

# **Erfolgreicher Einsatz kabelloser Messtechnik bei der dynamischen Pfahlprüfung von Gründungspfählen von Offshore - Bauwerken**

Matthias Schallert, Oswald Klingmüller, Rainer Riecke, Galal Galal

## **1 Einleitung**

Die dynamische Prüfung von Pfählen wird zur Bestimmung der axialen Tragfähigkeit weltweit seit vielen Jahren eingesetzt. Die High-Strain-Methode ist in vielen Ländern in Normung und Richtlinien aufgenommen und gilt als Stand der Technik für die Qualitätssicherung von Pfählen. Durchführung und Auswertemethoden sind für Deutschland in EA-Pfähle (2007) beschrieben.

Während das Monitoring der Rammung von Gründungspfählen onshore, nearshore und von Offshore-Plattformen z.B. der Ölindustrie bereits herkömmliche Praxis ist, stellt die Anwendung der dynamischen Pfahlprüfung bei großen Rammspfählen von Offshore-Windenergieanlagen (WEA) eine neue Herausforderung dar. Diesbezüglich liegen bisher keine Erfahrungen vor. Der Beitrag zeigt, dass die dynamische Pfahlprüfung zukünftig gerade vor dem Hintergrund der Vielzahl bereits genehmigten und in Planung befindlicher Windparks in der deutschen Nord- und Ostsee als einziges wirtschaftliches Messverfahren zur Ermittlung der axialen Tragfähigkeit derartiger Gründungspfähle ein wichtiges und effizientes Instrument der Nachweisführung sein kann.

Die vorherrschende Beanspruchung von Pfählen mit großem Durchmesser (Monopiles) von Offshore-WEA sind Biegemomente aus Horizontalkräften durch Wind, Welle und Strömung, die als Wechsel- oder Schwellbelastungen auftreten. 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 Bodenschichten hoher Lagerungsdichte und ausreichend horizontaler Bettung entsprechend tief eingebracht werden. Bezüglich des tatsächlichen Bodenverhaltens im Betriebszustand von derart großen Offshore-Pfählen liegen bisher ebenfalls nicht ausreichend Erkenntnisse vor (Stahlmann et al., 2005).

Mit der dynamischen Probelastung wird die axiale Tragfähigkeit derartiger Pfähle in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften ermittelt. Dadurch wird auch eine Abschätzung der horizontalen Tragfähigkeit ermöglicht (Kirsch/Klingmüller, 2011). 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. Durch das Monitoring der Rammung lässt sich zudem das Rammsystem für das gegebene Pfahl-Boden-System optimieren.

In den vergangenen Jahren waren bei dieser Messmethode Kabelverbindungen von den einzelnen Sensoren zum Messgerät zur Datenübertragung erforderlich. Seit kurzer Zeit können für diese Anwendung neue kabellose Sensorverbindungen auf der Grundlage der Bluetooth - Übertragungstechnik genutzt werden.

Der Beitrag beschreibt die neue Messtechnik, deren Vorteile, Möglichkeiten und Besonderheiten an einem aktuellen Beispiel, der Gründung von Offshore – Windenergieanlagen in der deutschen Nordsee.

## **2 Messtechnik**

Die für die Messung von Dehnung und Beschleunigung bei dynamischen Probelastungen erforderlichen Sensoren und Geräte werden seit vielen Jahren von PDI, der Pile Dynamics Inc., Cleveland, Ohio, die Weltmarktführer in diesem speziellen Gebiet ist, hergestellt. Die kontinuierliche Weiterentwicklung von Hard- und Software und die Nutzung neuer Technologien führten zur Möglichkeit der Anwendung kabelloser Sensoren bei der dynamischen Probelastung mit Datenfernübertragung (GSP mbH, 2009).

Zur Datenerfassung und Steuerung der Messungen mit kabelloser Datenübertragung wurde der Pile Driving Analyzer (PDA), Model PAX, von PDI entwickelt ([www.pile.com](http://www.pile.com)). Die Dehnungs- und Beschleunigungssensoren haben ihre Identifikations- und Kalibrierdaten gespeichert, die automatisch an das Messgerät übertragen werden (smarte Sensoren). So können Messfehler diesbezüglich ausgeschlossen werden. Die Kommunikation zwischen Sensor und Messgerät basiert auf der Bluetooth - Übertragungstechnik. Es steht eine anwenderfreundliche Software für Installation und Steuerung zur Verfügung.

Vorteil dieser Messtechnik ist, dass auf Kabelverbindungen zwischen den einzelnen Sensoren zum Messgerät verzichtet werden kann. Dies ist insbesondere bei der Überwachung des vollständigen Rammvorgangs von sehr langen Pfählen wesentlich, da die Montage von Sensoren in diesen Fällen eine schwierige Angelegenheit ist und bei Verwendung von Kabeln gewisse Risiken mit sich bringt. Mit der neuen kabellosen Messtechnik werden diese Risiken minimiert bzw. ausgeschlossen.

