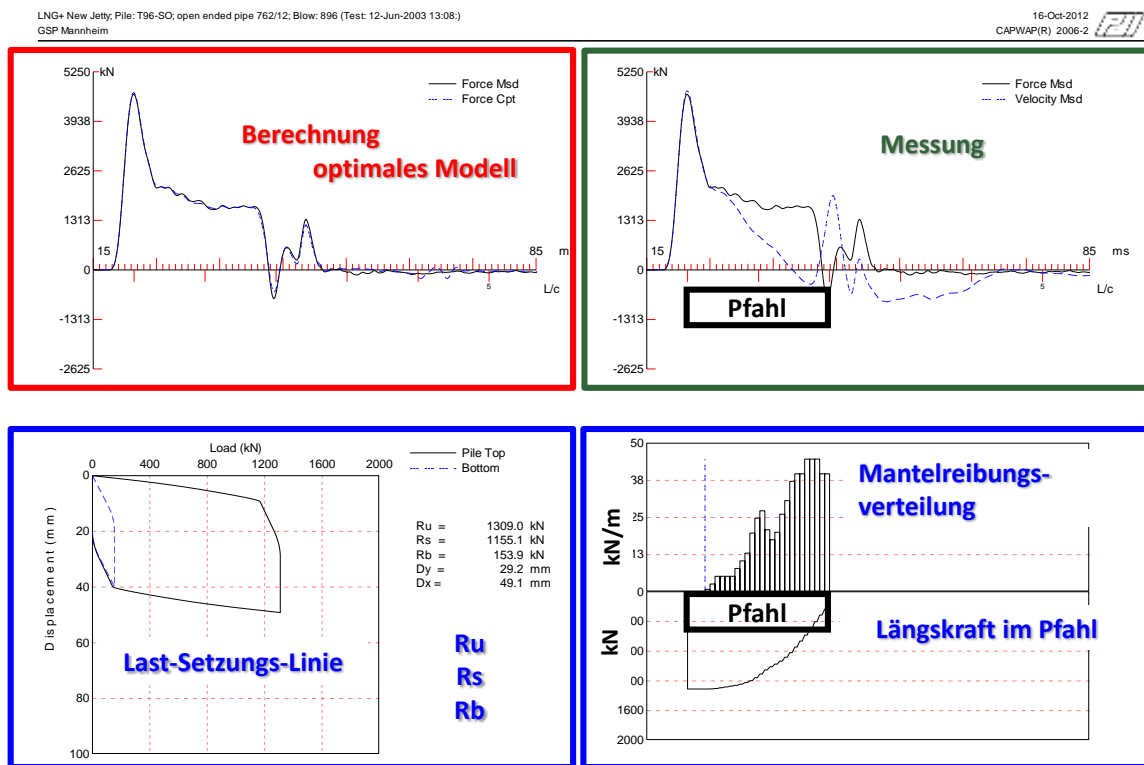


Bild 4: Dynamische Probelastung, Ergebnisse der CAPWAP-Auswertung

2.2 Normung und Richtlinien

Für den Entwurf, die Berechnung und Bemessung in der Geotechnik gilt europäisch und national in Deutschland DIN EN 1997-1:2009-09 (Eurocode EC 7-1) in Verbindung mit der DIN 1054:2010-12 sowie der DIN EN 1997-1/NA:2010-12. Diese wurden für Deutschland im Normenhandbuch EC7 Geotechnische Bemessung, Band 1: Allgemeine Regeln zu einem einheitlichen nationalen Regelwerk zusammengefasst.

In Bezug auf weitergehende Regelungen zum Entwurf von Pfahlgründungen wird in DIN 1054:2010-12 auf die Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EA-Pfähle 2012) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) verwiesen. Diese 2. Auflage enthält die Kapitel „Dynamische Pfahlprobelastungen“ und „Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen“ und behandelt somit die für die Gründung von OWEA wichtigen Nachweise zum äußeren Tragverhalten unter Berücksichtigung zyklischer Einwirkungen.

