

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig
Heft Nr. 99



Pfahl - Symposium 2015

Fachseminar: 19./20. Februar 2015

Organisation:

Dr. J. Gattermann
P. Stein
H. Sychla
J. Zahlmann

Braunschweig 2015

Maßgeschneiderte Lösungen zur Realisierung von Pfahlprobelastungen unter Wasser

Dr.-Ing Georg Merzenich, Dipl.-Ing. Nils Benecke, Dipl.-Ing. Jan Fischer

Julius Berger International GmbH, Bilfinger Marine & Offshore Systems GmbH, Fichtner
Water & Wind GmbH

1 Einleitung

Der spanische Energiekonzern Iberdrola ist derzeit in der Planungsphase des Offshore-Windparks (OWP) Wikinger in der Deutschen Ostsee. In Wassertiefen von ca. 40 m sollen 70 Windturbinen über Jackets und Pfähle fest im Meeresboden verankert werden.

Zur genaueren Bestimmung der Pfahltragfähigkeiten hat Iberdrola in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgemeinschaft COWI/IMS eine im Vorfeld durchzuführende Pfahltestkampagne geplant, deren Ergebnisse zu einer Absicherung der angenommenen Bemessungsgrundlagen und zu einer optimierten Ausnutzung der Gründungspfähle verwendet werden sollen. Diese Pfahltestkampagne ist aufgrund der Randbedingungen – anspruchsvoller Baugrund, Unterwasserdurchführung – bisher einmalig für den deutschen Offshore Windenergiebereich.

Die Firma Bilfinger Marine and Offshore Systems GmbH (BMOS) wurde von Iberdrola im Mai 2014 mit der Durchführung der Offshore-Tests beauftragt. Die Pfahltestkampagne beinhaltet die Installation von je zwei Testpfählen an insgesamt drei Standorten. Die Installation jedes der sechs Testpfähle wird hierbei messtechnisch erfasst (rammbegleitende Messung / PDA). Neben den sechs Testpfählen wurde je Standort ein weiterer Reaktionspfahl installiert. Für die fachkundige Begleitung der statischen und dynamischen Probebelastungen sowie deren Auswertung war die Firma Fichtner Water & Wind GmbH (FWW) als Experte und Berater verantwortlich.

Nach einer Standzeit von zehn Wochen werden je Standort ein statischer Zugversuch (SLT-T) und ein dynamischer Druckversuch (DLT) ausgeführt. Die gesamten Versuche finden unter Wasser statt.

Neben einer kurzen Beschreibung der gesamten Pfahltestkampagne liegt der Fokus dieses Beitrages in der Ausführung der Pfahlinstallation und der statischen und dynamischen

Probelastungen. Speziell für diese Ausführungen wurden zahlreiche Geräte und Sensoren neu entwickelt, die im Rahmen dieses Berichts beschrieben und dargestellt werden. Insbesondere die Durchführung der statischen Zugversuche ist durch deren Umgebung und Abmessung einzigartig und innovativ.

2 Pfahltestkampagne

Der geplante Offshore Windpark Wikinger befindet sich in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Deutschen Ostsee rd. 34 Kilometer nordöstlich vor der Insel Rügen. Die genaue Lage des Windparks kann Abbildung 1 entnommen werden.

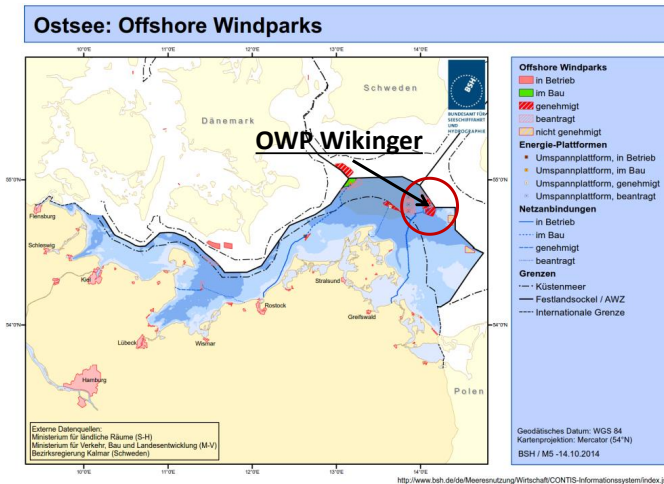


Abbildung 1: Lage des Windparks Wikinger (Quelle: BSH)

Geplant ist die Installation von 70 Windenergieanlagen und einer Umspannplattform. Als Gründungsstrukturen werden sowohl für die Umspannplattform als auch für die Windenergieanlagen Jackets verwendet, die durch gerammte Stahl-Großrohrpfähle fest mit dem Baugrund verbunden sind. Die Wassertiefen im Bereich des Windparks liegen zwischen ca. 36 m und 42 m bezogen auf das Mittelwasser (MW bzw. MSL).

Im Vergleich zu den Nordseesanden existieren über Ostseeböden wie z.B. Geschiebemergel oder Kreide relativ wenige Informationen zum Tragverhalten von Stahl-Großrohrpfählen. Insbesondere in der Kreide entsteht während der Pfahleinbringung oft-

mals ein rascher Verlust der Reibung zwischen Boden und Pfahl (Pfahllängeneffekt bzw. „friction fatigue“), gleichbedeutend mit geringen Pfahlwiderständen am Ende der Ramung. Umso deutlicher ist jedoch der Zuwachs der Pfahltragfähigkeit in der Zeit nach der Installation. Um möglichst realistische Informationen über das Tragverhalten der Gründungspfähle zu erhalten, wurde bauphysikalisch entschieden im Vorfeld der Pfahlinstallation für die Windenergieanlagen bzw. für die Umspannplattform eine umfangreiche Pfahltestkampagne im Baufeld durchzuführen. Eine Übersicht über die Testanordnung und einen Ausschnitt des lokal erkundeten Baugrundaufbaus zeigt Abbildung 2.