Bei der Verwendung der herkömmlichen Messtechnik mit Kabeln müssen die Sensoren von einem Mannkorb am Kran in oft schwindelerregender Höhe oder vor der Aufnahme der Pfähle zur Rammung montiert werden. Im ersten Fall ist dies nur bei guten Witterungsbedingungen sicher möglich, die gerade bei offshore - Verhältnissen nicht vorausgesetzt werden können. Störungen des Bauablaufs mit erhöhtem Kostenaufwand sind die Folge. Im zweiten Fall sind insbesondere die Kabel durch die Bewegung der großen Massen mit schwerem Baugerät erheblich gefährdet, da ein ausreichender Schutz vor Beschädigung bei Pfahlaufnahme nicht realisiert werden kann. Beschädigte Kabel führen insbesondere bei Eintritt von Feuchtigkeit zwangsläufig zu fehlerhaften und oft unbrauchbaren Messergebnissen.

Die Bluetooth – Technologie hat sich als Industriestandard in der Elektronikindustrie zur Datenübertragung per Funk auf kurzen Strecken z.B. gegen die Infrarottechnik durchgesetzt. Abhängig von Technologie und Sendeleistung können unterschiedliche Reichweiten erzielt werden. Die Übertragung der Daten erfolgt per Funk mit Hilfe hochfrequenter elektromagnetischer Felder.

Bei der dynamischen Probelastung mit dem PDA-Modell PAX können die Daten, abhängig von der Existenz störender Konstruktionen wie z.B. Stahl- oder Stahlbetonelementen zwischen Sender und Empfänger, bis zu 100 m kabellos übertragen werden. Die Verbindung wird innerhalb weniger Millisekunden aufgebaut, sodass bei der Pfahlrammung die Messgrößen direkt nach jedem Rammschlag am Messgerät visualisiert und weiter verarbeitet werden können (Abb. 5). Dadurch kann die Überwachung des gesamten Rammvorgangs kabellos realisiert werden. Der Stromverbrauch ist gering, sodass ein akkubetriebenes Messgerät für den ganzen Messtag einsatzfähig ist. Das Messgerät enthält eine 24 bit A/D-Wandlung. Es sind bis zu 40 kHz Abtastrate je Kanal und eine Datengröße von 1K, 2K und 4K möglich. Abb. 1 zeigt die am Pfahl instrumentierte Messtechnik (smarte Sensoren und Radio) und das Messgerät PDA-Modell PAX.



Abbildung 1: Sensoren und Sendeeinheit - Radio am Pfahl (links), Messgerät mit Empfängereinheit, Pile Driving Analyzer von PDI, Modell PAX

### 3 Beispiel – Dynamische Pfahlprüfung – Projekt Bard Offshore 1

In der deutschen Nordsee wird in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) seit Anfang 2010 der erste kommerzielle Offshore Windpark BARD Offshore 1 ca. 90 km nordwestlich der Insel Borkum mit 80 Windenergieanlagen (Typ BARD 5.0) und einer Transformatorplattform errichtet. Seit Dezember 2010 wird aus der ersten WEA dieses Windparks Strom ins Netz eingespeist. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden bereits 15 WEA von der BARD Building GmbH installiert. Nach Fertigstellung liefert der Windpark eine Nennleistung von 400 Megawatt. Das entspricht einem Verbrauch von ca. 400.000 Mehrpersonenhaushalten (BARD-Gruppe 07.12.2010).

Die Rammung der Gründungspfähle einiger WEA des Windparks und deren axiale Tragfähigkeit werden von der GSP mbH durch dynamische Pfahlprüfung mit der beschriebenen kabellosen Messtechnik überwacht und bestimmt.

### **3.1 Baugrundverhältnisse**

Der Baugrund wurde durch geophysikalische Erkundungen sowie geotechnische Vor- und Haupterkundungen (Bohrungen, Drucksondierungen, Laborversuche) untersucht. Drucksondierungen wurden an jedem WEA-Standort im Windpark durchgeführt. Während der Planungsphase wurden auf Basis der Baugrunduntersuchungen einzelne Standorte der insgesamt 80 WEA zu Baugrundtypen (Bemessungsprofilen) mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammengefasst. Die Ergebnisse der Erkundungen zeigten ähnliche Verhältnisse bezüglich der Bodenart, Schichtung und Lagerung für die Mehrzahl der WEA-Standorte im Windpark (ACP GmbH, 2009).

Im Wesentlichen besteht der Baugrund im Windpark im maßgeblichen Einbindebereich der Pfähle unterhalb der marinen Deckschichten aus pleistozänen, eiszeitlich vorbelasteten Fein- und Mittelsanden mit überwiegend dichter bis sehr dichter Lagerung. An einigen WEA-Standorten sind die Sande mit bindigen Schichten (Schluff, Ton) und Grobsanden oder Kiesen durchzogen. Die Einbindelängen der Pfähle variieren in Abhängigkeit des jeweiligen Baugrundtyps. Tabelle 1 zeigt die Klassifikation der Hauptbodenarten (aus Gründungsgutachten, ACP GmbH, 2009).

Bezüglich der axialen Tragfähigkeit der Pfähle enthält das Gründungsgutachten die in Tabelle 2 angegebenen Werte für Mantel- und Spitzenwiderstand im Grenzzustand für diese Bodenarten. Diese prognostizierten Erfahrungswerte sollen durch die dynamischen Probelastungen überprüft werden.