In EC7-1 Abschnitt 7.5.1 ist mit Hinweis auf EA-Pfähle 2012 festgelegt, wann und warum Probebelastungen an Pfählen durchgeführt werden müssen.

Nach den Abschnitten 7.5.3 bzw. 7.6.2.4 können statische axiale Pfahlwiderstände für Druckbelastung auf der Grundlage von Stoßbelastungen ermittelt werden. Die DIN 1054:2010-12 unterscheidet bei der Ermittlung des Druckwiderstandes von Pfählen Stoßversuche und dynamische Probebelastungen. Die in diesem Beitrag beschriebenen dynamischen Pfahlprobelastungen sind Verfahren zur Bestimmung des axialen statischen Widerstandes mit zeitabhängiger Messung von Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf während einer Stoßbelastung von wenigen Millisekunden Dauer.

Allgemein ist die Anzahl der dynamischen Pfahlprobelastungen unter Berücksichtigung der durch den EC7-1 vorgegebenen Mindestanzahl von 2 Probebelastungen pro Pfahltyp und Baugrundhomogenbereich projekt- und baugrundbezogen vom geotechnischen Fachplaner festzulegen. Danach richtet sich der nach EC7-1 und DIN 1054:2010-12 anzusetzende Streuungsfaktor ξ zur Ableitung der charakteristischen Pfahlwiderstände aus den Messwerten der dynamischen Probebelastungen.

Mit den Anwendungshinweisen des BSH (2011, 2012) für den Standard „Konstruktion“ wurden die Regelungen in den genannten Normen und Richtlinien in das Nachweisverfahren für OWEA für die Anwendung in der AWZ gemäß BSH-Standard „Konstruktion“ eingegliedert. Für dynamische Pfahlprobelastungen an Gründungspfählen für OWEA gelten nach BSH, 2012 folgende Regelungen:

1. Für die Gründung von OWEA mit überwiegend axial belasteten Pfählen **sind dynamische Pfahlprobelastungen als Tragfähigkeitsnachweis in axialer Richtung vorzusehen.**
2. Anzahl und Orte der Probebelastungen sind vom geotechnischen Fachplaner mit Bezug auf die EA-Pfähle festzulegen.

3. Die Probelastungen sind jedoch **an mindestens 10 % der WEA-Standorte** durchzuführen.
4. Die Probelastungen sind **mindestens an zwei Standorten jedes geotechnischen Standorttyps** in dem Windparkareal durchzuführen.
5. Das Konzept für die dynamischen Pfahlprobelastungen, einzureichen zur 2. Freigabe, soll Art und Umfang der geplanten Probelastungen sowie **die Art der Ergebnisübertragung auf das gesamte Baufeld** enthalten.
6. Die Durchführung dynamischer Pfahlprobelastungen erfolgt in der ersten Bauphase.
7. Zur Berücksichtigung **zeitlicher Änderungen der Tragfähigkeit** nach der Pfahlinstallation sind im Tragfähigkeitsnachweis Nachrammungen als dynamische Pfahlprobelastungen **(Restrike-Tests) in ausreichender Anzahl vorzusehen und durchzuführen.**

Darüber hinaus ist der Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung der Besonderheiten zyklischer Einwirkungen (EA-Pfähle 2012, Kap. 13) zu erbringen (BSH, 2012). Für diese Nachweise ist die genaue Kenntnis der statischen axialen Tragfähigkeit, bestimmt durch dynamische Probelastungen, von großer Bedeutung.

Das Ergebnis einer dynamischen Pfahlprobelastung ist der Messwert des Pfahlwiderstands (R_u , $R_{c,m}$). Zur Ableitung von charakteristischen Pfahlwiderständen $R_{c,k}$ aus den Messwerten sind gemäß Normenhandbuch EC 7-1 Streuungsfaktoren anzuwenden.

