

2. Fachveranstaltung

**Baugrunderkundung,
Gründungsinstallation und -monitoring
für Offshore-Windenergieanlagen**

6. und 7. Dezember 2012
Haus der Technik e.V., Essen

**Dynamische Probelastungen
von Gründungspfählen
für Offshore-Windenergieanlagen**

Dr.-Ing. Matthias Schallert

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller

GSP Gesellschaft für
Schwingungsuntersuchungen
und dynamische Prüfmethode
mbH

Inhalt

1 Einleitung

2 High-strain Methode

2.1 Prinzip

2.2 Normung und Richtlinien

2.3 Qualifikation der Prüfinstitute und des Prüfpersonals

3 Monitoring der Pfahlrammung für Offshore-Windenergieanlagen

3.1 Anforderungen an Planung und Durchführung

3.2 Messtechnik

3.3 Ergebnisse

4 Sicherheitskonzept

5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Literatur zum Thema

1 Einleitung

Die Mehrzahl der geplanten Offshore-Windparks in der deutschen Nord- und Ostsee befinden sich in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ). Der Großteil der Windenergieanlagen wird mit Pfählen im Meeresboden verankert. Die besonderen Bedingungen in der AWZ wie z.B. hohe Wassertiefen und die raue küstenferne Umgebung führen zu hohen Kosten für die Gründung, die nach Lesny, 2011 ca. 25 % der gesamten Installationskosten betragen.

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Hamburg ist zuständig für die Genehmigung dieser Windparks. Mit den Anfang 2011 vom BSH herausgegebenen Anwendungshinweisen für den Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ ist der Nachweis der axialen Tragfähigkeit von überwiegend axial belasteten Pfählen für Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) durch dynamische Probelastungen zu erbringen. Das Verfahren ist derzeit das einzige wirtschaftliche Messverfahren zur zuverlässigen Ermittlung der axialen Tragfähigkeit derartiger Gründungspfähle. Statische Probelastungen werden aufgrund des sehr hohen technischen Aufwandes für diese Anwendung als undurchführbar angesehen.

Die dynamische Pfahlprobelastung wird weltweit bereits 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. Während das Verfahren an Land, im Hafenaufbau und küstennahen Gebieten sowie offshore bei der Rammung von Gründungspfählen von Plattformen der Öl- und Gasindustrie herkömmliche Praxis ist, stellte dessen Anwendung bei großen Rammspfählen von OWEA in Nord- und Ostsee bis vor kurze Zeit eine neue Herausforderung dar.

Der Beitrag beschreibt die Möglichkeiten der dynamischen Pfahlprobelastung und auf der Grundlage der Erfahrungen der vergangenen Jahre die Besonderheiten für deren Anwendung bei Gründungspfählen für OWEA. Es wird deutlich, dass das Verfahren ein wichtiges Instrument der Nachweisführung ist. Durch die Anwendung der dynamischen Probelastung kann eine erhöhte strukturelle Sicherheit erreicht und die Wirtschaftlichkeit der Gründung für OWEA verbessert werden.

2 High-strain Methode

2.1 Prinzip

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.

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 Rammhärens 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, $c = (E/\rho)^{1/2}$
- ρ : Dichte des Pfahlmaterials.

Der Proportionalitätsfaktor EA/c wird als "Impedanz" bezeichnet und ist ein Maß für den dynamischen Gesamtwiderstand des Pfahles.

Die Pfahlkopfkraft ergibt sich aus der Messung der Dehnungen und Multiplikation mit dem Elastizitätsmodul E und der Querschnittsfläche A im Messquerschnitt:

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

Für eine zuverlässige Bestimmung der Pfahlkopfkraft muss der Elastizitätsmodul bekannt sein. Die Dehnungen werden über Dehnungsmessstreifen als Vollbrücken in einer leicht zu montierenden Einheit gemessen.

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:

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

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.

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 CASE und nach der CAPWAP - Methode konnte in zahlreichen Vergleichen mit statischen Probelastungen nachgewiesen werden.

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.