Tabelle 1: Klassifikation der Hauptbodenarten (ACP GmbH, 2009)

Hauptbodenart	Bodengruppe nach DIN 18 196	Bodenklasse nach DIN 18 300
marine Deckschicht (Feinsand, teils schluffig und tonig)	SE, SU, SU*, ST, ST*	3, teils 2 <sup>(2)</sup> oder 4 <sup>(1)</sup>
Sand, teils schluffig locker, mitteldicht, dicht, sehr dicht	SE, SU, SU*	3, teils 4 <sup>(1)</sup>
Sand, kiesig, Kies Sand + Kies	SW, GW	3, ggf. 5 oder 6 <sup>(3)</sup>
Sand+Schluff+Ton in Wechsellagerungen	SU, SU*, ST, ST*	4
Schluff	UL, UM, UA, SU*	4, ggf. 2 <sup>(2)</sup>
Ton	TL, TM, TA ST*	4, ggf. 5 <sup>(4)</sup> oder 2 <sup>(2)</sup>

- Anm.: <sup>(1)</sup> bei >15% Anteil an der Korngröße  $d < 0,06$  mm  
<sup>(2)</sup> bei flüssiger bis breiiger Beschaffenheit  
<sup>(3)</sup> bei entsprechenden Grobkomponenten  
<sup>(4)</sup> bei ausgeprägt plastischen Tonen

Tabelle 2: Grundwerte für Mantel- und Spitzenwiderstand (ACP GmbH, 2009)

Hauptbodenart/ Lagerungsdichte		Wandreibungswinkel $\delta$ in $^\circ$	Tragfähigkeitsbeiwert $N_c$ in 1	Pfahlspitzenwiderstand $q_c$ im Grenzzustand in MPa	Mantelreibung $f$ im Grenzzustand in kPa
Deckschicht		-	-	-	-
Sand	locker	20	12	2,9	67
	mitteldicht	25	20	4,8	81
	dicht	30	40	9,6	96
	sehr dicht	35	50	12,0	115
Schluff + Sand		20	12	2,9	67
Schluff		15	8	1,9	48
Ton		<sup>(1)</sup>			

- Anm.: <sup>(1)</sup> Berechnung gemäß API, G.4.2 auf der Grundlage von  $c_u$  [R4.02]

### 3.2 Gründung / Pfahldesign

Die Gründung einer Windenergieanlage (WEA) besteht 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 zwischen 83 m und 90 m. Der Außendurchmesser beträgt ca. 3 m. Die Wandstärke der Stahlrohre ist über die Länge abgestuft.



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

### 3.3 Pfahlrammung und Monitoring

Drei Pfähle einer WEA werden zur Vorbereitung der Einbringung auf das Arbeitsschiff 'Wind Lift I' geladen. Abb. 3 links zeigt das Arbeitsschiff und rechts ein Foto vom Kopfbereich der Pfähle.



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

Mit einer speziellen Aufnahmevorrichtung werden die Pfähle nacheinander in eine Pfahlführung (PGF, pile guidance frame) eingestellt und anschließend gerammt. Für die Einbringung der Pfähle wird ein freireitender Rammbar (Menck MHU 1900S) mit einem Gesamtgewicht von 256 t, einer Länge von ca. 21 m inkl. Rammhaube und einer theoretischen Rammenergie von 1900 kNm eingesetzt. Die Rammenergie wird während der Einbringung stufenweise bis auf einen festgelegten Wert gesteigert. Mit dieser hinsichtlich Rammfortschritt und minimaler Vorschädigung der Pfähle optimierten Energie werden die Pfähle auf Endtiefe gebracht.

Unmittelbar vor der Aufnahme der Pfähle für die Rammung wird die in Abschnitt 2 beschriebene Messtechnik mit einer speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten Technik am Pfahlschaft 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 einzelnen Arbeitsschritte der Montage der Messtechnik und Pfahleinbringung konnten bisher so optimal aufeinander abgestimmt werden, dass keine nennenswerten Störungen der Abläufe gegeben waren.

Die Dehnungs- und Beschleunigungssensoren werden durch eine Kombination aus Verschraubung und Klebung zuverlässig am Pfahlschaft montiert. Diese Methode wurde von

der GSP mbH entwickelt, bei früheren Messungen unter offshore - Bedingungen getestet und für diesen Anwendungsfall optimiert. Dieses Detail ist im Hinblick auf belastbare Ergebnisse insbesondere bei den offshore - Verhältnissen wesentlich, da eine spätere 'Nachbefestigung' der Sensoren während der Rammung die Abläufe stark stören und zudem hohe Kosten durch zeitlichen und technischen Aufwand verursachen würde. Im Projekt BARD Offshore 1 ist die Möglichkeit der 'Nachbefestigung' gänzlich ausgeschlossen. Es galt also im Vorfeld eine Ankopplung der Messtechnik zu realisieren, die eine zuverlässige Erfassung der Verformungen von bis ca. 1000  $\mu\text{m}/\text{m}$  und Beschleunigungen von bis ca. 500 g für mehrere 1000 Rammschläge pro Pfahl gewährleistet.

Für die realisierte Methode sind Bohrungen von im Vergleich zur Wandstärke der Rohre nur wenigen Millimetern Tiefe erforderlich. Durch Berechnungen der BARD Engineering GmbH konnte ein Einfluss dieser Bohrungen auf die Lebensdauer bzw. Schädigung der Pfähle im Vorfeld als vernachlässigbar klein nachgewiesen werden.