DIN 1054:2005 geht davon aus, dass die Gleichwertigkeit von dynamischen mit statischen Probelastungen nachgewiesen wird. Je nachdem, ob dies durch den direkten Vergleich bei derselben oder an einer vergleichbaren Baumaßnahme oder durch Vergleich des Ergebnisses einer dynamischen mit einer statischen Probelastung aufgrund von Erfahrungswerten geschieht, sind die Streuungsfaktoren mit unterschiedlichen Zuschlägen zu versehen. Die höchsten Zuschläge sind im zuletzt genannten Fall anzuwenden.

Durch die Neufassung der DIN 1054 als Nationales Anwendungsdokument für die Einführung des EC7 in Deutschland wird das Konzept der DIN 1054-2005 auch weiterhin zugelassen. Allerdings würde der Fall, dass keine statischen Probelastungen zur Kalibrierung vorliegen, zu einer erheblichen Erhöhung der erforderlichen Widerstandsfaktoren führen. Dies ist für Stahlpfähle, die in dicht gelagerte Sande gerammt werden, nicht gerechtfertigt.

Für Offshore WEA dürfen die Streuungsfaktoren deshalb bei überwiegend nichtbindigen Böden im Bereich der tragfähigen Schichten für den Fall „Kalibrierung der dynamischen Pfahlprobelastungen an statischen Pfahlprobelastungen an vergleichbaren Baumaßnahmen“ auch dann verwendet werden, wenn auf dem Baufeld der Windenergieanlagen keine statischen Pfahlprobelastungen durchgeführt werden. Dies ist dadurch begründet, dass bei nichtbindigen Baugrundverhältnissen umfangreiche Erfahrungen im Vergleich von dynamischen und statischen Pfahlprobelastungen und damit für diese Böden weitgehend abgesicherte Kalibrierungsfaktoren vorliegen. Außerdem werden für Pfahlgründungen von Offshore-Windenergieanlagen i. d. R. Stahlrohrrammpfähle

verwendet, bei denen Streuungen durch die Pfahlherstellung nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung haben und bei der Pfahleinbringung Rammerberichte erstellt werden, anhand derer jeder einzelne Pfahl quantitativ beurteilt werden kann.

In der Normung ist derzeit nicht geregelt, wie zu verfahren ist, wenn bei der Tragfähigkeitsermittlung die dynamische Probelastung mit vollständiger Modellbildung mit der Auswertung großer Rammerberichte durch Wellengleichungsberechnungen kombiniert wird. Die Vorgehensweise bei Wellengleichungsberechnungen von Offshore-Monopiles mit dem Programm GRLWEAP ist z.B. in Rausche/Klingmüller (2005) gegeben. Für diesen Fall könnte z.B. in Anlehnung an das von AASHTO (American Association of State Highway and Transport Organizations, USA) vorgelegte LRFD - Konzept (Load and Resistance Factor Design) verfahren werden.

2.3 Qualifikation der Prüfinstitute und des Prüfpersonals

Gemäß EA-Pfähle 2012

- sind die Probelastungen von Fachpersonal auszuführen und auszuwerten, welches über die erforderliche Sachkunde und Erfahrung verfügt,
- sollte diese erforderliche Sachkunde und Erfahrung in der Durchführung und Auswertung der dynamischen Prüfungen durch regelmäßige Teilnahme an Fortbildungsveranstaltungen zur Thematik auf einen neusten Stand der Technik und ggf. Wissenschaft sichergestellt werden.

Gemäß BSH, 2012

- ist die in EC 7-1:2009-09 und DIN 1054:2010-12 mit Bezug auf die EA-Pfähle geregelte Vorgehensweise bei der Durchführung, Ergebnisauswertung und -interpretation dynamischer Pfahlprobelastungen anzuwenden und zusätzlich wird angegeben, dass
- die Probelastungen **nur von Institutionen mit nachweislicher Erfahrung** auf dem Gebiet der **Testdurchführung und Auswertung** durchzuführen sind.

