

Dynamische Probelastungen von Gründungspfählen für Offshore-Windenergieanlagen

Oswald Klingmüller und Matthias Schallert

Zusammenfassung

Die dynamische Probelastung ist ein eingeführtes Verfahren zum Nachweis der axialen Tragfähigkeit. Langjährige Erfahrung aus vielen Projekten der Rammung für Gründungspfähle von Offshore Windenergieanlagen zeigt allerdings, dass weder die Details der praktischen Durchführung noch die Probleme der Auswertung und der Tragfähigkeitsnachweise in der Planungsphase ausreichend beachtet werden. Die Probleme werden diskutiert und gezeigt, dass durch sorgfältige Planung und Integration der Prüfung in den gesamten Ablauf der Pfahlrammung der Charakter eines Standardverfahrens erhalten werden kann.

Abstract

Dynamic Pile Load Testing can be accepted as the state-of-the art of verification of axial pile capacities for driven piles. However the long time experience of a large number of foundation pile installation and pile testing for offshore wind turbines showed that the details of testing and measurement as well as the problems of evaluation and capacity verification are in many cases not cared for with due diligence. The problems will be discussed and it is shown what should be observed to execute the dynamic load test as a standard procedure for capacity verification of axially loaded piles.

1. Einleitung

Durch die BSH-Richtlinie ist die dynamische Probelastung als Standardverfahren für den Nachweis der axialen Tragfähigkeit von Pfählen für Offshore-Windenergie-Anlagen eingeführt. Da das Verfahren nicht nur bei Onshore oder Nearshore sondern auch bei Offshore-Konstruktionen in vielen Fällen erfolgreich eingesetzt worden ist, ist es prinzipiell richtig, das Verfahren als Standardverfahren anzusehen. Allerdings wird dabei häufig übersehen, dass das Verfahren zwar Standard ist, aber eine komplexe Verbindung von Messung und Auswertung erfordert.

Für die Messung der Dehnungen und Beschleunigungen am Pfahlkopf muss eine fortgeschrittene Messtechnik richtig eingesetzt werden. Das erfordert ausreichend Vorbereitung und genaue Berücksichtigung vieler Details der Pfahlbewegung und der Hammersteuerung.

Die ausführenden oder auch planenden Firmen von OWEA bemerkten Schwierigkeiten bei der Einbindung der dynamischen Probelastungen in den Installationsablauf für die Bauwerkspfähle. Bei einigen Projekten in der jüngsten Vergangenheit konnten die Messungen nicht bis Ende der Pfahlrammung durchgeführt werden.

Darauf basiert eine Überlegung die dynamischen Probelastungen statt baubegleitend an Bauwerkspfählen zukünftig bereits im Vorfeld der Installation der OWEA an Probepfählen offshore durchführen zu lassen.

Auch die Verwendung instrumentierter Follower kann die Prüfung vereinfachen. Die Kosten können dadurch ausgeglichen werden, dass Störungen der Produktionsrammung vermieden werden und Prüfungen auch zu beliebigen Zeiten nach der Installation ausgeführt werden können.

Folgende Punkte sollen von den Beteiligten auf jeden Fall beachtet werden:

- Dynamische Pfahlprüfungen sind bei Stahlbaunachweisen zu berücksichtigen, da zur Befestigung von Sensoren Bohrungen anzubringen sind,
- Dynamische Pfahlprüfungen greifen in den Installationsprozess/Rammvorgang ein, da irgendwann die Sensoren anzubringen sind und dadurch die Bewegungen der schweren Pfähle eingeschränkt sind,

