

## **Rammpbarkeitsuntersuchung für Offshore-Monopiles von Windenergieanlagen**

Frank Rausche und Oswald Klingmüller

### **Zusammenfassung**

Für Offshore-Windenergieanlagen in deutschen Seegebieten werden Monopiles als wirtschaftlichste Möglichkeit einer Gründung vorgesehen. Eine wesentliche Schwierigkeit besteht darin, dass die Monopiles für die horizontale wechselnde Dauerbelastung in einen sehr festen Boden mit hoher seitlicher Bettung eingebracht werden müssen. Es eignen sich somit nur sehr dicht gelagerte Bodenformationen. Das bedeutet aber auch, dass der Boden für das Einrammen einen hohen Widerstand aufweist. Daraus folgt eine hohe Steifigkeit des Rammguts, wobei die Wandstärke wiederum den Rammwiderstand beeinflusst. Eine zuverlässige Ermittlung der Rammspannungen ist also die Grundvoraussetzung für eine optimierte Bemessung. Es muss auch ein Rammgerät bestimmt werden, welches das gefundene Rohrprofil sicher einbringen kann, denn eine Umrüstung ist bei den engen Installationsfenstern in den in Frage kommenden Seegebieten nicht möglich.

Im Beitrag wird die Vorgehensweise der Rammpbarkeitsuntersuchung mit dem Programm GRLWEAP beschrieben, die erforderlichen Daten und die vom Programm gelieferten Ergebnisse. Der Weg von einem ersten Vorentwurf zu einer optimierten Lösung für die Kombination Rammgerät, Monopile Design, Einbindetiefe wird anhand von Daten für die zur Zeit diskutierten Windenergiefelder in der norddeutschen Nordsee dargestellt.

### **Einleitung**

Die Gründung von Windenergieanlagen (WEA) ist im Offshorebereich deshalb aufwändig, weil dort die Windlasten durch die Wassertiefe bedingt zusätzliche Momente verursachen, zusätzliche Lasten durch Wellen entstehen und die für Horizontalkräfte wichtigen oberen Bodenschichten durch Kolk ausgewaschen werden können.

Da die vorherrschende Horizontalbelastung auch als Dauerwechsel- oder Dauerschwellbelastung auftritt und eine Schiefstellung des Turms auf jeden Fall vermieden werden muss, ist eine sehr tiefe Einbindung des Monopiles in Schichten hoher Lagerungsdichte erforderlich, um nicht nur eine ausreichend steife Bettungsziffer zu erreichen sondern auch einen entsprechend hohen Erdwiderstand. Die für eine Windbelastung in Höhe der Gondel von 2 MN im Boden aufzunehmenden Gleichgewichtskräfte sind im Bild 1 zur Veranschaulichung der Größenordnung angegeben. Dazu kommen noch die horizontale Wellenbelastung, die durchaus grösser als die Windlast sein kann. Im Bereich der Einspannung muss der Boden horizontale Druckspannungen im Bereich von mehreren MPa aufnehmen können. Für statische Bemessungen zulässige Werte sollten bei der Bemessung für die Dauerbelastung nicht ausgeschöpft werden.

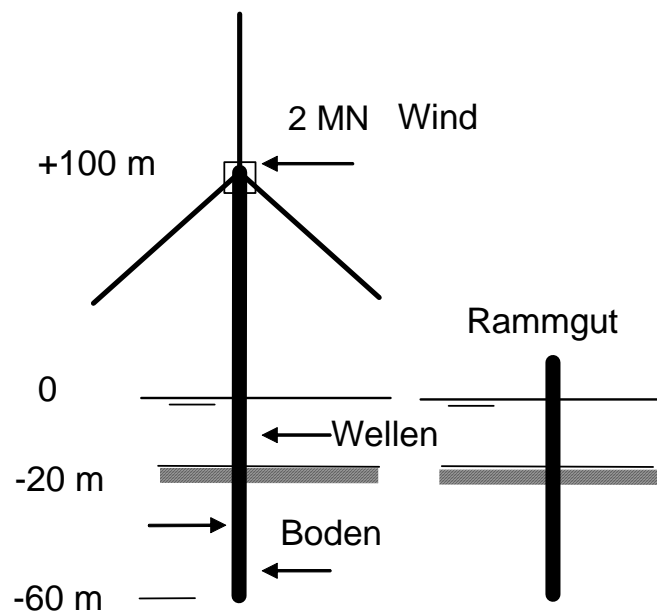


Bild 1: Kräfte an einer Offshore Windenergieanlage

Zu den genannten schwierigen Bemessungsbedingungen erschweren die Umweltbedingungen den Baubetrieb. Auf der anderen Seite gibt es im Offshore Bauwesen größere und schwerere Maschinen und Möglichkeiten zur Bewältigung von Aufgaben mit großen Abmessungen und Gewichten.