Damit gehen die Anforderungen des BSH über die nach EA-Pfähle 2012 hinaus. Nach Meinung der Autoren sollten diese Anforderungen wie folgt weitergehend präzisiert werden:

- Die Probelastungen sind von Fachpersonal auszuführen und auszuwerten, welches über die erforderliche Sachkunde und Erfahrung im Umgang mit den Sensoren, Instrumenten und Auswertungs-Methoden mit der zugrunde liegenden Theorie verfügt.
- Die Sachkunde des Fachpersonals ist durch die Teilnahme an Ringversuchen sowie die Supervision der Messberichte zu belegen.
- Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse sollte vom ausführenden und auswertenden Fachpersonal ein geeigneter Qualifikationsnachweis (z.B. Zertifikat von QA-Foundation oder PDCA - Pile Driving Contractors Association) vorgelegt werden können.

Insbesondere bei Auswertung nach dem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung (z.B. CAPWAP) ist zu beachten, dass eine iterative nichtlineare strukturdynamische Berechnung mit den aus der Methode der Finiten Elemente bekannten Einflüssen von Zeitschrittweite und Elementgröße durchzuführen ist. Selbst wenn die verfügbaren Programme scheinbar einfach zu bedienen sind, ist die Komplexität der zu lösenden Aufgaben erheblich. Entsprechend hohe Anforderungen sind an die Qualifikation der Ausführenden und derjenigen zu stellen, die aus dem Messergebnis den Pfahlwiderstand bestimmen.

3 Monitoring der Pfahlrammung für Offshore-Konstruktionen

3.1 Anforderungen an Planung und Durchführung

Die wesentlichen Unterschiede zu den Anforderungen an die Prüfungen onshore oder nearshore ergeben sich aus den besonderen Umgebungs- und Installationsbedingungen offshore. Dazu zählen einerseits, bedingt durch die mehraxiale Belastung und die großen Wassertiefen von teilweise > 40 m, die für die Bewegung der erforderlichen großen Massen benötigten Geräte und Maschinen auf dem jeweiligen Installationsschiff sowie andererseits die bautechnischen Abläufe der Installation und Aspekte der Arbeitssicherheit. Diese sind u.a.

- Art des Transports der Pfähle zum Standort,
- Verhältnisse am Lagerplatz der Pfähle zur Vorbereitung der Messungen,
- Art der Pfahlaufnahme am Standort,
- Konstruktion der dafür erforderlichen Hilfsgeräte und deren geometrische Abmessungen,
- Arbeitstechnische und zeitliche Abläufe zur Installation der Gründungspfähle,
- Art der Pfahlinstallation (Vibrationsrammung, Schlagrammung),
- Rammung oberhalb und / oder unterhalb des Meeresspiegels,
- Aspekte hinsichtlich der Arbeitssicherheit für Arbeiten an Deck des Installationsschiffs, vom Mannkorb oder Hebebühne,
- Art der Sensormontage.

Aus diesen Parametern ergeben sich für die jeweilige Messaufgabe die Art der zu verwendenden Messtechnik und speziell die Details der zuverlässigen Sensormontage und sicheren Kabelführung (Schallert et al. 2011). Aufgrund der unterschiedlichen Gründungsvarianten (Monopile, Tripole, Tripod, Jacket) unterscheiden sich die Konstruktionen der Installationsschiffe, Hebezeuge und die Arbeitsabläufe projektspezifisch, sodass es schwierig ist, allgemeingültige Anforderungen und Konzepte zu definieren.

Generell sollte die Planung der Messungen frühzeitig in den Projektablauf integriert werden, d.h. schon deutlich vor Beginn der Installation. Dies ist entscheidend für die Auswahl der erforderli-

chen Messtechnik und die Planung „reibungsfreier“ Abläufe. Sind die projektbezogenen Randbedingungen definiert, kann ein darauf abgestimmtes Konzept für die Durchführung der Messungen aufgestellt werden.