2.2 Normung und Richtlinien

Die DIN 1054:2005-01 für Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau wurde zum Jahresende 2010 zurückgezogen. 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 Pfahlprobebelastungen 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 Pfahlprobebelastungen 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 Pfahlprobebelastungen an Gründungspfählen für OWEA gelten nach BSH, 2012 folgende Regelungen:

1. Für die Gründung von OWEA mit überwiegend axial belasteten Pfählen **sind dynamische Pfahlprobebelastungen 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 Probebelastungen sind jedoch **an mindestens 10 % der WEA-Standorte** durchzuführen.
4. Die Probebelastungen sind **mindestens an zwei Standorten jedes geotechnischen Standorttyps** in dem Windparkareal durchzuführen.
5. Das Konzept für die dynamischen Pfahlprobebelastungen, einzureichen zur 2. Freigabe, soll Art und Umfang der geplanten Probebelastungen sowie **die Art der Ergebnisübertragung auf das gesamte Baufeld** enthalten.
6. Die Durchführung dynamischer Pfahlprobebelastungen erfolgt in der ersten Bauphase.
7. Zur Berücksichtigung **zeitlicher Änderungen der Tragfähigkeit** nach der Pfahlinstallation sind im Tragfähigkeitsnachweis Nachrammungen als dynamische Pfahlprobebelastungen (**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.

Die Gebrauchstauglichkeit überwiegend quer zur Pfahlachse belasteter Pfahlgründungen von Offshore-Windenergieanlagen kann nach BSH, 2012 z.B. nach den von Grabe & Dührkop (2008) und Achmus (2008) mitgeteilten Verfahren beurteilt werden.

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 Rammberichte 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 von Offshore-Windenergieanlagen

3.1 Anforderungen an Planung und Durchführung

In den folgenden Abschnitten werden die speziell für dynamische Probelastungen von Gründungspfählen von OWEA notwendigen Anforderungen an Planung und Durchführung diskutiert. Anhand von konkreten Beispielen in der deutschen Nordsee, Offshore-Windpark (OWP) Bard Offshore 1 und OWP Nordsee Ost, werden die Art der Durchführung und Auswertung der Messungen beschrieben und exemplarisch Ergebnisse gezeigt.

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, Tripile, 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 erforderlichen 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 folgenden 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 basierenden 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 Messtechnik

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

In den vergangenen Jahren waren immer Kabelverbindungen von den einzelnen Sensoren (gemessen wird die Dehnung und Beschleunigung am Pfahlkopf) zum Messgerät zur Datenübertragung erforderlich. Seit ca. 4 Jahren können für diese Anwendung durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von Hard- und Software und die Nutzung neuer Technologien neue kabellose Sensorverbindungen auf der Grundlage der Bluetooth - Übertragungstechnik genutzt werden.

Diese Messtechnik ist durch entscheidende Vorteile gegenüber der kabelgebundenen Variante (Schallert et al. 2011) besonders für das Monitoring der Rammung und für Wiederbelastungstests (Restrike-Tests) von Monopiles, Tripiles und Gründungspfählen von bestimmten Konstruktionen von Transformatorplattformen (Jackets) oberhalb des Wasserspiegels geeignet. Abb. 1 zeigt die am Pfahl instrumentierte Messtechnik für eine Messkette aus 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.



Abbildung 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)

Bei diesem in der Nordsee seit Anfang 2010 ca. 90 km nordwestlich der Insel Borkum mit 80 Windenergieanlagen (Typ BARD 5.0) und einer Transformatorplattform im Bau befindenden Windpark BARD Offshore 1 (BO1) besteht die Gründung einer WEA aus einer Tripile-Struktur mit vertikalen offenen Stahlrohrprofilen. Am Pfahlkopf oberhalb des Meeresspiegels sind diese mit einem Stützkreuz verbunden, auf das der weitere Aufbau erfolgt (Abb. 2).

Bei einer Wassertiefe von ca. 40 m variieren die Pfahllängen bis ca. 90 m. Die Rammung der Gründungspfähle einiger WEA dieses Windparks wurden von der GSP mbH durch dynamische Pfahlprüfung mit der beschriebenen kabellosen Messtechnik überwacht und deren axiale Tragfähigkeit bestimmt.

Die je drei Pfähle einer WEA werden zur Vorbereitung der Einbringung auf das Arbeitsschiff 'Wind Lift I' geladen (Abb. 3). Mit einer speziellen Aufnahmevorrichtung werden die Pfähle nacheinander in eine Pfahlführung eingestellt und anschließend schlagend gerammt. Die Rammenergie wird dabei stufenweise bis auf einen festgelegten Wert gesteigert. Mit dieser hinsichtlich Rammfortschritt und minimaler Vorschädigung der Pfähle optimierten Energie werden die Pfähle auf Endtiefe gebracht.