Eine gute Zusammenfassung der Probleme und Lösungen bei Offshore WEAs kann man bei Wiemann et al. (2002) oder Stahlmann /Schallert (2003) finden. Allerdings werden dort die Besonderheiten einer Lösung mit Monopiles nur sehr kurz behandelt. Daher soll im folgenden an Hand eines Beispiels gezeigt werden, wie mit Hilfe von dynamischen Messungen und Berechnungen eine erfolgreiche Bemessung unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen bei Monopiles vorgenommen werden kann.

Dynamische Simulationen des Pfahlrammvorgangs werden i.a. mit Hilfe der Wellengleichungsberechnung nach Smith (1960) durchgeführt. Während Smith hauptsächlich versuchte, die dynamische Rammformel durch ein genaueres Verfahren zu ersetzen, wurde sein Verfahren im GRLWEAP Programm (PDI, 2003) für die sogenannte Rammbarekeitsberechnung verwendet. Bei der Rammbarekeitsuntersuchung wird die gesamte Pfahlrammung, einschließlich Pfahlverlängerungen und Rammunterbrechungen simuliert und die maximalen Spannungen und Schlagzahlen ermittelt. Unter Umständen muss durch eine größere Pfahlwandstärke, einen schwereren Hammer oder beides eine Lösung gefunden werden, bei der die zulässigen Spannungen eingehalten werden und die erforderliche Rammtiefe erreicht wird.

Es ist empfehlenswert die statische Berechnung des Monopiles entsprechend der API Empfehlungen (z.B. RP 2A-LRFD, 1993) durchzuführen. Diese Empfehlungen enthalten die praktischen Erfahrungen die während der letzten 50 Jahre bei der Installation von Offshore Jackets mit großen Pfahldurchmessern unter verschiedenen Bedingungen gemacht wurden.

### **Dimensionierung des Pfahles**

Aus Wirtschaftlichkeitsgründen werden die Offshore Rohrpfähle oft mit veränderlicher Wandstärke ausgebildet. Wegen der Verteilung der Biegespannungen ist daher die Wandstärke im Bereich des Meeresbodens am größten und nimmt von da nach oben und nach unten hin ab. Vom rammtechnischen Standpunkt gesehen ist dies äußerst ungünstig, weil der verstärkte Mittelbereich des Pfahles die Rammenergie und -kräfte reflektiert und

erhöhte Rammspannungen verursacht. Der flexiblere untere Pfahlteil ist dann zwar geringeren Spannungen ausgesetzt, er überträgt aber auch geringere Kräfte und kann daher nicht so viel Bodenwiderstand überwinden wie ein entsprechender Pfahl mit einheitlicher Wandstärke.

Je höher die Wandstärke umso leichter lässt sich der Rohrpfahl rammen. Das erklärt sich dadurch, dass die Pfahlimpedanz linear mit der Wandstärke zunimmt, wodurch bei gleicher Energie die Rammkräfte zunehmen. Diese auf wellenmechanischer Grundlage beruhende Erkenntnis wurde durch Messungen eindeutig bestätigt. Sie steht im genauen Gegensatz zu der auf Rammformeln basierenden allgemeinen Ansicht, dass für höhere Pfahlgewichte höhere Rammenergien aufgebracht werden müssen.

In der Offshore Rammpraxis hat es sich erwiesen, dass die Rammung vereinfacht wird, wenn der Pfahl im Fußbereich, also etwa über die unteren 1.5 m, bei konstantem Außendurchmesser mit einer 12 mm größeren Wandstärke ausgebildet wird als der darüber liegende Rohrpfahl. Dieser verstärkte Rammschuh reduziert die Reibung im Rohrinnen, wodurch die Gefahr der Pfropfenbildung verringert wird.