Bereits in der Planungsphase werden durch Rammbarkeitsberechnungen auf Basis der Wellengleichung das erforderliche Rammgerät, die erwarteten Spannungen im Pfahl sowie die Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Rammschläge ermittelt. Hierzu werden Annahmen für die Krafteinleitung und für das statische und dynamische Bodenverhalten getroffen. Die Messungen beim Rammen ermöglichen die Überprüfung dieser Annahmen.

Der Mindestumfang der durchzuführenden dynamischen Probelastungen für einen Offshore-Windpark in der deutschen AWZ ist in BSH, 2012 (siehe oben, Abschnitt 2.2) definiert. Darüber hinaus kann es hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Gründung, des im Sicherheitskonzept festgelegten, zu erreichenden Sicherheitsniveaus und einer zuverlässigen auf Messung basieren Bestimmung der Vorschädigung der Pfähle durch die Rammung (Lebensdaueranalyse) sinnvoll sein, von diesem Umfang abzuweichen.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der dynamischen Probelastung während des Monitoring der Rammung kann durch wiederholte Messungen beim Nachrammen nach einer gewissen Standzeit der Pfähle nach deren Installation die zeitabhängige Änderung der axialen Tragfähigkeit bestimmt und als Grundlage zur Bestimmung des Sicherheitsniveaus verwendet werden. In nichtbindigen Böden, wie sie an vielen Standorten in der Nordsee angetroffen werden, kann bereits nach einigen Stunden bis wenigen Tagen Standzeit ein nennenswerter Effekt festgestellt werden.

Durch das Monitoring der gesamten Rammung werden je Rammschlag die maximalen Druck- und Zugspannungen im Pfahl genau bestimmt. Diese Werte sind in Betrag und Häufigkeit wesentliche Eingangsgrößen für eine zuverlässige Lebensdaueranalyse, sodass auch das Monitoring der Rammung von überwiegend horizontal und zyklisch belasteten Gründungspfählen (Monopiles) für deren Wirtschaftlichkeit und strukturelle Sicherheit wichtige Informationen liefert.

Darüber hinaus reduziert sich der anzusetzende Streuungsfaktor mit zunehmender Anzahl der Prüfungen.

3.2 Herausforderung Offshore-Baustelle

Die Basis für qualitative gute Messungen als Grundlage einer zuverlässigen Auswertung ist eine detaillierte und frühzeitige Planung aller betroffenen Arbeitsabläufe onshore (z.B. Zugänglichkeit der Pfähle zur Sensormontage an Land) und offshore wichtig. Dafür müssen die Beteiligten frühzeitig auf den Planungsprozess Einfluss nehmen können. Die wesentlichen Aspekte sind:

- Dynamische Pfahlprüfungen sind bei Stahlbaunachweisen zu berücksichtigen, da zur Befestigung von Sensoren Bohrungen anzubringen sind.

- Dynamische Pfahlprüfungen greifen in den Installationsprozess/Rammvorgang ein, da die Sensoren anzubringen sind und bei der Bewegung der instrumentierten Pfähle besondere Sorgfalt geboten ist.
- Üblicherweise befinden sich die Sensoren an der Außenseite und sind mit Kabeln an den Prozessor an Deck des Installationsschiffes angeschlossen. Bei kabelloser Übertragung sollte Sichtkontakt bestehen. Deswegen können die Pfähle mit Sensoren auch nur eingeschränkt in Hülsen oder Anlagen zur Lärminderung gerammt werden. Bei Kabelführung und Unterwasserrammung der Messtechnik durch Führungskonstruktionen ist in besonderem Maße auf Vermeidung von Beschädigungen zu achten.
- Um den geotechnischen Nachweis zu erbringen, muss berücksichtigt werden, dass zum Ende des Einrammens ein anderer Widerstand (static resistance to driving SRD) aktiviert wird als bei Beginn des Nachrammens und dieser sich vom statischen Widerstand möglicherweise unterscheidet. Der Rammprozess, insbesondere in Bezug auf die aufzubringende Energie, muss sich danach richten.
- Ob der Pfahl und die Sensoren für eine Nachrammung zur Verfügung stehen können oder müssen, muss weit im Vorfeld geklärt werden. Die Hammersteuerung muss eine sinnvolle Nachrammung ermöglichen – volle Energie zu Beginn des Nachrammens.