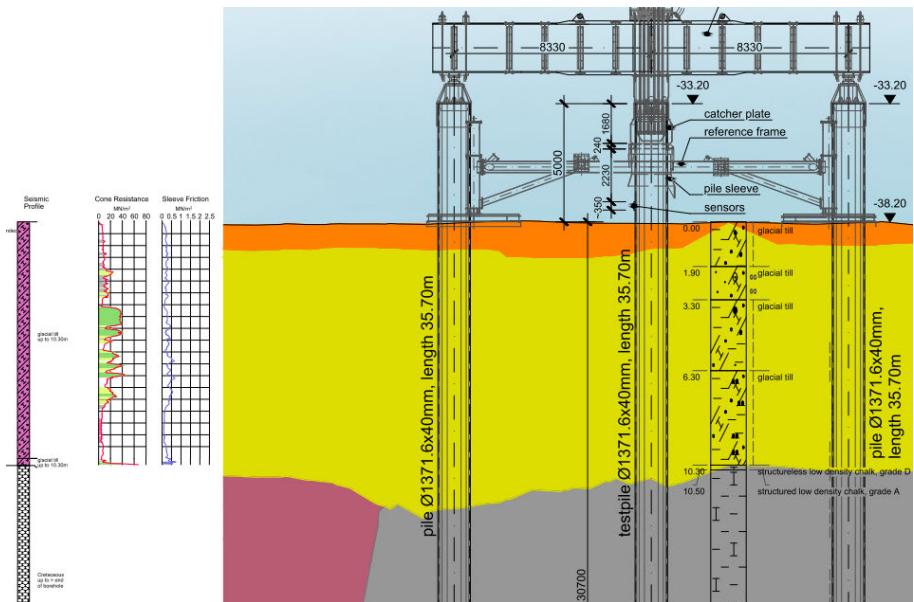


Abbildung 2: Testanordnung SLT-T am Standort WK43

2.1 Baugrund

Ausgehend vom Meeresgrund kann der Baugrund im Bereich des Windparks Wikinger nach (COWI/IMS, 2014) in drei ostseetypische Bodenarten unterteilt werden: Holozäne Ablagerungen (hauptsächlich bestehend aus gering organischem, schluffigen, sandigen und kiesigen Ton), Geschiebemergel (vorbelastet durch die weichselkaltzeitlichen Gletscher) und spätkreidezeitliche Kalksteine (aus dem Maastricht).

2.2 Gliederung der Pfahltestkampagne (Phase II, Phase III)

Die Pfahltestkampagne ist seitens (IBERDROLA, 2014) in vier Phasen aufgeteilt (vgl. Abschnitt 3.1), wobei nachfolgend ausschließlich auf die Phasen II und III eingegangen wird, welche folgende Leistungen beinhalten:

- Phase II:

Installation von sechs Testpfählen an drei Standorten (zwei Pfähle je Standort). Installiert werden insgesamt neun Pfähle (jeweils ein weiterer Reaktionspfahl je Standort) mit einem Hydrohammer. Während der Pfahlinstallation wird der Hydro-schall entsprechend den Vorgaben des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydro-graphie (BSH) reduziert. Die gesamte Rammung der sechs Testpfähle wird mess-technisch erfasst (rammbegleitende Messung). Die Pfahltragfähigkeit am Ende der Rammung wird durch Auswertung der aufgezeichneten Dehnung und Beschleunigung am Pfahlkopf (PDA) mit einem erweiterten Verfahren mit Modellbildung (Signal Matching) bestimmt.

- Phase III:

Statischer Zugversuch (SLT-T) an je einem Testpfahl je Standort nach den Anforder-ungen von (COWI/IMS, 2014).

Dynamische Probelastungen (DLT) als sogenannte Restrike Tests an je einem Testpfahl je Standort nach den Anforderungen von (COWI/IMS, 2014) mit anschlie-ßender Auswertung der Messdaten nach der Signal Matching Methode (erweitertes Verfahren mit vollständiger Modellbildung). Für den SLT-T sowie den DLT wird je-weils ein unterschiedlicher Testpfahl verwendet. Die Standzeit der Testpfähle zwi-schen Installation und Probelastung beträgt mind. zehn Wochen.

Informationen zu den Testpfählen können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Testpfähle

Standort	Wassertiefe [m]	Durchmesser [m]	Pfahllänge [m]	Einbindetiefe [m]
WK38	40,0	1,37	21,8	16,8
WK43	38,2	1,37	35,7	30,7
WK70	36,6	1,37	36,0	31,0

2.3 Nachweis der axialen Pfahltragfähigkeit

Nach (BSH, 2012) sind für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen mit überwiegend axial belasteten Pfählen dynamische Pfahlprobelastungen als Tragfähigkeitsnachweis in axialer Richtung vorzusehen, wobei an mindestens 10% der Anlagenstandorte dynamische Probelastungen durchzuführen sind. Die Ableitung der charakteristischen Tragfähigkeit R_k aus dynamischen Probelastungen, ausgewertet mit einem erweiterten Verfahren mit Modellbildung R_m , erfolgt auf der Grundlage der (DIN 1054, 2010) sowie dem (EUROCODE 7-1, 2009). Die Messergebnisse werden hierbei in Mittel- und Kleinstwert aufgeteilt und durch einen bezogenen Streuungsfaktor ξ_j reduziert, wobei der Minimalwert aus dem Kleinst- und dem Mittelwert die charakteristische Pfahltragfähigkeit R_k bestimmt. Nach (DIN 1054, 2010) sind die Ergebnisse von dynamischen Pfahlprobelastungen an Pfählen in bindigen Böden grundsätzlich an statischen Pfahlprobelastungen auf dem gleichen Baufeld zu kalibrieren.

Aus den Ergebnissen der Testkampagne können alle geforderten Größen abgeleitet und entsprechend die charakteristische Tragfähigkeit der Pfähle aus den Ergebnissen der dynamischen Probelastungen abgeleitet werden. Die Ergebnisse aus der Testkampagne könne in der Folge auch auf Ergebnisse aus dynamischen Probelastungen während der Installation der Gründungsrohre für die Windenergieanlagen beim OWP Wikinger übertragen werden.

3 Aufgabenstellung

Am 21.05.2014 erhielt Bilfinger Marine and Offshore Systems GmbH (BMOS) von Iberdrola den Auftrag zur Durchführung der Pfahltests für den Windpark Wikinger.

3.1 Leistungsumfang BMOS

Beauftragt wurde von Iberdrola ein Paket, dass pauschal sämtliche erforderlichen Leistungen zur Durchführung und Auswertung der beschriebenen Pfahltests beinhaltet:

- Phase I
 - Planung, Herstellung und Lieferung der erforderlichen Geräte und Equipment
 - Herstellung und Lieferung der Testpfähle
- Phase II
 - Mobilisierung des Installationsschiffs und des erforderlichen Equipments.