Die Sendeeinheiten (Radios) zur Datenübertragung vom Pfahl zum Messgerät werden direkt neben den Sensoren ebenfalls durch Verschraubung und Klebung befestigt und in deren Lage für die Zustände der Montage, der Pfahlaufnahme und der Rammung ausreichend gesichert. Abb. 4 zeigt die Messtechnik für den Zustand während der Montage.



Abbildung 4: Montagezustand: kabellose Messtechnik für dynamische Probelastung

Durch den beschriebenen Ablauf der Einbringung sind alle drei Pfähle einer WEA zur gleichen Zeit mit Messtechnik instrumentiert. Die maximale Sendezeit der Radios wurde aus diesem Grund durch Akkuerweiterung von 12 Stunden (Standard) auf ca. 30 Stunden erhöht, um für alle drei Pfähle nach deren Aufnahme sicher messbereit zu sein. Das Messgerät lokalisiert also 6 Dehnungs- und 6 Beschleunigungsaufnehmer, wobei durch die Bluetooth - Technologie nur jeweils die 4 Sensoren der jeweiligen Pfahlrammung gezielt angesteuert und abgefragt werden können. Aufgezeichnet werden die Messgrößen jedes einzelnen Rammschlags. Diese sowie daraus abgeleitete Werte werden in Echtzeit auf dem Monitor visualisiert. Auf diese Weise lässt sich der Rammvorgang überwachen und gegebenenfalls optimieren.

### **3.4 Exemplarische Messergebnisse**

Bei der Rammung der Pfähle wird durch die Messung von Dehnung und Beschleunigung bei jedem Rammschlag die tatsächlich eingeleitete Energie und die Spannungen im Pfahl am Messquerschnitt bestimmt und überwacht. Dadurch erhält man erweiterte Rammprotokolle mit Informationen auch über die nach der direkten Methode (CASE-Verfahren) berechneten Tragfähigkeiten in Echtzeit für jeden Rammschlag und über die Tiefe.

Abb. 5 zeigt Ergebnisse, die nach jedem Rammschlag (hier Demo) am Monitor des Messgeräts angezeigt werden. Es sind die aus den Messwerten bestimmten Zeitverläufe der Kraft (rote Kurve) und Geschwindigkeit (blaue Kurve) dargestellt. Die Maximalwerte, FMX für die Kraft und VMX für die Geschwindigkeit, sind links oben im Bild dargestellt. Zusätzlich sind daraus abgeleitete Größen wie max. Druckspannung (CSX), max. Zugspannung (TSX), eingeleitete Energie (EMX), max. Verschiebung am Pfahlkopf (DMX) und nach der CASE-Methode ermittelte Tragfähigkeiten für angenommene CASE-Dämpfungsfaktoren von 0,4 (RX4) und 0,8 (RX8) angegeben. Der untere linke Bereich im Bild zeigt Informationen über Pfahlgeometrie (Länge LE, Querschnittsfläche AR, aktuelle Einbindung im Boden LP) und Pfahlmaterial (E-Modul EM, spezifisches Gewicht SP, Wellengeschwindigkeit WS, WC). Es ist eine Vielzahl weiterer aus der Messung abgeleiteter Parameter an dieser Stelle darstellbar.