Zum Nachweis der erforderlichen Pfahltragfähigkeiten wäre es sinnvoll, Probepfähle herzustellen, die Wartezeit für Restrike Tests an diesen Probepfählen möglichst lang zu wählen und die Ergebnisse im Pfahldesign der Bauwerkspfähle zu berücksichtigen. Jedoch werden nur in wenigen Fällen Probepfähle hergestellt, die für die Durchführung der Nachrammung ausreichend lange zugänglich gehalten werden können.

Bei der Prüfung von Bauwerkspfählen verlangen die Vorgaben des Planungs- und Installationsprozesses meist eine kurze bis sehr kurze Wartezeit (Bild 5). Es liegt dann im Wesentlichen am zeitlichen Ablauf der Pfahlinstallation und an vertraglichen Aspekten zwischen Installationsunternehmen und Bauherr, wie viel Wartezeit zur Verfügung gestellt werden kann.

Werden keine Probepfähle hergestellt, so sollte zwingend bereits in der Arbeitsvorbereitung darauf geachtet werden, dass Pfähle auch nach einer gewissen Wartezeit für die Prüfung zugänglich bleiben. Dieser Zwang ergibt sich aus der Notwendigkeit der Bestimmung des Festwachs-faktors vor allem dann, wenn der zu erwartende Widerstand am Ende der Rammung für die Nachweisführung nicht ausreichend groß ist. Die Erfahrung zeigt, dass dies kein seltener Fall ist.

Auch die Kosten für den Geräteeinsatz müssen beachtet werden. In der Regel lohnen sich Nachrammungen, solange das Rammgerät auf der Baustelle verfügbar ist. Ein erneutes Anfahren einer Baustelle mit schwerem Rammgerät ist häufig so kostspielig, dass der Ansatz höherer Pfahllasten keinen wirtschaftlichen Vorteil bringt.

Dazu kommt, dass für die Durchführung von dynamischen Probelastungen Sensoren und Kabel am Pfahl derart montiert werden müssen, dass die Messungen auf jeden Fall erfolgreich abgeschlossen werden können. Hierfür muss Zeit und Zugänglichkeit (Bild 6) gegeben sein. Für das Monitoring der Rammung können diese Tätigkeiten bei guter Planung im Vorfeld, guter Koopera-

tion mit den beteiligten Entscheidungsträgern und den praktisch erfahrenen Verantwortlichen i.d.R. ohne Verzögerungen der Installationsprozesse optimal in die Abläufe integriert werden, sodass dafür kein signifikanter Mehraufwand entsteht.

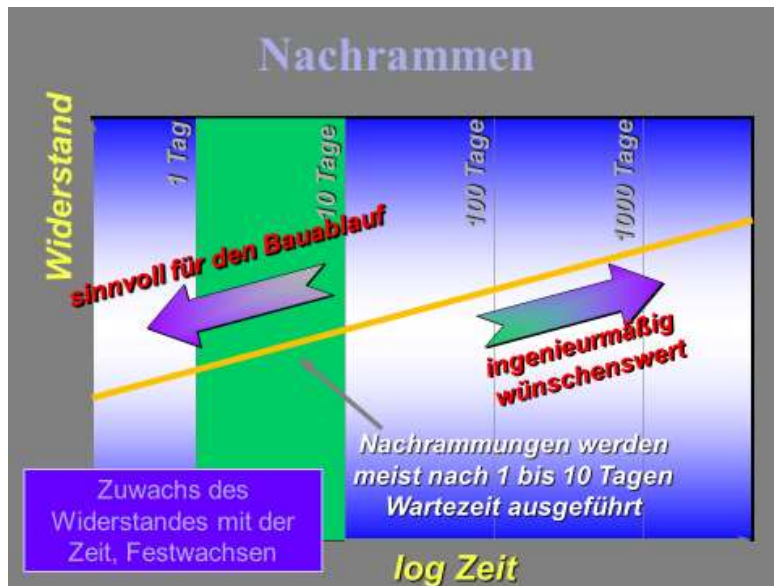


Bild 5: Wirtschaftliche oder sichere Wartezeit (Illustration nach Dr. Julian Seidel)