- Üblicherweise befinden sich die Sensoren an der Außenseite und sind mit Kabeln an den Prozessor an Deck angeschlossen (siehe Bilder 1 und 2).
- Die an der Außenseite der Pfähle montierten Sensoren müssen mit den Kabeln während der Hebevorgänge der Pfähle geschützt werden.
- Bei kabelloser Übertragung sollte Sichtkontakt bestehen (siehe Bild 3). Deswegen können die Pfähle mit Sensoren auch nur eingeschränkt in Hülsen oder Anlagen zur Lärminderung gerammt werden
- Um den geotechnischen Nachweis zu erbringen, muss berücksichtigt werden, dass zum Ende des Einrammens ein anderer Widerstand (static resistance to driving SRD) aktiviert wird als bei Beginn des Nachrammens und dieser sich vom statischen Widerstand möglicherweise unterscheidet. **Der Rammprozess, insbesondere in Bezug auf die aufzubringende Energie, muss sich danach richten.** Die Messung ist auch eine Kontrolle der Energieangabe des Hammersystems.
- Ob der Pfahl und die Sensoren für eine Nachrammung zur Verfügung stehen können oder müssen, muss weit im Vorfeld geklärt werden. Die Hammersteuerung muss eine sinnvolle Nachrammung ermöglichen – volle Energie zu Beginn des Nachrammens.

2. Praktische Durchführung der Messungen

Obwohl die BSH-Richtlinie (Anwendungshinweise zum Standard „Konstruktion ...“) in 2011 eingeführt wurde, gibt es bei der Durchführung von dynamischen Pfahlprüfungen Offshore vermeidbare Schwierigkeiten.

Ein Grundproblem besteht darin, dass die Messung nicht rechtzeitig in den Planungsablauf integriert wird, sondern als Maßnahme angesehen wird, mit der man sich immer noch beschäftigen kann (d.h. auch diese Leistungen zu beauftragen), wenn alles andere wie z.B.

Kauf der Rohre, Chartern des Rammschiffes mit Hammer, Festlegung der Konstruktionen der Pfahlführung zum Rammen, etc. geregelt ist. Dies geschieht dann also zu einem Zeitpunkt, zu dem aus messtechnischer Sicht nur noch wenig oder nicht mehr geplant sondern nur noch reagiert werden kann, siehe einige Fallbeispiele.

Die Durchführung der Messungen führt dann als Konsequenz zwangsläufig zu einer unvorhergesehenen Behinderung des Rammens und evtl. zu Nachträgen der installierenden Firma gegenüber dem GU/Betreiber.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist, dass für die Messungen Sensoren kraftschlüssig am Pfahl montiert werden müssen. Als sicheres System dafür hat sich das Anschrauben in Gewindebohrungen bewährt. Die Bohrungen werden bei dickwandigen Rohren (>40 mm Wandstärke) als Sacklöcher ausgeführt. Hierfür gibt es abgesicherte gute Erfahrungen für über 5.000 Rammschläge je Messung (siehe Bilder 1 und 2). Möglich ist auch das Durchstecken eines langen Bolzens mit Kopf und Gewinde zum Festschrauben der Sensoren. Hierfür gibt es noch keine Erfahrungen für große Schlagzahlen bei großen Wandstärken.

Als nicht ausreichend dauerhaft hat sich das Ankleben gezeigt. Verschiedene Klebstoffe kamen zum Einsatz.

Bei der Befestigung auf aufgeschweißten Blechstücken mit 20 mm Dicke ist die genaue Position und Ausrichtung der Stücke zu beachten (siehe z.B. Fischer e.a. Pfahlsymposium 2011).

Ein dritter wichtiger Aspekt ist die Planung der Kabelführung von den Sensoren zum Messgerät (hauptsächlich für Fälle mit Unterwasserrammung). Dafür müssen sowohl die Installationsprozedur als auch konstruktive Details aller Elemente, die mit Pfahllagerung, Up-ending und Rammung zu tun haben, möglichst genau bekannt sein. In einigen Fällen kann es aufgrund des erstgenannten Punktes sein, dass - bedingt durch gegebene Konstruktionen und Abläufe - nicht die für die Aufgabe erforderliche Messtechnik zum Einsatz kommen kann

sondern Spezialanfertigungen erforderlich werden oder aus Zeitmangel die Lieferzeiten für die richtige Messtechnik nicht ausreicht und deshalb verfügbare Standardmesstechnik verwendet werden muss, deren Funktionstauglichkeit für die entsprechende Aufgabe erst bei Durchführung der projektspezifischen Messung festgestellt werden kann.