- Installation der Testpfähle mit geeigneten Lärminderungsmaßnahmen
- Rammbegleitende Messwertaufnahme und Ermittlung der Pfahltragfähigkeit am Ende der Rammung („end of driving“)
- Demobilisierung des Installationsschiffs und des erforderlichen Equipments

Phase III • Mobilisierung des Installationsschiffs und des erforderlichen Equipments.

- Durchführung von 3 statischen Pfahltests
- Durchführung von 3 dynamischen Pfahltests (Restrike-Tests)
- Lärminderungsmaßnahmen
- Entsorgung der Pfähle („decommissioning“)
- Demobilisierung des Installationsschiffs und des erforderlichen Equipments

Phase IV • Auswertung und Analyse der Messdaten und Erstellung des Testberichts

Sämtliche Leistungen wurden in enger Abstimmung mit dem Bauherrn und seinem Geotechnischen Sachverständigen erbracht.

3.2 Anforderungen von Iberdrola

Iberdrola hatte im Vertrag die Randbedingungen für diese Durchführung der Pfahltests angegeben und folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- Vorgabe der 3 Standorte
- Pfahlbemessung für die 3 Standorte einschließlich der maximalen Prüflast
- Geotechnische und geophysikalische Berichte
- Freigabe der Standorte aus UXO-Sicht
- Videos zur Sicht Unterwasser aus der geotechnischen Kampagne

Weiterhin waren die folgenden Anforderungen an die Pfahlinstallation und die Pfahltests zu erfüllen:

- Rammenergie des Hammers soll den Bodenwiderstand vollständig mobilisieren
- Minimale Rammenergie für den „Re-strike Test“ in Phase III: > 80% x 800 kJ
- 2 unabhängige Messwertaufnehmersysteme pro Testpfahl, 1 System besteht aus zwei Beschleunigungsaufnehmern und zwei Dehnungsmessstreifen
- Auslegung und Bemessung des Equipments für die von (COWI/IMS,2014) ermittelte erforderliche maximale Prüflast

- Definition der Versagenskriterien des Pfahls: Erreichen der maximalen Prüflast, Pfahlverformung auf Zug $> 0,1 \cdot D$ (EA-PFÄHLE, 2012) oder Überschreiten des Kriechmaßes
- Zeitlicher Ablauf des statischen Pfahltests mit den zugehörigen Laststufen
- Messwertauflösung der Wegaufnehmer am Pfahlkopf: 0,06 mm
- Messwertauflösung der Kraftmessdosen ≤ 20 kN
- Empfehlung keine „Jack-up Barge“ zu verwenden, um mögliche Einschränkungen aus den dann vorhandenen „Fußabdrücken“ in der zukünftigen Installationsphase der Jackets zu vermeiden: BMOS Wahl DP2-Schiff (siehe auch Abschnitt 4.1)
- Lärmbegrenzung auf 160 dB SEL in 750m Entfernung (gemäß BSH)
- Rammbarkeitsstudien
- Bemessung der Pfähle für weitere temporäre Zustände wie Heben oder Installation
- Installationstoleranzen: ± 3 m horizontal zum vorgegebenen Standort, $\pm 0,25$ m für das vertikale Pfahlkopfniveau, ± 1 % Abweichung zur Senkrechten

4 Ausführungskonzept

Das Ausführungskonzept für die Installation der Pfähle und der mindestens 10 Wochen darauf folgenden statischen und dynamischen Probelastungen sah vor, von einem schwimmenden Schwerlastschiff aus alle geplanten Installations- und Unterwasserarbeiten autark ausführen zu können. Sowohl die Pfähle als auch die erforderlichen Haupt- und Hilfsgeräte wurden von Bord des Schiffes aus, mit Hilfe der zwei bordeigenen 1000 t Kräne installiert.



Abbildung 3: Schwerlastschiff MV LONE im Basishafen Sassnitz

4.1 Installationsschiff MV LONE

Als Installationsschiff kam das Schwerlastschiff MV LONE zum Einsatz (vgl. Abbildung 3). Die MV LONE mit einer Länge von 160,5 m und einer Breite von 28 m besitzt eine freie Deckfläche von ca. 3300 m². Durch die Anzahl an zusätzlich erforderlichen Technikern und Installationspersonal, die die Kapazität des Schiffes überschritt, wurde ca. ein Viertel der Deckfläche für einen zusätzlichen fünfstöckigen Unterkuftsblokk genutzt.

Auf der Backboard Seite des Schiffes befinden sich zwei 1000 to Kräne, die alle projekt-spezifischen Beladungs- und Installationsarbeiten durchführen konnten. Die LONE war durch ihr DP2 System (Dynamic Positioning) in der Lage ihre Position offshore im Rahmen der geplanten Wetterbedingungen stabil beizubehalten, bzw. sich bei Bedarf im Dezimeterbereich genau zu positionieren, um die notwendigen Hebe und Installationsarbeiten durchführen zu können. Durch das schiffsintere satellitengestützte Navigationssystem, sowie das akustische Unterwasserpositionierungssystem wurden die Installationsarbeiten sowohl Über- als auch Unterwasser wirkungsvoll unterstützt (siehe auch 4.5 Vermessungstechnik).



Abbildung 4: Rammschablone im Basishafen Sassnitz

4.2 Rammschablone

Zur Installation der Pfähle kam eine von BMOS in Zusammenarbeit mit der Bilfinger Maschinenteknik speziell für die genannten Projektanforderungen entwickelte Rammschablone zum Einsatz (Abbildung 4). Die Rammschablone mit den Abmessungen von 26,5 m x 19,0 m war eine bis zu 170 to schwere vierfüßige Konstruktion mit bis zu 15 m Höhe, die mit zwei Pfahlhalteebenen die Installation von drei Pfählen in der Reihe und in gleicher Flucht ermöglichte, um die erforderliche Genauigkeit für die später eingesetzte Lasttraverse zu ermöglichen.