Bild 6: Zugänglichkeit des Pfahls für die Montage von Sensoren beim Nachrammen
(links: vom schwankenden Boot, rechts: vom Mannkorb)

Leider zeigt die Erfahrung aus der Praxis, dass diese Zusammenhänge oft nicht richtig erkannt werden und dadurch unnötig hohe Kosten entstehen. Ein wesentlicher Punkt ist, dass die Messung nicht rechtzeitig in den Planungsablauf integriert wird, sondern als Maßnahme angesehen wird, mit der man sich später noch beschäftigen kann, wenn alles andere wie z.B. Kauf der Rohre, Chartern des Rammschiffes mit Hammer, Festlegung der Konstruktionen der Pfahlführung zum Ram-

men, etc. geregelt ist. Dies geschieht dann zu einem Zeitpunkt, zu dem aus messtechnischer Sicht nur noch wenig oder nicht mehr geplant sondern nur noch reagiert werden kann.

4 Fazit

Die vorherrschende Beanspruchung von Pfählen mit großem Durchmesser von Offshore-Konstruktionen sind Biegemomente aus Horizontalkräften durch Wind, Welle und Strömung. Zusätzlich treten axiale Wechsellasten aus dem Betriebszustand auf, sodass bei Fundamenttypen mit großen Stahlrohrpfählen eine mehraxiale Beanspruchung vorliegt. Die Pfähle müssen deshalb durch schwere Rammung in tragfähigen Boden ausreichend tief eingebracht werden.

Darüber hinaus ist die genaue Kenntnis der axialen Tragfähigkeit bei diesen Pfählen von großer Bedeutung für die Abschätzung des Einflusses axialer Wechsellasten und unter Berücksichtigung des Nachweises ausreichender horizontaler Bettung ebenso für die Bestimmung eines wirtschaftlichen Pfahldesigns.

Aufgrund dieser mehraxialen Belastung, des zyklischen Charakters der Belastung und noch fehlender abgesicherter Berechnungsverfahren für Pfähle mit großem Durchmesser kommt der dynamischen Probelastung eine zusätzliche Bedeutung im Hinblick auf eine mögliche Übertragung der aus Messung bestimmten axialen Tragfähigkeit auf die von der Tiefe, der Bodenart und des Pfahldurchmessers abhängige horizontale Tragfähigkeit zu.

Die dynamische Pfahlprüfung liefert bei Anwendung der vollständigen Modellbildung die Basis für den Tragfähigkeitsnachweis sowie die Aufteilung der Tragfähigkeit in Spitzendruck und Mantelreibung und die Mantelreibung verteilt über die Einbindetiefe. Das Verfahren dient damit auch der Überprüfung der Berechnungsansätze aus der Planungsphase.

Darüber hinaus werden dynamische Pfahltests genutzt, um den zeitabhängigen Tragfähigkeitszuwachs zu quantifizieren.

Die Erfahrungen offshore zeigen, dass mit dieser Methode sinnvolle und wesentliche Ergebnisse mit Potential zu technischen und wirtschaftlichen Optimierungen erzielt werden können.

Insbesondere das Monitoring der gesamten Rammung ermöglicht ein frühzeitiges Erkennen von Abweichungen zur Planung und möglicher Pfahlschäden durch den Rammvorgang. Hinsichtlich der erforderlichen Lebensdaueranalyse liefert die Ermittlung der Spannungen im Pfahl wesentliche Eingangswerte für die Berechnung der Vorschädigung durch die Herstellung.