Abbildung 2: Windenergieanlagen Typ BARD 5.0 im Windpark BARD Offshore 1

Unmittelbar vor der Aufnahme der Pfähle für die Rammung wird die beschriebene Messtechnik (Dehnungs- und Beschleunigungssensoren sowie die Datenübertragungseinheiten) durch eine spezielle für diesen Anwendungsfall entwickelten Methode zuverlässig an festgelegten Positionen am Pfahlschaft in Gewindebohrungen montiert. Der Ort der Sensoren an gegenüberliegenden Seiten am Pfahl richtet sich nach den Anforderungen aus der Stoßeinleitung und Wellenausbreitung, der statischen Berechnung der Pfähle und der Geometrie der Aufnahmevorrichtung am Pfahlkopf. Die Möglichkeit der 'Nachbefestigung' während der Rammung war bei diesem Projekt ausgeschlossen, sodass dieses ein wesentliches Detail der Vorbereitung und die Basis für zuverlässige Messwerte von bis ca. 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ und bis ca. 500 g für mehrere 1000 Schläge je Rammung darstellt.



Abbildung 3: Gründungspfähle einer WEA (rechts) auf der Wind Lift I (links) unmittelbar vor der Rammung

Der Bauablauf beim Projekt BO1 erforderte die zeitgleiche Ausrüstung aller 3 Pfähle einer WEA mit Messtechnik. Die maximale Betriebsdauer der Sendeeinheiten wurde aus diesem Grund entsprechend an eine möglich Dauer der Rammung von max. 30 Stunden angepasst, um für alle drei Pfähle nach deren Aufnahme sicher messbereit zu sein.

Die Messgrößen jedes einzelnen Rammschlags wurden aufgezeichnet. Diese sowie daraus abgeleitete Parameter werden in Echtzeit auf dem Monitor visualisiert. Auf diese Weise ließ sich der gesamte Rammvorgang überwachen.

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. Im Normalfall werden die einzelnen Sensoren 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. Abb. 4 zeigt Sensoren für das Monitoring unter Wasser.



Abbildung 4: 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)

Die RWE Innogy GmbH plant den OWP Nordsee Ost. Die Gründung der insgesamt 48 Turbinen der Fa. REPower mit je 6 MW Leistung erfolgt auf Jacket-Konstruktionen, welche die Lasten aus der Struktur und dem Betrieb sowie Wind, Welle und Strömung über je vier Stahlrohrrammpfähle in den Baugrund ableiten. Die Pfähle werden im sog. „post-piling“ Verfahren hergestellt (Kirsch et al., 2012).

Die dynamischen Probelastungen werden bei diesem OWP in Kooperation von GuD Consult GmbH und GSP mbH mit der in Abb. 4 gezeigten Messtechnik durch rambbegleitende Messung des Einbringvorganges je eines der Gründungspfähle des Jackets an 10 % der Anlagenstandorte durchgeführt. Darüber hinaus sind Restrike-Tests nach einer Standzeit von einigen Stunden geplant, bevor der Prüfpfahl durch Vergrouten mit dem Pile-Sleeve verbunden wird.

Zusätzlich wurden vorab bereits Untersuchungen zur zeitabhängigen Entwicklung der Tragfähigkeit an dem Gründungspfahl für einen Messmast als Probepfahl im Projektgebiet untersucht. Abb. 5 zeigt das Monitoring der Rammung des Gründungspfahls für den Messmast, ebenfalls mit wasserdichter Sensorik (für geringe Wassertiefen) und „Unterwasser“-Rammung (Kirsch et al., 2012).

Bei diesem Beispiel wurde zunächst der Pfahl gestellt und wenige Meter vorgerammt. Anschließend erfolgte die Sensormontage und Kabelsicherung am Pfahl und das Monitoring der Rammung, bei der die Messtechnik ca. 5 m unter Wasserspiegel gerammt wurde.



Abbildung 5: Monitoring der Rammung, Monopile für Messmast im OWP Nordsee Ost

3.3 Ergebnisse

Die Messungen von Dehnung und Beschleunigung am Pfahlkopf während des Rammens und die anschließende 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.

Abb. 6 zeigt Ergebnisse als erweitertes Rammprotokoll exemplarisch für die Überwachung der Rammung eines Gründungspfahls im Windpark BO1, qualitativ aufgetragen über die Rammstrecke. Links sind die in den Pfahl eingeleitete Rammenergie (EMX in kNm) und die Schlagzahl pro Meter Eindringung dargestellt. In der Mitte sind Druck- (CSX in MPa) und Zugspannungen (TSX in MPa) in der Messebene und rechts die nach der CASE-Methode ermittelte Tragfähigkeit RX4 und RX8 in kN für verschiedene Dämpfungsfaktoren aufgetragen.