Die Rammschablone wurde dafür einmalig auf dem Meeresboden abgesetzt und nach der Installation aller drei Pfähle der jeweiligen Lokation wieder an Bord gehoben. Die Konstruktion war mit verschiedenen Mess- und Kamerasystemen ausgerüstet, um die Unebenheiten des Meeresbodens auszugleichen und die Unterwasserinstallation der Pfähle zu überwachen. Durch die eingebauten hydraulischen Systeme war es möglich die vier Füße der Konstruktion unabhängig voneinander aus- und einzufahren und somit die Schablone zu nivellieren. Die Trichter der oberen und unteren Pfahlführung konnten hydraulisch geöffnet und geschlossen werden, um das Passieren der Sensortechnik am Pfahl und der Rammhaube durch die Rammschablone zu ermöglichen.

Alle Systeme konnten über Versorgungsleitungen, die von der Schablone zum Schiff liefen, vom Hauptdeck aus bedient werden. Zur Installation der Rammschablone wurde diese von der LONE auf dem Meeresboden abgesetzt und das verwendete Hebegeschirr mit Hilfe eines ROV an- bzw. abgeschlagen.



Abbildung 5: Hydraulischer Hammer MHU 800S

4.3 Hydraulischer Hammer

Für die Rammarbeiten wurde der ca. 150 to schwere hydraulische Hammer MHU 800S ausgewählt (siehe Abbildung 5). Der Hammer wurde horizontal an Deck gelagert und für die Rammarbeiten mittels des Heckkrans der LONE aufgerichtet, bevor der Hammer auf den sich unter Wasser befindenden Pfahl mit Hilfe von ROV Überwachung aufgesetzt wurde.

4.4 ROV

Zur Durchführung der auftretenden Überwachungs-, Inspektions- sowie, An- und Abschlagarbeiten kam ein ROV (Remote Operated Vehicle) zum Einsatz. Das ROV wurde mittels LARS System (Launching and Recovery System) ohne Gefahr gegenüber den laufenden Strahlrudern der LONE zur Unterwassereinsatzstelle gebracht.

4.5 Vermessungstechnik

Zur Erfüllung der erforderlichen Installationstoleranzen hinsichtlich der Position des mittleren Pfahls je Lokation, sowie für die Optimierung der Überwachungsmöglichkeiten aller Unterwasserarbeiten, wurden im Bilfinger Kontrollcontainer an Bord der LONE alle Navigationsdaten aus dem Schiffssystem auf einem Monitor visualisiert, wodurch die Offshoremannschaft in der Lage war die tatsächlichen Positionen des Schiffes, der Rammschablone und des ROVs aktuell auf dem Bildschirm zu verfolgen und zu interpretieren.

4.6 Referenzrahmen

Der für den Zugversuch der Phase III erforderliche Referenzrahmen (Abbildung 14) besteht aus einer umgebauten Variante der Rammschablone (vgl. Abschnitt 4.2), deren untere Rahmenkonstruktion mit den vier Füßen beibehalten wurde. In der Mitte des Rahmens wurde eine nach unten weisende Trichterkonstruktion zum Einfädeln des Referenzrahmens über den mittleren Testpfahl montiert. Oberhalb des Trichters liegt ein Ankerring auf der Konstruktion auf, welcher über Extensometersensoren fest mit dem Referenzrahmen verbunden ist. Mit Hilfe der am mittleren Testpfahl außen angeschweißten Knaggen, liegt der Ankerring beim Überstülpen des Referenzrahmens auf diesen Knaggen auf, um beim nachfolgenden Zugversuch die auftretende Verschiebung zwischen Pfahl und Referenzrahmen zu messen.

renzrahmen zu messen. Vergleichbar zur Rammschablone ist auch der Referenzrahmen mit hydraulischen Systemen und Neigungssensoren ausgerüstet, um den Rahmen vor dem eigentlichen Lastversuch zu nivellieren.

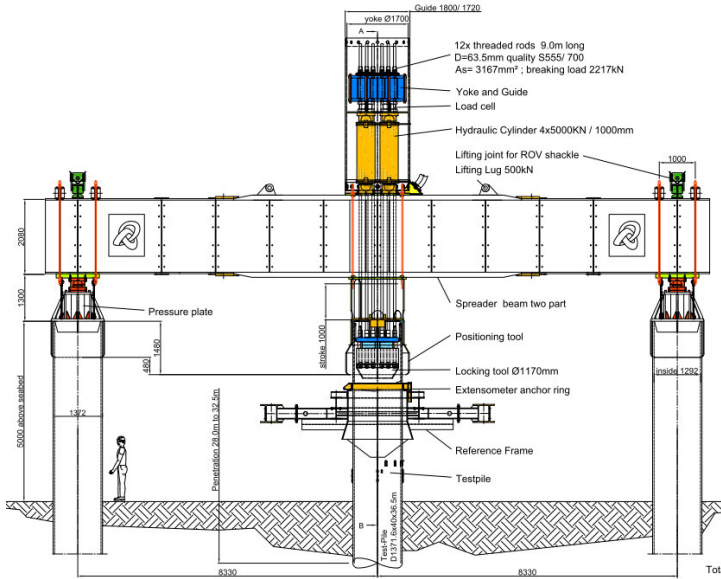


Abbildung 6: Lasttesttraverse mit Reaktionspfählen und Referenzrahmen

4.7 Lasttraverse

Die skizzenhafte Darstellung der Lasttraverse zeigt Abbildung 6. Die Lasttraverse war in ihrer prinzipiellen Konstruktion ein 18,5 m langer und 2 m hoher doppelter I-Träger, der in seiner Mitte mit einer hydraulische Verschlusseinheit („locking tool“) zum Pfahl, sowie mit vier darüber liegenden Pressen ausgestattet war, um die geforderte Zuglast auf den mittleren Pfahl aufbringen zu können. Die jeweiligen Enden des Trägers waren mit Auflagern für die beim statischen Zugversuch genutzten Reaktionspfähle ausgerüstet. Das Gesamtgewicht von Stahlkonstruktion und hydraulischer Einheit lag bei ca. 110 to. Die besondere Herausforderung war die UW-taugliche Planung und Ausführung der Traverse. Wesentlich Bestandteile dieses Konzepts waren die hydraulischen Pressen zur Lastaufbringung und die Lasteinleitung über Joch, Zugstäbe und hydraulisches Verschlusssystem („locking tool“) in den Testpfahl.