In Bezug auf die geforderten Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise kann die Sicherheit bezüglich der Interpretation des Bodenverhaltens aus Bodenaufschlüssen durch die dynamischen Messungen und den daraus ableitbaren Größen erhöht werden.

Zukünftig sollte auch die Einbeziehung der Anwendung der Wellengleichungsmethode zur Bestimmung der axialen Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Schlagzahl je Einheitseindringung in das

Sicherheitskonzept diskutiert werden. Die Berechnungsergebnisse können an Ergebnissen der dynamischen Probelastung kalibriert werden und im Weiteren zur Übertragung von Standorten mit dynamischer Probelastung auf das restliche Baufeld (ohne Messung) bei vergleichbaren Randbedingungen dienen. Dadurch ließe sich für 100% der Gründungspfähle eine Tragfähigkeit angeben, was eine entsprechende Reduktion der anzusetzenden Sicherheiten zur Folge haben sollte.

Literatur zum Thema

- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Standard Konstruktive Ausführung von Offshore Windenergieanlagen, Juni 2007.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH): Anwendungshinweise für den Standard Konstruktive Ausführung von Offshore Windenergieanlagen, Januar 2011, Überarbeitung 2012.
- DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle (EA-Pfähle) 2. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- DIN 1054:2010-12 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
- DIN EN 1997-1:2009-09 – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, September 2009.
- DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Allgemeine Regeln.
- GSP mbH (2009): Neue Entwicklungen für dynamische Pfahlprüfungen, Messtechnik im Bauwesen 1/2009, Ernst & Sohn, Berlin.
- Kirsch, F.; Klingmüller, O. (2011): Driving of Foundation Piles for Offshore Wind Turbines, geotechnischer Spezialbericht, veröffentlicht von ASCE Geoinstitute.
- Kirsch, F., von Barga, M. (2012): Offshore Windpark Nordsee Ost – Sichere Gründung bei Wind und Welle, 32. Baugrundtagung, September 2012 in Mainz.
- Klingmüller, O.; Schallert, M. (2012): "Resistance factors for High-strain dynamic testing regarding German application of Eurocode 7 and correlation of dynamic on static pile tests", Proceedings of IS-Kanazawa 2012: The 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, Kanazawa, Japan, 18.-20.09.2012.
- Klingmüller, O.; Mayer, Ch.; Schallert, M.; Rausche, F. (2015): "Dynamische Probelastung Offshore, Rammern, Festwachsen und Nachrammen - Auswirkung auf den Nachweis der axialen statischen Tragfähigkeit", Pfahl-Symposium 2015, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig.
- Rausche, F.; Klingmüller, O. (2005): Rammbarkeitsuntersuchung für Offshore-Monopiles von Windenergieanlagen, Pfahl - Symposium 2005, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft Nr. 80.
- Richter, T., Kirsch, F., Mittag, J. (2010): Bemessungskonzepte für axial-zyklisch belastete Pfähle – Ein Überblick und neue Ansätze. Tagungsband zur 31. Baugrundtagung der DGGT in München, 263-269.

- Riecke, R., Meyerhoff, F., Galal, G. (2012): Offshore Großrohrrammpfähle – praktische Nachweisführung der axialen Pfahltragfähigkeiten im Baufeld BARD Offshore 1, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft Nr. 60, Berlin 2012, Vortrag zum 8. Hans Lorenz Symposium.
- Schallert, M., Klingmüller, O., Riecke, R. und Galal, G. (2011): Erfolgreicher Einsatz kabelloser Messtechnik bei der dynamischen Pfahlprüfung von Gründungspfählen von Offshore-Bauwerken, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der technischen Universität Braunschweig, Pfahl-Symposium 2011, Heft Nr. 94, S. 471-488.
- Schallert, M.; Klingmüller, O. (2012): "Monitoring of Driving and High-strain Dynamic Load Tests of open-ended steel pipe foundation piles for Offshore Wind Turbines", Proceedings of IS-Kanazawa 2012: The 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, Kanazawa, Japan, 18.-20.09.2012.