Bei einigen Prüfungen bestanden Schwierigkeiten, die Sensoren auf der Außenseite zu montieren. Es wurde deswegen eine Lösung mit innenmontierten Sensoren ausgeführt. Hierbei war es erforderlich, ein zusätzliches Loch für die Durchführung der Kabel zu bohren, da bei innenliegender Messtechnik eine Funkübertragung nicht möglich ist.

Für diese Anwendungen wurde die Verwendung eines autonomen Messsystems ohne Kabelverbindung skizziert. Technisch wäre es möglich, einen Datenlogger bei jedem Sensorpaar zu montieren, der auch bei den hohen dynamischen Beanspruchungen in der Lage ist, die Mess-Daten aufzuzeichnen. Allerdings kann die Rammung dann nicht durch die Messung on line verfolgt werden. Erst nach abgeschlossener Rammung können die Datenlogger durch Taucher-/ROV-Einsatz wiedergewonnen und die Messungen überprüft und ausgewertet werden.

Obwohl die Technik prinzipiell machbar ist, ist sie aber nicht direkt verfügbar, da es noch keine Anwendungen gab. Die Entwicklung bis zur Einsetzbarkeit dauert mindestens 6 Monate.

Aufgrund letztgenannter Problematik hat die GSP alternativ zur Messung unter Wasser die Messung an einem „Follower“ (auf dem Testpfahl aufgesetztes Rohr gleicher Impedanz) mit kabelloser Messtechnik und Datenübertragung per Funk bereits mehrfach vorgeschlagen. Auf Grund der hohen Kosten wurde auf diesen Vorschlag bisher jedoch nicht eingegangen. Falls der Nachweis der Gleichwertigkeit der Ergebnisse hierbei als Problem angesehen würde, könnte dieser leicht durch gleichzeitige Messung am Testpfahl und Follower und entsprechendem Vergleich der Messungen und der Auswertung erbracht werden.

3. Der Tragfähigkeitsnachweis

Üblicherweise fragen die Auftraggeber direkt nach der Messung nach den Ergebnissen. Dass die Auswertung Zeit braucht, wird häufig nicht zur Kenntnis genommen.

Die Messingenieure müssen vor Ort Zeit und die technischen Möglichkeiten haben, die Messdaten von Bord auszuwerten bzw. ins Büro zu schicken. Die technischen Möglichkeiten dafür sind in vielen Fällen begrenzt. Bei Rammungen mit 5.000 Schlägen hat eine Datei mit allen Rammschlägen eine Speichergröße von bis zu 100 MB. Es kann bis jetzt von Bord höchstens ein komprimiertes File mit ca. 1 MB geschickt werden. D.h. die vollständige Auswertung muss warten oder wenn möglich an Bord erfolgen.

Nach dem Ende des Messens müssen die Ingenieure meist sofort packen, werden ausgeflogen oder per Schiff an Land gebracht, da der Platz gebraucht wird für die Arbeiter, die für das VergROUTEN oder ähnliche Arbeiten zuständig sind. Ausschlafen ist auch wichtig. Es vergehen also mindestens 1 bis 2 Tage bevor mit der Auswertung nach der Messung begonnen werden kann.

Die Prüfung der gemessenen Signale, die Auswahl von Signalen für die Modellbildung, die Modellfindung an sich, der Abgleich der Ergebnisse der Modellbildung mit Bodenprofil, eine Kalibrierung etc., das alles sind einige Ingenieurstunden je Messung. Der Ergebnisbericht mit den $R_{c,m}$ -Werten kann also frühestens nach 1 Woche beim Auftraggeber abgegeben werden. Dieser schickt ihn zu seinem Auftraggeber, der schickt ihn zu seinem geotechnischen Sachverständigen, dieser schickt einen Bericht zur Bauherrschaft, diese zum geotechnischen Sachverständigen, dieser fertigt einen Bericht, dieser wird dem Zertifizierer und oder den prüfenden Behörden vorgelegt, diese gibt ihn gegebenenfalls an ihre Berater zur Stellungnahme und kommt dann eventuell für Rückfragen zurück zu den Spezialisten, die die Messungen ausgeführt und ausgewertet haben.