In der Installationsphase wurde die Lasttraverse ohne Hydraulik und äußere Auflagerkonstruktionen auf dem Schiff mitgeführt (Abbildung 7). Hierdurch konnten optionale Anpassungen der Traverse an den Ist-Status der drei Pfähle (aufgemessen nach der Installation der Pfähle in der Phase II) kurzfristig durchgeführt werden.



Abbildung 7: Lasttraverse während der Installationsphase

4.8 Lärmschutzkonzept

Zur Minderung der Lärmbelastung auf die Unterwasserfauna während der Rammarbeiten kam ein vorab auf dem Meeresboden abgelegter einfacher Blasenschleier zum Einsatz, der während der Rammarbeiten von einem zusätzlichen Schiff aus mittels an Deck befindlichen Kompressoren mit Luftdruck bedient wurde. Zusätzlich wurde der Rammvorgang mit einem Soft Start begonnen (einzelne Schläge oder Schlagintervalle mit minimaler Energie in entsprechenden Pausenintervallen). Passiv wurden vor Beginn der Arbeiten Unterwasservergrämungssysteme in Form von „Pingern“ und „Seal Scarer“ eingesetzt. Abbildung 8 zeigt den Großen Blasenschleier im Betrieb. Die aufsteigenden Luftblasen sind deutlich an der Wasseroberfläche zu erkennen.



Abbildung 8: Großer Blasenschleier

4.9 Basishäfen

Als anfängliche Mobilisierungshäfen wurden Rostock und Sassnitz gewählt. Im Zuge der Mobilisierung der LONE wurden in Rostock alle Seetransportsicherungskonstruktionen montiert bzw. an Deck aufgeschweißt, sowie die Verladung der aus Aschersleben per Landtransport kommenden Pfähle auf die LONE durchgeführt.

Im Hafen von Sassnitz wurde die restliche projektspezifische Ausrüstung geladen und für die Offshore-Operationen einsatzfähig gemacht und getestet. Durch die kurze Anfahrt in das Wikinger Testfeld von diesem Hafen aus, diente Sassnitz während des Projektes als Schutzhafen, sowie als Re- und Demobilisierungshafen zwischen den Einsatzphasen und nach Abschluss aller Offshorearbeiten.

5 Ablauf Phase II – die Pfahlinstallation

5.1 Messkonzept

Neben der Einbringung der Testpfähle auf die geplante Tiefe bestand die Aufgabe in der Phase II darin, die Rammung messtechnisch als sogenannte rambbegleitende Messung (Pile Driving Analysis / PDA) zu erfassen. Hierbei wird über spezielle UW-Sensoren die Dehnung und Beschleunigung jedes einzelnen Rammschlages in der Nähe des Pfahlkopfes aufgezeichnet. Aus den aufgezeichneten Daten können zahlreiche Informationen über den gesamten Verlauf der Rammung gewonnen werden. Beispielsweise seien hier ge-

nannt: maximale Geschwindigkeit, maximale Kraft, maximale Druck- und Zugspannung, maximale Energie, Übertragungseffizienz zwischen Hammer und Pfahl, Anzahl der Rammschläge oder die Rammzeit. Zusätzlich kann jeder einzelne aufgezeichnete Rammschlag mit einem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung (Signal Matching) ausgewertet werden, um Mantelreibung, Spitzendruck und Gesamttragfähigkeit zu bestimmen. Im Rahmen des Projektes Wikinger wurde mindestens der letzte Rammschlag jedes messtechnisch überwachten Pfahles nach der Signal Matching Methode ausgewertet (hier: Allwave DLT) um Kenntnisse über die Bodenwiderstände am Ende der Rammung gewinnen zu können.

Für jeden Testpfahl sind zwei individuelle UW-Messsysteme zum Einsatz gekommen. Das Messsystem ist in der nachfolgenden Abbildung 9 schematisch dargestellt.

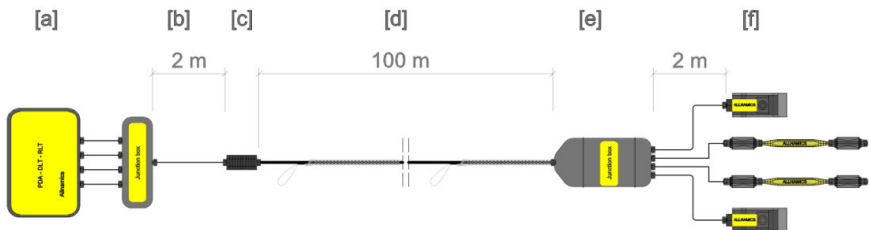


Abbildung 9: Aufbau des UW-Messsystems (Allnamic)

Jedes Messsystem besteht aus jeweils zwei wasserdichten Beschleunigungssensoren und Dehnungsmessstreifen [f], die fest mit dem Pfahl verbunden sind. Die vier Datenkabel je Messsystem werden in einer wasserdichten Verteilerbox [e] gesammelt und über ein ca. 100 m langes Hauptkabel [d] an Borde des Schiffes geführt. Am Ende des Hauptkabels ist ein wasserdichter Stecker [c] zur Unterwasserlagerung zwischen Phase II und Phase III angebracht. Von dem Stecker [c] werden die Informationen aller vier Sensoren über eine weitere Verteilerbox [b] mit der Messwerterfassungsanlage [a] verbunden. Die Lage der Sensoren am Pfahl sowie die sich im Betrieb befindende Messwerterfassungsanlage (PDR) zeigt Abbildung 10.

Aus Vorversuchen konnte eine Wasserdichtigkeit des Messsystems bis in Tiefen von mind. 65 m für den beschriebenen Versuchszeitraum (>10 Wochen) garantiert werden.