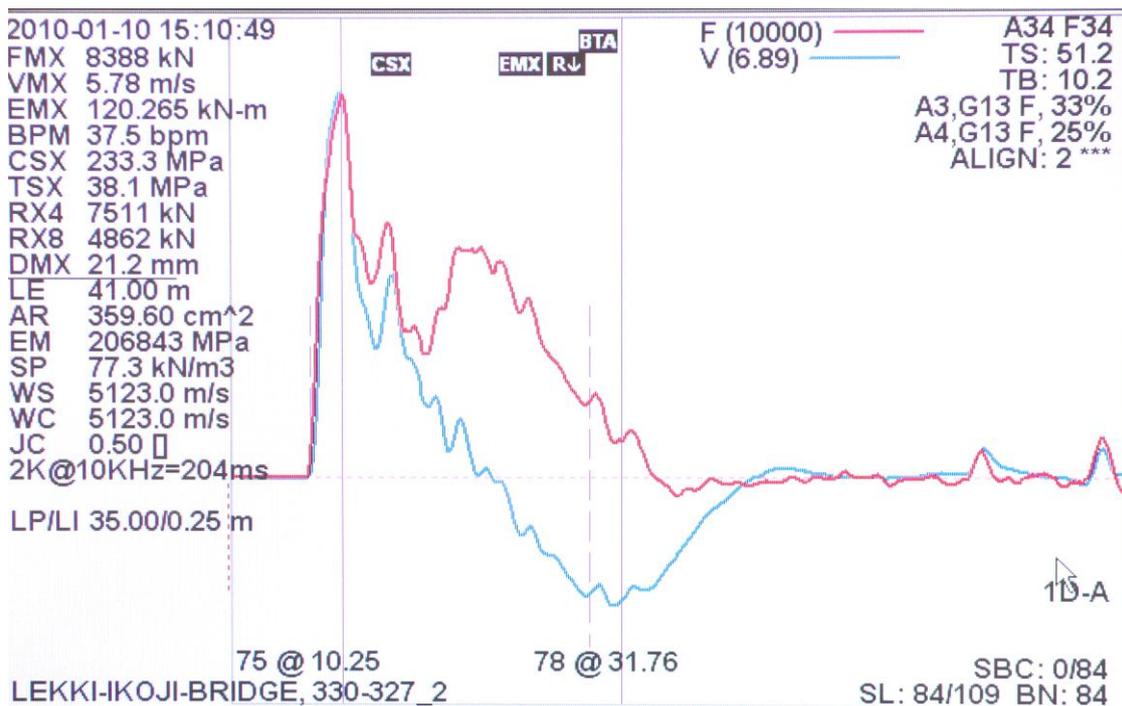


Abbildung 5: Demo für die je Rammschlag am Messgerät angezeigten Parameter, Kraft- und Geschwindigkeitszeitverlauf am Pfahlkopf, Maximalwerte und abgeleitete Größen

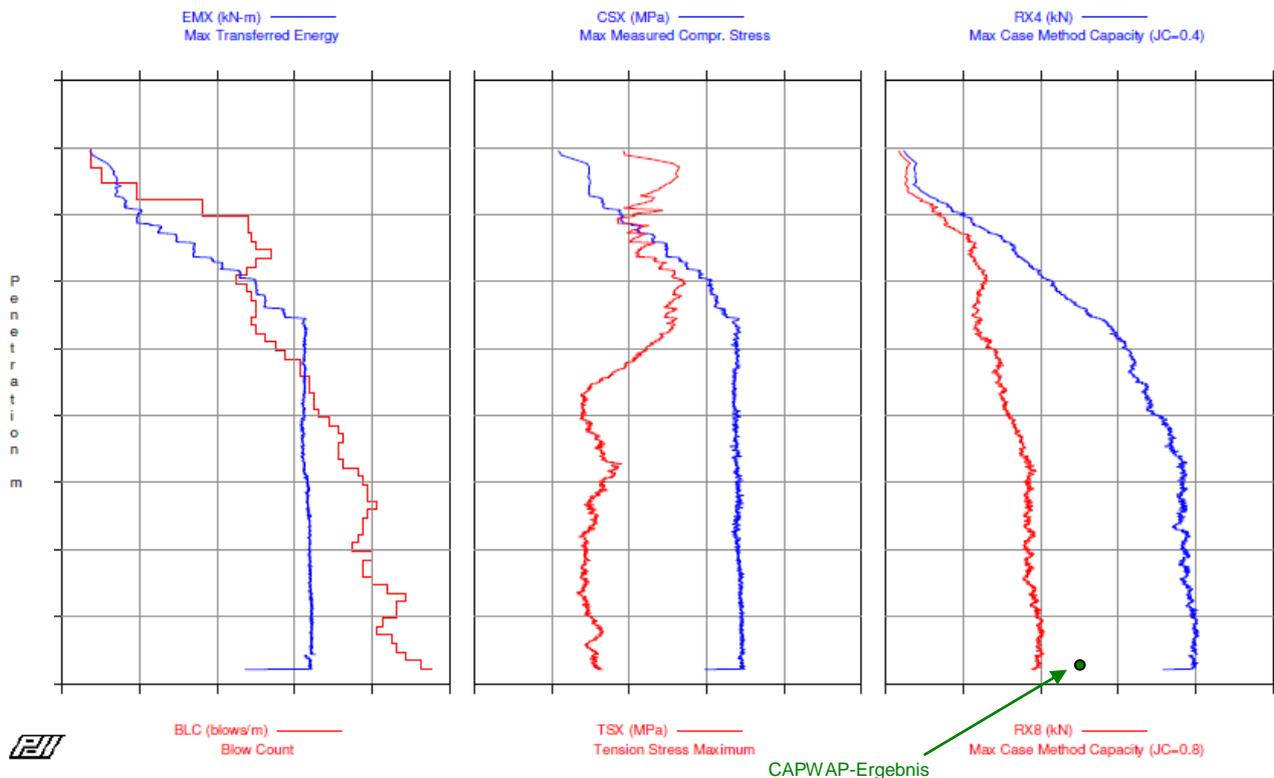


Abbildung 6: Exemplarische Ergebnisse der messtechnischen Überwachung des Rammvorgangs eines Pfahls im Windpark BARD Offshore 1

Abb. 6 zeigt exemplarisch diese Ergebnisse für die Überwachung der Rammung von allen Rammschlägen eines Gründungspfahls im Windpark BARD Offshore 1, qualitativ aufgetragen über die Rammstrecke. Im Diagramm links sind die in den Pfahl eingeleitete Rammenergie (EMX in kNm) und die Schlagzahl pro Meter Eindringung dargestellt. Die mittlere Grafik zeigt die maximalen Druck- (CSX in MPa) und Zugspannungen (TSX in MPa) in der Messebene am Pfahlkopf. Im rechten Diagramm ist die nach der CASE-Methode ermittelte Tragfähigkeit RX4 und RX8 in kN aufgetragen.