Theorie:

Der Rammschlag erzeugt bei einem Schlag eine ausreichende Setzung, so dass alle Widerstände aktiviert werden können.

Bei einem der letzten Schläge des Einrammens ist der Widerstand kleiner als nach einer gewissen Wartezeit, die Auswertung ergibt eine untere Schranke der Tragfähigkeit, d.h. Festwachsenlassen lohnt sich.

Praxis:

Beim Rammen wird zwar eine bleibende Setzung erzeugt, es werden aber nicht alle Tragfähigkeiten an Mantel und Spitze aktiviert.

- Beim **Einrammen** wird durch die immer wiederkehrende Bewegung die Mantelreibung je nach Boden mehr oder weniger stark reduziert. Die Mantelreibung ist somit in der Nähe der Pfahlspitze am größten. Durch diese Änderung der Mantelreibung kann es sein, dass der während des Einrammens tatsächlich mögliche Rammwiderstand gar nicht vorhanden ist.
- Der Hammer hat nicht die für die Aktivierung nötige **Rammenergie**. Nach einer Faustformel sollte die Gewichtskraft der Fallmasse (bzw. die Energie) ca. 2% der Prüflast betragen, also $20 \text{ MN} = 20.000 \text{ kN}$ Prüflast $R_{c,m}$ erfordert eine Fallmasse von 400 kN (40 t), bzw. eine Rammenergie von mindestens 400 kJ . Wenn ein Hammer mit Spezifikation 900 eingesetzt wird, also theoretisch eine Energie von 900 kJ aufbringen kann, könnte er auch 45 MN aktivieren, wenn diese Energie im Pfahl ankommt. Im Pfahl gemessen wird üblicherweise 90% der nominellen Energie. Wenn der Hammer nicht richtig funktioniert und nur 250 kJ aufbringt, liegt der aktivierbare Widerstand nur bei $12,5 \text{ MN}$. Vorstehende Angaben sind Schätzwerte und sehr von den aktuellen Verhältnissen abhängig.
- Soll die Tragfähigkeitserhöhung durch Festwachsen beim **Nachrammen** bestimmt werden, ist vor auszuplanen:

- Der Pfahl muss zugänglich sein.
- Da Rammschiff muss evtl. für wenig Rammeinsatz mobilisiert werden.
- Die Messtechnik muss funktionsfähig sein.
- Der Hammer muss zu Beginn des Nachrammens die volle Rammenergie mind. Die Energie vom Ende des Rammens aufbringen.

Vor allem der letzte Punkt ist den Geotechnikern bei der Planung nicht als Problem bekannt. Messungen zeigen, dass Hämmer meist nicht mit dem ersten Schlag des Nachrammens die volle Energie erreichen können. Bei den Offshore eingesetzten Hydraulikhämmern dauert es mindestens 1 bis 2 Schläge bis der Öldruck und die Fließgeschwindigkeit des Hydrauliköls die volle Energie erlauben.

Bei einem der letzten Einsätze war vorgegeben, 5 einzelne Hammerschläge beim Nachrammen im Minutentakt aufzubringen, um die Meeresfauna (speziell Wale) zu vergraulen. Insofern wird beim Nachrammen das theoretisch sinnvolle Vorgehen nie erreicht.