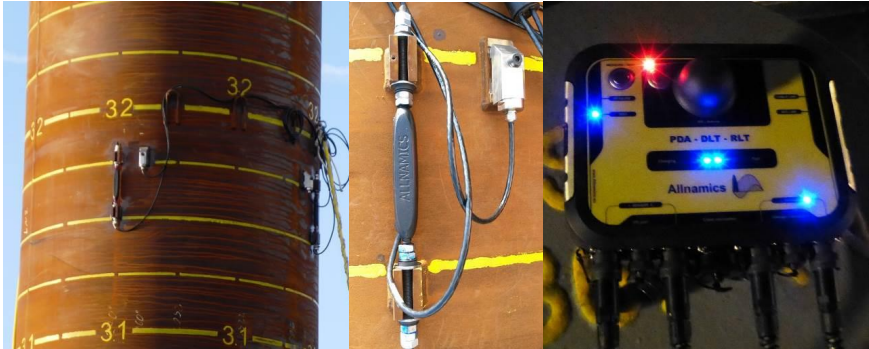


Abbildung 10: UW-Dehnungs- und UW-Beschleunigungssensoren am Pfahl (Links / Mitte), Messwerterfassungsanlage (Rechts)

5.2 Installation

Die Installation der insgesamt neun Rohrpfähle (drei Reaktionspfähle, drei Pfähle für den dynamischen Restrike Test, drei Pfähle für den statischen Zugversuch) wurde schwimmend, vom Deck der LONE durchgeführt.



Abbildung 11: Monitoring der Rammung durch UW Kameras

Nach der Positionierung des DP2 Schiffes an der Lokation wurde in einem ersten Schritt die Rammschablone (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 12) auf dem Meeresboden abgelassen. Anschließend wurde unter Beobachtung eines ROVs jeweils erst der mittlere Pfahl (für den statischen Zugversuch in der Phase III) in die Pfahlführung eingefädelt und abgesetzt, der Hammer aufgesetzt und in der Folge auf die geplante Absetztiefe geschlagen. Die Überwachung der Pfahleindringung erfolgte durch in zwei Ebenen am Template befestigte Kameras. Beispielhaft zeigt Abbildung 11 den Pfahl im oberen Bereich des Template

tes, aus einer Entfernung von ca. 1,0 m sowie im unteren Bereich des Templates aus einer Entfernung von $> 0,5$ m.

Durch die Überwachung der Pfahleindringung konnte sichergestellt werden, dass die hydraulisch verfahrbare obere und untere Pfahlführung rechtzeitig, bevor die Sensorebene diesen Bereich erreicht, geöffnet wurde. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass es zu keinem Kontakt zwischen Sensoren, Kabeln und der Pfahlführung kommt. Analog wurden in der Folge die beiden weiteren Pfähle eingebracht, wobei nur der für den Restrikt-Test konzeptionierte Pfahl messtechnisch bestückt war und hier ebenfalls die Rammung kontinuierlich aufgezeichnet wurde (PDA). Einzelne Ereignisse aus der Phase II zeigt Abbildung 12.

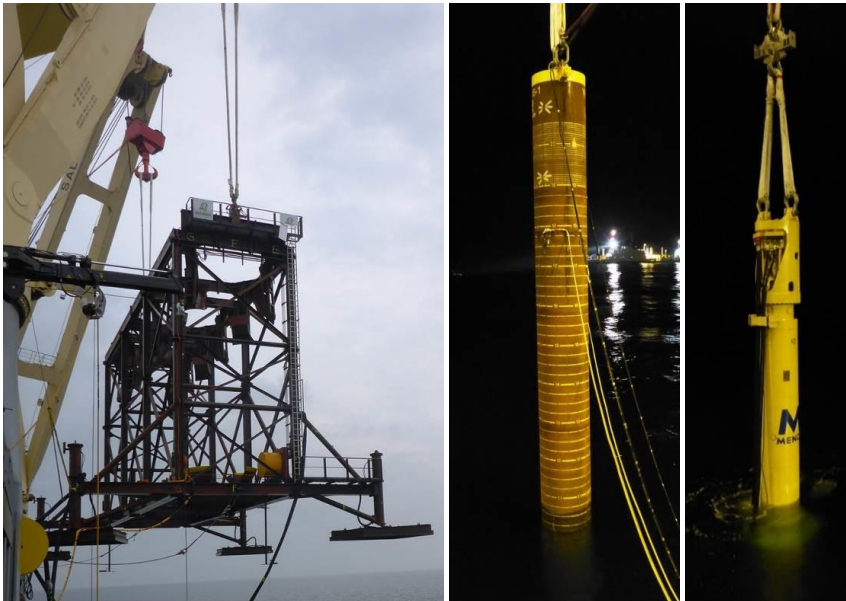


Abbildung 12: Installation der Testpfähle in der Phase II

Nach der Fertigstellung der Rammarbeiten wurde das jeweilige Hauptkabel der Messsysteme auf dem Meeresboden mittels ROV neben dem zugehörigen Pfahl kontrolliert abgelegt. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass die Kabel in der Zeit zwischen Phase II und Phase III gesichert im Bereich der Pfähle liegen.

5.3 Ergebnisse

Alle neun Pfähle konnten innerhalb kürzester Zeit installiert werden, wobei die geforderte Einbindetiefe zentimetergenau eingehalten wurde. Der nach dem BSH geforderte Grenzwert von 160 dB (SEL) bzw. 190 dB (peak-to-peak) in 750 m Entfernung konnte bei allen Testpfählen eingehalten werden.

Die nach der Installation der insgesamt drei Testpfähle je Lokation gemessene Abweichung aus dem geplanten Lot betrug nur wenige Millimeter bis Zentimeter. Während der rambbegleitenden Messungen konnte an jedem Pfahl jeder einzelne Rammschlag durch beide Messsysteme (redundantes System) erfasst werden. Kein einziger Sensor ist während der Pfahlinstallation ausgefallen. Neben der Robustheit der Sensoren ist dies auch durch das rechtzeitige Öffnen der jeweiligen Pfahlführung am Template zu begründen, ohne hierbei Einbußen in Bezug auf die Lotrechte der Pfähle in Kauf zu nehmen.