Zum Nachweis der aktivierten statischen axialen Tragfähigkeit werden die an den Stahlrohren mit der High-Strain-Methode durchgeführten Stoßprüfungen nach dem erweiterten CAPWAP-Verfahren (CASE Pile Wave Analysis Program) mit Systemidentifikation ausgewertet. Je Pfahl wird dazu ein Pfahl-Boden-Modell erstellt und zunächst einer der letzten Schläge der Rammung (Endtiefe) für die Auswertung verwendet. Durch die Anwendung der eindimensionalen Wellentheorie wird die Pfahltragfähigkeit dabei getrennt nach Mantel- und Spitzenwiderstand bestimmt. Es werden weiterhin die Verteilung des Mantelwiderstands über die Einbindetiefe und eine rechnerische Last-Setzungslinie bestimmt.

Abb. 7 zeigt die Verteilung des durch CAPWAP-Analyse ermittelten Mantelwiderstands exemplarisch als Mittelwert von 3 Pfählen für einen WEA-Standort. Der Sondierspitzenwiderstand der Drucksondierung ist zum Vergleich gegenübergestellt, der an diesem Standort ab einer Tiefe von ca. 30 m über 60 MN/m<sup>2</sup> beträgt.

Die durch CAPWAP-Analyse ermittelten axialen Tragfähigkeiten zum Zeitpunkt am Ende der Rammung variieren in Abhängigkeit der Baugrundeigenschaften und liegen nach den bisherigen Messungen im Allgemeinen in der Größenordnung der im Vorfeld prognostizierten Grenztragfähigkeiten. In einzelnen Fällen wurden an Standorten mit reinen Sandprofilen deutlich höhere axiale Tragfähigkeiten im Vergleich zur Prognose bestimmt. Mit Ergebnissen weiterer CAPWAP-Analysen bei verschiedenen Einbindetiefen und unter Berücksichtigung der mehraxialen Belastung, d.h. einer ausreichenden horizontalen Tragfähigkeit, wird deshalb eine mögliche Optimierung des Pfahldesigns für zukünftige WEA-Standorte bei vergleichbaren Baugrundeigenschaften geprüft. Dies kann eine erhebliche Kosteneinsparung zur Folge haben.

Zusätzlich lassen sich für die mit der CAPWAP-Analyse ausgewerteten Schläge in jeder gewünschten Tiefe die maximalen Spannungen im Pfahl angeben. Dadurch kann die Ausnutzung der zulässigen Spannungen und mit der entsprechenden Lastwechselzahl bei

der Rammung die Vorschädigung der Pfähle durch Ermüdungsberechnung bestimmt werden. Die dynamische Pfahlprüfung liefert somit einen wesentlichen Beitrag zur zuverlässigen Lebensdaueranalyse.

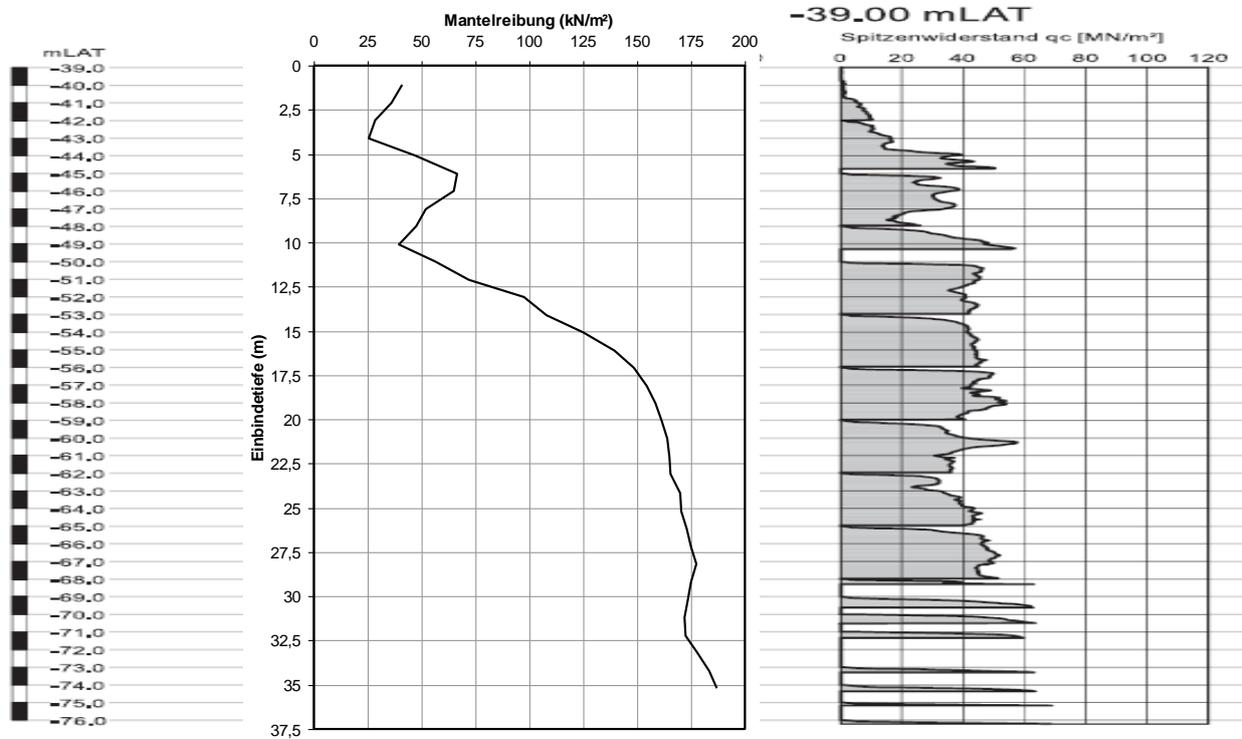


Abbildung 7: Verteilung Mantelwiderstand,  
Vergleich mit Sondierspitzenwiderstand am gleichen Standort

### 3.5 Diskussion der Messergebnisse

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass mit der beschriebenen neuen Messtechnik sinnvolle und wesentliche Ergebnisse mit Potential zu technischen und wirtschaftlichen Optimierungen erzielt werden können.