- Häufig ist auch der Hammer so dimensioniert, dass er den Rammwiderstand beim Einrammen überwindet und den Pfahl auf Endtiefe einbringen kann, den Pfahl im festgewachsenen Zustand aber nicht mobilisieren kann. Gegebenenfalls kann der Pfahl bewegt werden und es erfolgt ein sukzessives Auflösen der Mantelreibung im oberen Bereich und Aktivierung der Mantelreibung im unteren Bereich bis zur vollen Aktivierung Spitzendrucks.
- Die Tragfähigkeiten aus der Auswertung mit Modellbildung eines Einzelschlages beim Rammen und beim Nachrammen stellen somit immer untere Schranken des Widerstandes dar, bzw. liegen auf der sicheren Seite.

Fazit: Wenn die für die dynamische Prüfung vorgesehenen Experten ausreichend frühzeitig in die geotechnische Nachweisführung und die Arbeitsvorbereitung eingebunden wird, kann das Verfahren als Standardverfahren erfolgreich und nahezu problemlos eingesetzt werden.

Bei einem Projekt hat die sich gezeigt, dass seitens des AG der Nutzen der Informationen aus den dynamischen Probelastungen erkannt wurde und deshalb baubegleitend und standortspezifisch sowohl der Prüfumfang (mehr Testpfähle) als auch der Auswertumfang (zusätzliche Auswertung von Einzelschlägen in verschiedenen Einbindetiefen, Ausnutzung von unplanmäßigen Ramppausen für weitere Auswertungen zum Festwachsen) erhöht wurde. Die Information über den standortspezifischen Festwachs faktor, bestimmt durch Restrike-Tests, war auch hilfreich für den Tragfähigkeitsnachweis nach EC7.

Andere Fälle haben gezeigt, dass die möglichst genaue messtechnische Ermittlung des Festwachsens unabdingbar für die Nachweisführung ist, da die Prognosen der Tragfähigkeit am Ende der Rammung nicht nachweisbar waren. Daraus kann man die Schlussfolgerung ableiten, dass die zur Verfügung stehenden Prognoseverfahren auch bei entsprechender Baugrunderkundung am konkreten Standort die Streuungen der Bodeneigenschaften und die Arbeitsweisen der Rammgeräte nicht immer zutreffend abschätzen.

Insbesondere bei Standorten nahe lokaler Inhomogenitäten (z.B. Rinnenstrukturen in der Nordsee) kann die Tragfähigkeit des gleichen Pfahlsystems auch lokal sehr schwanken.

Aus diesen Gründen ist zu empfehlen, bei der jetzigen Praxis baubegleitender dynamischer Probelastungen zu bleiben und zusätzlich Restrike-Test zu fordern. Die Durchführung von Messungen an Probepfählen im Vorfeld kann wichtige Informationen liefern, die Einfluss auf Pfahldesign und Rammsystem des Projekts haben können. Eine projektspezifische zusätzliche Anordnung solcher Probepfähle kann also durchaus sinnvoll sein.

Eine konkrete Zeitangabe zu definieren, wann vor Rammbeginn die Messungen geplant sein müssen, ist schwierig anhand der Erfahrungen abzuleiten. Selbst wenn die erste

Kommunikation bereits 1 Jahr im Voraus stattfand, wurde es in einigen Fällen doch erst zu spät konkret.

Hilfreich wäre hier wenn seitens der Genehmigungsbehörden oder der Zertifizierer ein Konzept über die durchzuführenden Messungen, mit Angaben zu Sensoren und Kabelverlegung, ausgestellt vom ausführenden Unternehmen, also der Messfirma, über den Auftraggeber der Messfirma frühzeitig einzufordern. Der Auftraggeber der Messfirma müsste die Machbarkeit seinerseits bestätigen. Das könnte die konkrete Kommunikation über technische Details beschleunigen und sicherstellen, dass die erforderliche Messtechnik geliefert und verwendet werden kann. Ob das zur zweiten Freigabe, vorher oder nachher, sinnvoll ist, können Sie evtl. anhand Ihrer Erfahrungen über Projektabläufe besser beurteilen. Auf jeden Fall macht eine frühzeitigere Forderung Sinn.