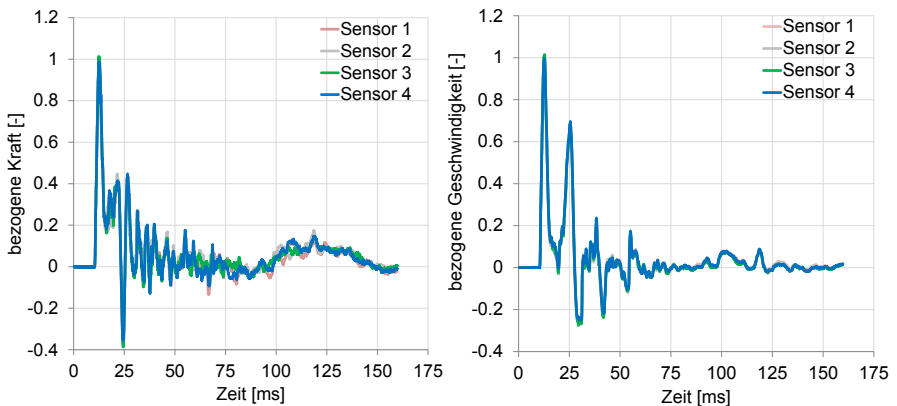


Abbildung 13: bezogene Kraft und Geschwindigkeit über die Zeit (letzter Rammschlag)

Beispielhaft zeigt Abbildung 13 das Messergebnis als bezogene Kraft und Geschwindigkeit über die Zeit für den letzten Rammschlag eines Testpfahles. Alle vier Sensoren (zwei Messsysteme) zeigen identische Messwerte. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass alle Sensoren auch noch am Ende der Rammung voll funktionstüchtig waren

Zusätzlich konnten die im Rahmen von Voruntersuchungen durchgeführten Rammsimulationsstudien der Fichtner Water & Wind GmbH (FWW), Hamburg durch die Messergebnisse bei der Pfahleinbringung bestätigt werden. Sowohl die Eindringung der Pfähle aus

Eigengewicht als auch die Anzahl der Rammschläge über Einbindetiefe zeigten sehr ähnliche Ergebnisse im Vergleich mit den Simulationen.

Die gesamte Installation der Pfähle in der Phase II kann daher als großer Erfolg gewertet werden.

6 Ablauf Phase III – der statische Pfahltest

6.1 Messkonzept

Nach Ablauf der erforderlichen 10-wöchigen Wartezeit wurde das Installationsschiff LONE wieder mobilisiert. Die Wartezeit wurde für die erforderlichen Um- und Anbauarbeiten des Testequipments genutzt wie z.B.:

- Umbau der Rammschablone zum Referenzrahmen (siehe Abbildung 14)
- Umbau der Lasttesttraverse

Zu den verwendeten Messgeräten gehörten u.a. die zwischen Testpfahl und Referenzrahmen angebrachten Wegaufnehmer, die Kraftmessdosen zwischen Hydraulikpressen und Joch oder Neigungssensoren auf der Lasttraverse.

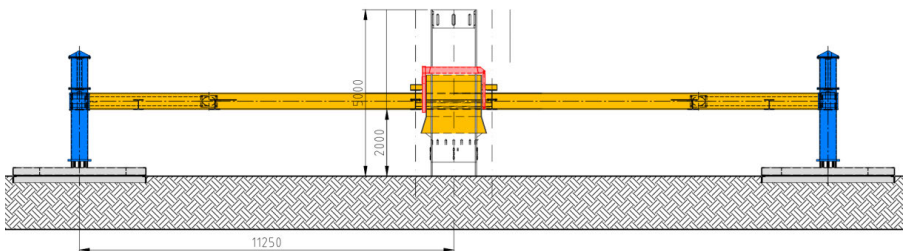


Abbildung 14: Referenzrahmen mit Wegaufnehmersystem

Weiterhin verfügte der für den dynamischen Restrike Test vorgesehene Testpfahl über das in Abschnitt 5.1 beschriebene redundante UW-Messsystem.

6.2 Durchführung des statischen Zugversuchs

Bei Erreichen der jeweiligen Lokation und nach Abschluss der groben Positionierung des Installationsschiffes LONE wurden im ersten Schritt die auf dem Meeresboden abgelegten

Sensorkabel geborgen und an Deck gesichert bzw. an das Messsystem angeschlossen. Alle Sensoren zeigten, dass sie die Zeit unter Wasser schadlos überstanden haben.

Im zweiten Schritt wurde der Referenzrahmen über den mittleren Pfahl gestülpt und auf dem Meeresboden abgesetzt. Die Wegaufnehmer wurden hierbei mit dem Pfahl verbunden. Nach der Nivellierung des Rahmens wurde die Lasttraverse in den mittleren Pfahl eingefädelt und danach für das Einführen der Auflager in und auf die Reaktionspfähle mit dem ROV entsprechend orientiert. Vor Beginn des eigentlichen Tests wurde der Zugpfahl fest mit der Lasttraverse verbunden.

Der Versuch wurde entsprechend der Vorgaben des Bauherrn gesteuert. Die schrittweise Be- und Entlastung wurde EA-Pfähle konform in drei Laststufen bis zu charakteristischen Last gefahren, entlastet und im Anschluss in mind. 12 weiteren Laststufen bis zur Maximallast gefahren. Abschließend wurde die Last in vier Lastschritten bis zur Vorlast entlastet.

Während des Versuches wurden die Pfahlhebung sowie die aufgebachte Last hochfrequent gemessen und protokolliert. Das Kriechkriterium konnte versuchsbegleitend zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden.

Nach Abschluss aller Arbeiten wurde die Verbindung zwischen Zugpfahl und Lasttraverse gelöst und die Lasttesttraverse zurück auf das Schiff gehoben. Der Referenzrahmen verblieb zunächst auf dem Meeresboden, um durch daran montierte und ausgerichtete Kamerasysteme die Setzung des nächststehenden Testpfahls für jeden Rammschlag bei der dynamischen Probelastung zu erfassen.

6.3 Dynamische Probelastung (DLT)

Bei der dynamischen Probelastung (Restrike Test) wurde der Hammer auf den messtechnisch bestückten Pfahl (vgl. Abschnitt 5.1) aufgesetzt und durch einen Rammschlag mit möglichst hoher Energie belastet. Während des Rammschlages wurden die Pfahldehnung und die Pfahlbeschleunigung über die Sensoren hochfrequent (Abtastrate von ~45.000 Hz) in der Messebene erfasst. Mit Hilfe der am Referenzrahmen befindlichen Unterwasser-Kamera wurde zudem die Bewegung des Pfahls infolge des Rammschlages protokolliert (vgl. Abbildung 16).

6.4 Ergebnisse

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis einer statischen Probelastung (links) sowie einer dynamischen Probelastung (rechts). Die Ergebnisse wurden nach einer Standzeit von mehr als 10 Wochen aufgezeichnet.