Bei den CAPWAP-Analysen wurden bestmögliche Angleichungen (minimale Abweichung) zwischen Berechnung und Messung bestimmt. Die Zeitverläufe des gerechneten und des gemessenen Pfahlverhaltens (Kraft und Geschwindigkeit) sind nahezu deckungsgleich. Die Modelle können somit das tatsächliche axiale Pfahlverhalten zuverlässig abbilden.

Aufgrund des bei Stahlrohrpfählen mit großem Durchmesser vorherrschenden horizontalen Anteils der mehraxialen Belastung, des zyklischen Charakters der Belastung und noch fehlender abgesicherter Berechnungsverfahren für solche Monopiles kommt der dynami-

schen 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. Voraussetzung für einen ausreichend horizontalen Bodenwiderstand ist eine entsprechend tiefe Einbringung der Monopiles in Böden hoher Lagerungsdichte durch schwere Rammung.

Ansätze zur Berücksichtigung der zyklischen Belastung von Monopiles für Offshore-WEA sind derzeit Gegenstand der Forschung und werden z.B. von Kirsch und Richter (2011) zur Bestimmung des Einflusses auf die axiale Tragfähigkeit oder von Achmus et al. (2005) auf die horizontale Tragfähigkeit diskutiert.

Ein möglicher Ansatz zur Übertragung der Ergebnisse dynamischer Probelastungen auf die horizontale Tragfähigkeit von Monopiles beschreiben Kirsch und Klingmüller (2011) mit beispielhaften Ergebnissen. Danach kann bei einer zuverlässigen Bestimmung des axialen Mantelwiderstands durch die CAPWAP-Analyse und der damit verbundenen Verifizierung bodenmechanischer Kenngrößen zusätzlich durch die Bestimmung bilinearer p-y-Kurven (p – horizontale Bodenreaktionskraft, y – zugehörige horizontale Verschiebung) eine Basis zur Abschätzung des horizontalen Bodenwiderstands gegeben werden. Voraussetzung dafür ist eine optimale Messdatenqualität durch u.a. die beschriebene Sensormontage und eine zuverlässige durch Plausibilitätsprüfung abgesicherte CAPWAP-Analyse.

Aus dieser resultiert die aktivierte Mantelreibung ( $R_{ult,i}$  – Widerstand der Bodenschicht i der Dicke 1m) und die zugehörige axiale Verschiebung ( $q_i$  – quake in der Bodenschicht i). Daraus folgt die vom Schubmodul abhängige axiale Steifigkeit  $k_s$

$$k_s = \frac{R_{ult,i}}{q_i} .$$

Die horizontale Steifigkeit ist abhängig vom Elastizitätsmodul. Mit einem Ansatz von Cooke (1974) kann durch weitere Berechnungsschritte und Umformungen unter Berücksichtigung des CAPWAP- Modells für die Mantelreibung auf die horizontale Steifigkeit  $k_h$  geschlossen werden:

$$k_h = \frac{k_s}{4 \cdot \pi \cdot r_0} \cdot \ln \left( \frac{r_m}{r_0} \right) \cdot \frac{2 \cdot (1-\nu^2)}{1-\nu-2 \cdot \nu^2}$$

$$r_m = 2,5 \cdot L \cdot (1-\nu),$$

$$r_0 = \text{Pfahlradius},$$

$L$  = Längeneinheit des Pfahlelements,  
 $\nu$  = Poissonzahl.

Dies ermöglicht die Verifizierung prognostizierter horizontaler Bodenwiderstände auf der Basis von Messungen am konkreten Standort.

#### **4 Sicherheitskonzept**

Im beschriebenen Beispiel ist eine Nachweisführung nach DIN 1054:2005 vorgesehen. Danach kann der Nachweis der äußeren axialen Tragfähigkeit der Pfähle auf der Basis von dynamischen Pfahlprobelastungen erbracht werden. Die Widerstandsfaktoren und Streuungsfaktoren für statische Probelastungen werden auch für dynamische Probelastungen verwendet, wenn doppelt so viele Pfähle geprüft werden.

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 Korrelationsfaktoren mit unterschiedlichen Zuschlägen zu versehen. Die höchsten Zuschläge sind im zuletzt genannten Fall anzuwenden.

Der EC7 verlangt die Kalibrierung der Ergebnisse der dynamischen an statischen Probelastungen an vergleichbaren Pfählen in vergleichbarem Boden. Eine Kalibrierung durch Plausibilitätsbetrachtungen und Erfahrungswerte wie in DIN 1054-2005 ist nicht vorgesehen.

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.

Bei Offshorerammpfählen mit Widerständen bis 100 MN ist die Durchführung einer statischen Probelastung nicht möglich.