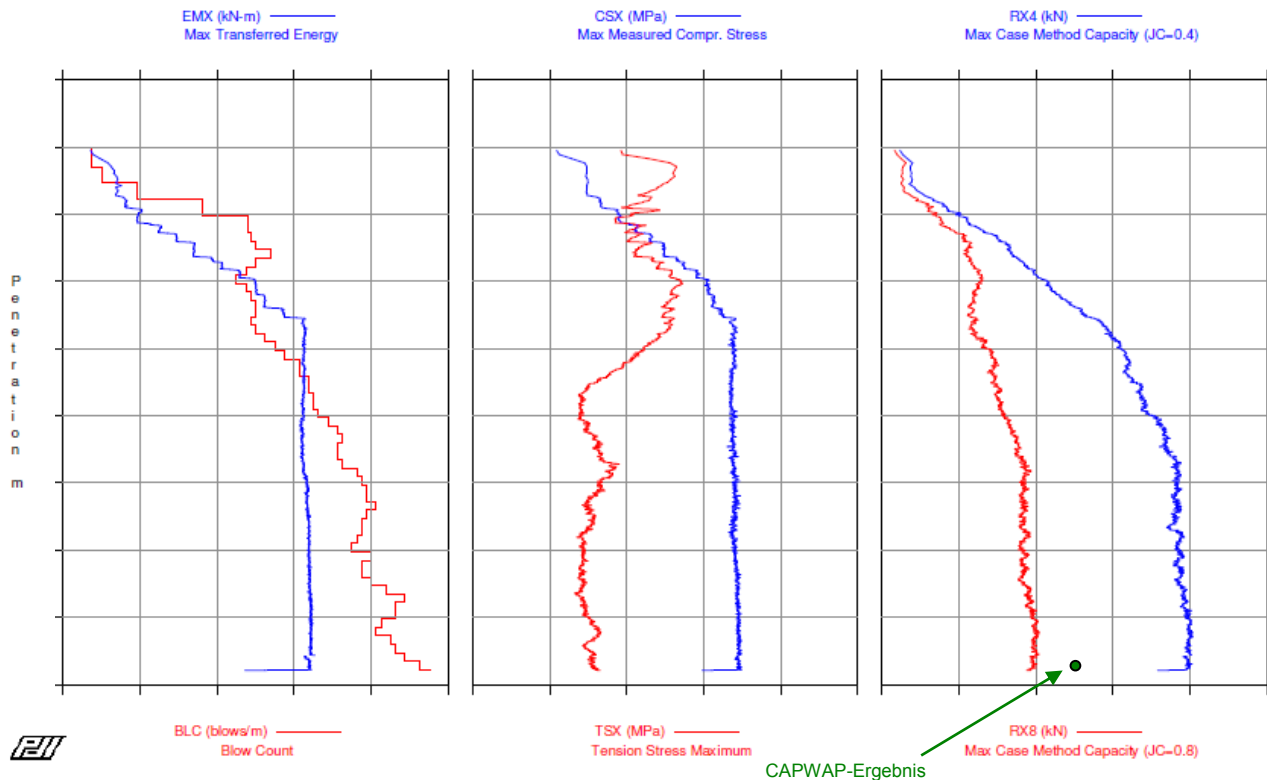


Abbildung 6: Exemplarische Ergebnisse der messtechnischen Überwachung des Rammvorgangs eines Pfahls im Windpark BARD Offshore 1

Beim Projekt BO1 sind die Messungen abgeschlossen. Die Rammung wurde an insgesamt 13 der 80 Standorte bei 39 Pfählen komplett messtechnisch begleitet. Zum Nachweis der aktivierten statischen axialen Tragfähigkeit wurden die mit der High-Strain-Methode durchgeführten Stoßprüfungen nach dem erweiterten CAPWAP-Verfahren durch vollständige Modellbildung mit Systemidentifikation für jeden dieser Pfähle für den Zeitpunkt am Ende der Rammung ausgewertet. Je Pfahl wurde dazu ein Pfahl-Boden-Modell erstellt. Durch die Anwendung der eindimensionalen Wellentheorie ergibt sich daraus die Pfahltragfähigkeit getrennt nach Mantel- und Spitzenwiderstand. Es werden weiterhin die Verteilung des Mantelwiderstands über die Einbindetiefe und eine rechnerische Last-Setzungslinie bestimmt.