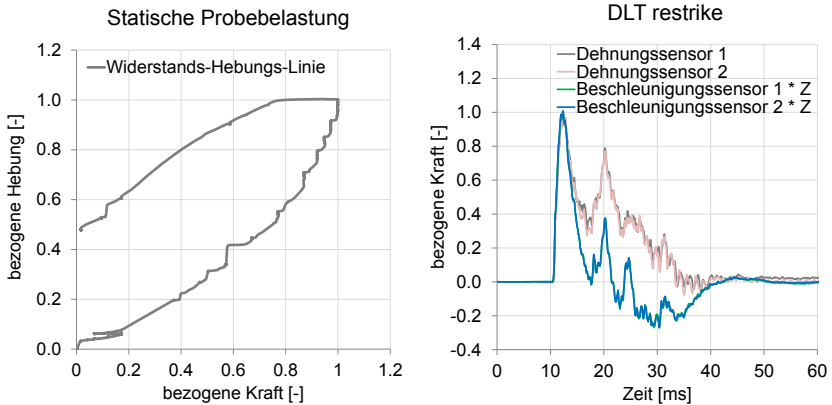


Abbildung 15: Statische und dynamische Probelastung

Durch die gewählte Messtechnik für die statische Probelastung (Zug) konnten alle Kriterien wie maximale Zugkraft, maximale Verformung sowie das jeweilige Kriechkriterium exakt gemessen und nachgewiesen werden. Das Ergebnis der statischen Probelastung kann, insbesondere durch die Lage des Versuches in einer Wassertiefe von ca. 40 m, als hervorragend bewertet werden.

Vergleichbare, sehr gute Ergebnisse wurden auch bei der dynamischen Probelastung (Restrike Test) des direkt angrenzenden Probepfahles erzielt. Gezeigt ist der Verlauf der Kraft $F(t)$ sowie der mit der Pfahlimpedanz multiplizierten Geschwindigkeit $v \cdot Z(t)$. Sowohl die Dehnungssensoren also auch die Beschleunigungssensoren zeigen einen nahezu identischen Verlauf. Die Deckungsgleichheit (Proportionalität) zwischen $F(t)$ und $v \cdot Z(t)$ im Anfangsbereich bestätigt ebenfalls die sehr gute Qualität der Messdaten. Die Setzung des Rammschlages wurde durch eine auf den Pfahl gerichtete und am Referenzrahmen befestigte Unterwasser-Kamera gemessen. Das Bild der Unterwasserkamera zeigt Abbildung 16.

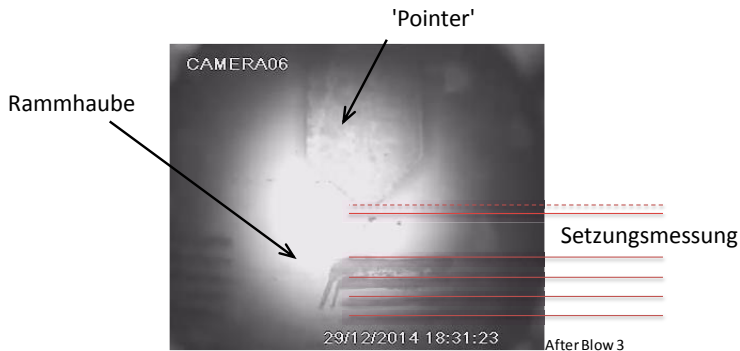


Abbildung 16: UW-Kamera (Blick auf Rammhaube und 'Pointer')

7 Zusammenfassung

Iberdrola leistet mit der in dieser Form bisher einmaligen UW-Pfahltestkampagne in Wassertiefen bis 40 m Pionierarbeit für die Offshore-Windenergiebranche. BMOS konnte die Versuche mit innovativem Know-How erfolgreich durchführen.

- Die Installation der Pfähle mit Hilfe der maßgeschneiderten Rammschablone führte zu den erforderlichen Genauigkeiten der Testpfähle hinsichtlich Neigung und Abstand zueinander oder Einbindetiefe am Ende der Rammung.
- Das Messkonzept aus Neigungssensoren, unterstützenden Kameraaugen an Rammschablone und ROV oder Dehnungs- und Beschleunigungsaufnehmern erlaubte die zuverlässige Aufzeichnung und Dokumentation der Pfahlinstallation
- Ein Hindernis war die zeitweise schlechte Sicht in der Nähe des Seebodens
- Die statischen Pfahltests konnten mit dem eigens entworfenen Gerät zuverlässig und somit erfolgreich durchgeführt und dokumentiert werden.
- Im Rahmen der dynamischen Probelastungen (Restrike Tests) konnten Dehnung, Beschleunigung und Setzung in der geforderten Qualität und Größe erfasst werden.
- Sämtliche für die Durchführung der „Wikinger“-Pfahltests entwickelten Geräte haben ihre Aufgabe erfüllt und somit maßgeblich zu einem erfolgreichen Projekt beigetragen.

Literatur

BSH; Standard Konstruktion, Anwendungshinweise für den Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“, *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)*, Hamburg, 19.01.2012

COWI/IMS; Pile load test concept - based on geotechnical main campaign, *Wiking Offshore Windfarm, Document no: A031412-008-RP, Version 2.1*, 14.05.2014.

DIN 1054:2010-12; Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, *Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN)*, Berlin

EA Pfähle; Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle", *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.*, Ernst und Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2012

Eurocode 7-1 / DIN EN 1997-1:2009-09: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009, *Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN)*, Berlin

Iberdrola, Schedule 1 – Scope of Works, *Wiking Offshore Windfarm, Document ID: WIK-CIV-T-IB-0518 Schedule 1, Revision 7*, 19.05.2014.

Autoren

Dr.-Ing. Georg Merzenich	georg.merzenich@int.julius-berger.com
Julius Berger International GmbH	www.julius-berger-int.com
Gustav-Nachtigal-Strasse 3, 65189 Wiesbaden	Tel.: +49 611 708 737

Dipl.-Ing. Nils Benecke	nils.benecke@bilfinger.com
Bilfinger Marine & Offshore Systems GmbH	www.offshore.bilfinger.com
Kanalstrasse 44, 22085 Hamburg	Tel.: +49 40 22923 144

Dipl.-Ing. Jan Fischer	Jan.Fischer@fww.fichtner.de
Fichtner Water & Wind GmbH	www.fww.fichtner.de
Hammerbrookstrasse 47b, 20097 Hamburg	Tel.: +49 40 300673 303