Bild 1: Links Standardsensoren mit Kabel

rechts druckwasserfest
bis 1000 m Wassertiefe

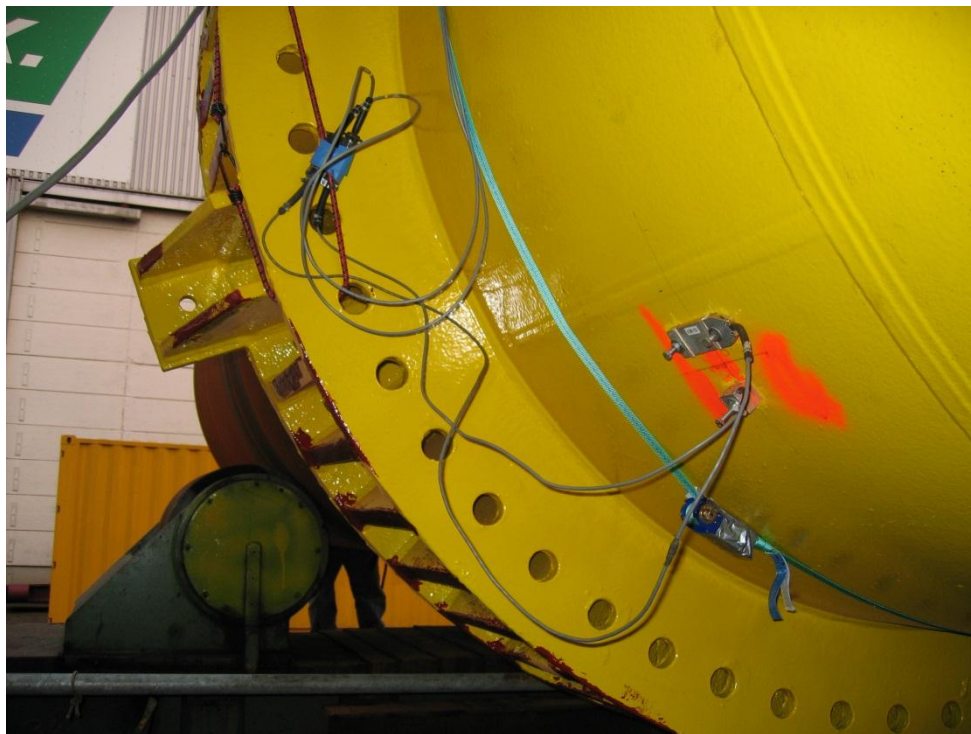


Bild 2: Probemontage von Sensoren mit Kabel an einem Messmast

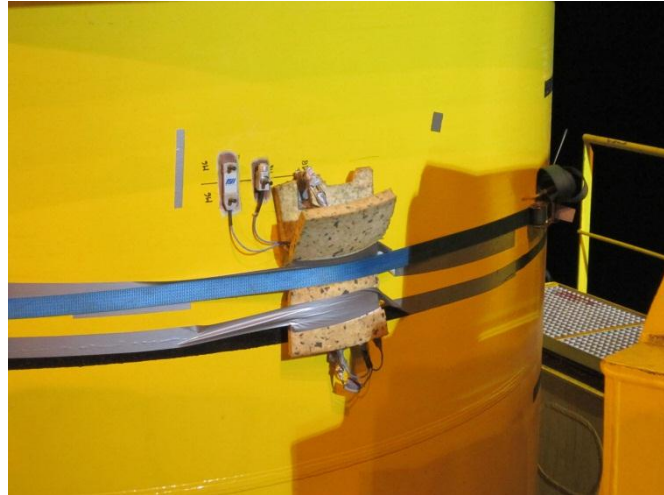


Bild 3: Sensoren mit Übertragungseinheit (Bluetooth) für kabellose Verbindung zum Messgerät –
links für Jetty Nachrammung < 100 Schläge Sensoren bleiben zugänglich –
rechts gesichert für Offshore-Einsatz ca. 4.000 Schläge