Der nach einer gewissen, baugrundtypabhängigen Standzeit der Pfähle erwartete Zusammenhang zur Entwicklung der Tragfähigkeit, der bei nichtbindigen (sandigen) Böden zwischen 20% und 50% im Vergleich zum Zeitpunkt am Ende der Rammung betragen kann, ist schematisch in Abb. 7 dargestellt. Beim OWP BO1 wurden an 4 Standorten Restrike-Tests an insgesamt 12 Pfählen nach Standzeiten von 7, 50 und 80 Tagen durchgeführt.

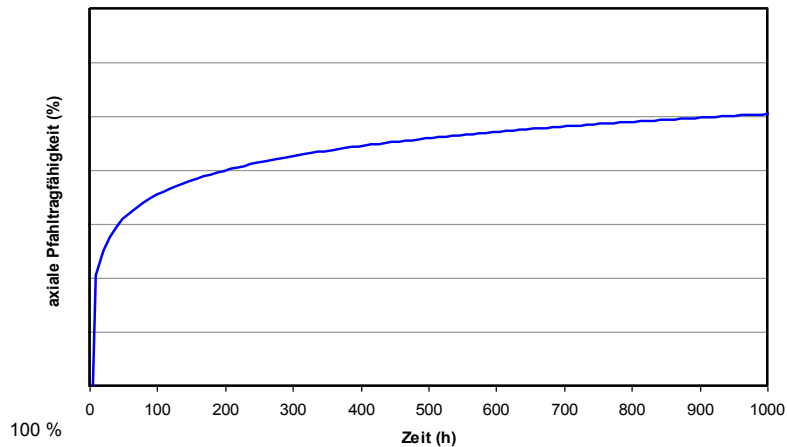


Abbildung 7 : Schematische Darstellung der zeitabhängigen Zunahme der axialen Pfahltragfähigkeit

Beim OWP Nordsee Ost wurde bisher die Rammung des Monopfahls für den Messmast messtechnisch begleitet und Restrike-Tests nach ca. 1 h, ca. 7 h und ca. 750 h (31 Tagen) durchgeführt. Der daraus abgeleitete Zusammenhang zwischen Tragfähigkeitsentwicklung und Standzeit für diesen Pfahl ist in Abb. 8 gezeigt.

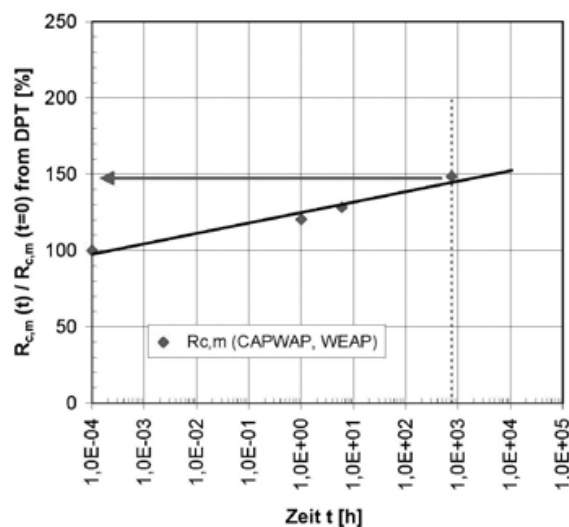


Abbildung 8: Entwicklung der Pfahltragfähigkeit: Monopfahl Messmast, OWP Nordsee Ost (Kirsch et al., 2012)

Die ermittelten axialen Tragfähigkeiten zum Zeitpunkt am Ende der Rammung variieren in Abhängigkeit der Baugrundeigenschaften. In einzelnen Fällen wurden im OWP BO1 an Standorten mit reinen Sandprofilen deutlich höhere axiale Tragfähigkeiten im Vergleich zur Prognose bestimmt (Schallert et al. 2011).

Die beim OWP BO1 ermittelten axialen Tragfähigkeiten am Ende der Rammung weisen nur sehr geringe Streuungen auf. Die Abweichungen der einzelnen Pfahltragfähigkeiten eines Standortes vom Mittelwert der jeweiligen Messergebnisse liegen an allen getesteten Standorten unter 5% (Abb. 9). Weitere Ergebnisse der dynamischen Probelastungen beim OWP BO1 sind in Schallert et al., 2011 und Riecke et al., 2012 beschrieben.