Deswegen wird vorgeschlagen, die Äquivalenz statischer und dynamischer Probelastungen für gerammte Stahlpfähle im Sand anzunehmen und insofern den Zuschlag zum Korrelationsfaktor so zu wählen, als ob eine Kalibrierung durchgeführt wurde. Unterstützt wird dieser Vorschlag auch durch die nur sehr geringen Streuungen (Variationskoeffizienten  $< 0,05$ ) der aktivierten statischen Tragfähigkeiten bei der je WEA-Standort durchgeführten maximalen Anzahl ( $n=3$ ) dynamischer Probelastungen.

Nicht geregelt ist in der Normung, wie zu verfahren ist, wenn bei der Tragfähigkeitsermittlung die dynamische Probelastung mit vollständiger Modellbildung mit der Auswertung großer Rammerichte 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 kann in Anlehnung an das von AASHTO (American Association of State Highway and Transport Organisations, USA) vorgelegte LRFD - Konzept (Load and Resistance Factor Design) verfahren werden.

## **5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Der Beitrag beschreibt den erfolgreichen Einsatz neuer kabelloser Messtechnik bei der dynamischen Pfahlprüfung von gerammten Stahlrohrpfählen am Beispiel des Windparks BARD Offshore 1. Der wesentliche Vorteil der kabellosen Messtechnik auf Basis der Bluetooth - Übertragungstechnik ist vor allem die zuverlässige Messgrößenerfassung bei sehr langen Pfählen durch Vermeidung von kabelbedingten Messfehlern. Es wurde eine spezielle Methode der Sensorbefestigung entwickelt und erfolgreich angewendet.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass mit der dynamischen Probelastung an Gründungspfählen von Offshore – Bauwerken und durch die Modellbildung mit dem CAPWAP-Verfahren bei zuverlässiger Datenerfassung wesentliche Ergebnisse zur Verfügung gestellt werden können, die über die Standardauswertung beispielsweise bei Ortbetonpfählen onshore hinaus gehen.

Diese Art der Qualitätssicherung ermöglicht ein frühzeitiges Erkennen von Abweichungen zur Planung und die Optimierung der Rammeinrichtung in Bezug auf die tatsächlichen Pfahl-Boden-Verhältnisse. 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.

Die dynamische Pfahlprüfung ist als Instrument der Nachweisführung für die axiale Tragfähigkeit eine effiziente Methode und stellt für Stahlrohrpfähle mit großem Durchmesser (Monopiles) im Offshorebereich die einzige technisch und wirtschaftlich durchführbare messtechnische Lösung diesbezüglich dar. Darüber hinaus können mit zuverlässigen CAPWAP-Analysen Grundlagen zur Abschätzung der horizontalen Tragfähigkeit gegeben werden.

## Literatur

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.

ACP GmbH (2009): *Baugrundhauptuntersuchungsbericht und Baugrund- und Gründungsgutachten BARD Offshore 1, Teilbericht: Windenergieanlagen, A06/001/08.2.01*, vom 26.03.2009, ACP Grundbauplanung Prof. Achmus + CRP Planungsgesellschaft für Grundbau mbH, Hannover

BARD-Gruppe, Pressemitteilung vom 07.12.2010, *Erster Hochsee-Windstrom aus „BARD Offshore 1“, Fünfzehnte Windkraftanlage im Projektfeld installiert*, [www.bard-offshore.de](http://www.bard-offshore.de).

Cooke, R. W. (1974): *The settlement of friction pile foundations*. in: Proc. Conf. Tall Buildings, Kuala Lumpur, Vol. 3, S. 1–16.

DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2007): *Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle (EA-Pfähle)*, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

DIN 1054-2005: *Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau*.

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*, als geotechnischer Spezialbericht zur Veröffentlichung vorgesehen für ASCE Geoinstitute.

Kirsch, F.; Richter, T. (2011): *Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen*, Bautechnik.

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.

Stahlmann, J.; Kluge, K.; Gattermann, J. (2005): *Dynamisch beanspruchte Monopile-Gründungen im Sand*, Pfahl - Symposium 2005, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft Nr. 80.

#### Autoren

---

Dr.-Ing. Matthias Schallert	<a href="mailto:ms@gsp-mannheim.de">ms@gsp-mannheim.de</a>
Dr.-Ing. Oswald Klingmüller	<a href="mailto:ok.@gsp-mannheim.de">ok.@gsp-mannheim.de</a>
GSP - Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH, Mannheim Steubenstraße 46, 68163 Mannheim	<a href="http://www.gsp-mannheim.de">www.gsp-mannheim.de</a> Tel.: 0621 33 13 61
Dipl.-Geol. Rainer Riecke BARD Engineering GmbH, NL Bremen Otto-Lilienthal-Str. 21, 28199 Bremen	<a href="mailto:Rainer.Riecke@bard-engineering.de">Rainer.Riecke@bard-engineering.de</a> <a href="http://www.Bard-Offshore.de">www.Bard-Offshore.de</a> Tel.: 0421 59 660 400
Dr.-Ing. Galal Galal BARD Engineering GmbH, Emden Am Freihafen 1, 26725 Emden	<a href="mailto:Galal.Galal@Bard-Offshore.de">Galal.Galal@Bard-Offshore.de</a> <a href="http://www.Bard-Offshore.de">www.Bard-Offshore.de</a> Tel.: 04921 39 44 00 100