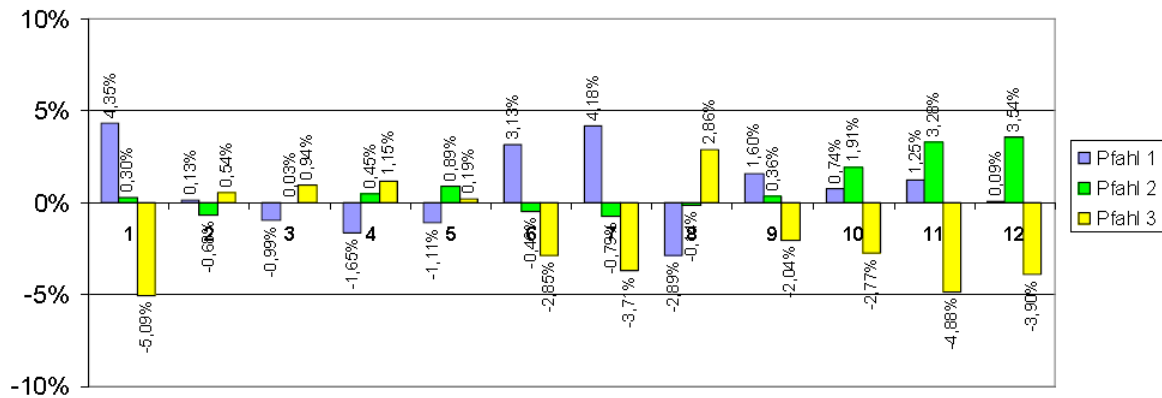


Abbildung 9: Abweichungen der einzelnen Pfahltragfähigkeiten vom jeweiligen Mittelwert der Messergebnisse beim OWP Bard Offshore 1

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.

4 Sicherheitskonzept

Das Ergebnis einer dynamischen Pfahlprobelastung ist der Messwert des Pfahlwiderstands. Zur Ableitung von charakteristischen Pfahlwiderständen aus den Messwerten sind gemäß DIN EN 1997-1:2009-09 (Eurocode EC 7-1) und DIN 1054 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 Pfahllherstellung nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung haben und bei der Pfahleinbringung Rammberichte erstellt werden, anhand derer jeder einzelne Pfahl quantitativ beurteilt werden kann.

5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Die vorherrschende Beanspruchung von Pfählen mit großem Durchmesser von OWEA 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 (Achmus et al., 2005). 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 bisherigen Erfahrungen mit dynamischen Probelastungen in der deutschen Nordsee 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

- Achmus, M.; Abdel-Rahman, K.; Peralta, P. (2005): Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopiles für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen, Pfahl - Symposium 2005, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft Nr. 80.
- Achmus, M., Kuo, Y.-S., Abdel-Rahman, K. (2008): Zur Bemessung von Monopiles für zyklische Lasten, Bauingenieur, 83, Heft 7-8, 303-311.
- BARD-Gruppe, Pressemitteilung vom 07.12.2010, Erster Hochsee-Windstrom aus „BARD Offshore 1“, Fünfzehnte Windkraftanlage im Projektfeld installiert, www.bard-offshore.de.
- 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. (2007): Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle (EA-Pfähle), Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle (EA-Pfähle) 2. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- DIN 1054-2005: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau.
- 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.

- Grabe, J., Dührkop, J. (2008): Zum Tragverhalten von überwiegend horizontal belasteten Pfählen. Tagungsband zur 30. Baugrundtagung 2008 der DGGT in Dortmund, 143–150.
- 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., Richter, T. (2010): Ein analytisch-empirischer Ansatz zur Bestimmung der Tragfähigkeit und der Verformungen von axial zyklisch belasteten Pfählen. Veröffentlichungen des Instituts für Boden- und Felsmechanik, KIT Süd, Workshop „Offshore- Gründungen von Windkraftanlagen“, Heft 172.
- Kirsch, F.; Richter, T. (2011): Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen, Bautechnik.
- 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.
- Lesny, K. (2011): Baugrunderkundung und Gründungsplanung für Offshore-Windparks, 1. Fachveranstaltung, Baugrunderkundung, Gründungsinstallation und -monitoring für Offshore-Windenergieanlagen, Haus der Technik e.V., Essen.
- 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.