### **Rammhilfen**

Es kann durchaus vorkommen, dass der Pfahl bei der Rammung trotz bester Arbeitsvorbereitung nicht mehr eindringt. Der Grund kann entweder eine zu geringe Energie oder Rammkraft oder ein zu hoher Bodenwiderstand sein. In harten Böden und bei kleineren Rohrdurchmessern kann es zum Beispiel zur teilweisen oder völligen Pfropfenbildung kommen. In dem Fall muss dann der Rohrpfahl "ausgewaschen" werden. Dabei muss man aber sehr vorsichtig vorgehen, damit das Auswaschen nicht unterhalb des Pfahles auftritt, wodurch dann auch der den Pfahl umgebende Boden ausgespült werden könnte. Dies wäre bei einem Monopile, der sehr hohe Horizontalkräfte aufzunehmen hat, besonders gefährlich.

In sandigen oder weichen bindigen Böden können Vibrationsbäre sehr wirtschaftlich Rohrpfähle einbringen, hauptsächlich weil der rollige Boden durch die hohen Frequenzen

seinen Scherwiderstand verliert. Ein Betonrohr mit 12 m Durchmesser und 250 mm Wandstärke wurde bereits mit vier simultan arbeitenden Vibrationsbären in China in wenigen Minuten auf die erforderliche Tiefe von 12 m gebracht (Rausche, 2002). Allerdings war dabei der Bodenwiderstand relativ gering. Wie mit GRLWEAP Simulationsrechnungen gezeigt werden kann, ist die Grenze des Vibrationsrammens im rolligen Boden im allgemeinen dann erreicht, wenn der Spitzenwiderstand größer ist als das statische Gewicht von Rammsystem und Pfahl. In bindigen Böden ist es schwieriger allgemeine gültige Aussagen zu machen.

Zeit ist im Offshore Baubetrieb kostbar und damit schnelle Entscheidungen getroffen werden können, wenn der Rammfortschritt anders als geplant verläuft, werden häufig Messungen von Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf während der Rammung durchgeführt. Ein Pile Driving Analyzer wertet diese Ergebnisse sofort aus und bestimmt dabei für jeden Schlag die in den Pfahl übertragene Energie, die Spannungen im Pfahl und den Bodenwiderstand. Mit Hilfe dieser Ergebnisse kann dann sofort entschieden werden, ob ein ungenügender Rammfortschritt mangelhafter Hammerenergie oder unvorhergesehen hohem Bodenwiderstand zuzuschreiben ist. Die Messungen können auch für zukünftige Bauvorhaben wertvolle Erfahrungswerte liefern.

### **Ermittlung des Bodenwiderstandes**

Zuerst wird der vertikale Bodenwiderstand als die Summe von Mantelreibung und Spitzenwiderstand ermittelt. Diese statische, geotechnische Berechnung der vertikalen Widerstandskräfte basiert meistens auf den Ergebnissen von Drucksondierungen oder Rammsondierungen, die dann mit lokal verschiedenen Ansätzen ausgewertet werden. Die dadurch ermittelten Grenzen der vertikalen Druck- und Zugtragfähigkeiten gelten für die statische Belastung, die von der Bodenart abhängig, wenige Stunden oder einige Wochen nach der Pfahlrammung auftreten wird. Für die horizontale Belastbarkeit ergeben dieselben Aufschlüsse oder In-situ Testmethoden Druck-Verformungskurven, die dann mit einem besonderen Rechenverfahren die Momenten- und Verformungslinie des Pfahles ergeben (z.B. Abdel-Rahman/Achmus 2004).

Die Rammung eines Pfahles kann auf die Eigenschaften des Bodens eine entscheidende Auswirkung haben. Bei lockeren rolligen Böden kann es zu einer Verdichtung kommen, während sehr dichte Böden aufgelockert werden können. Bei bindigen Böden ist diese Dichteänderung weniger ausgeprägt, dafür kann es aber zur permanenten Umlagerung der Bodenstruktur kommen und bei hohem Karbonatgehalt zerbrechen häufig die Bodenteilchen und verlieren dadurch ihren Widerstand. Der nach der Rammung vorhandene Langzeit-Bodenwiderstand wird mit  $R_u$  (ultimate resistance oder ultimate capacity) bezeichnet.

Die Rammung verursacht auch eine zeitlich begrenzte Änderung des Bodenwiderstandes. I. a. nimmt bei feinkörnigen Böden die Mantelreibung mehr, bei grobkörnigen Böden weniger stark ab. Beim Spitzenwiderstand sieht man geringere Veränderungen. Die durch die Rammung bedingte, kurzfristige Abnahme der Pfahltragfähigkeit bezieht sich auf den statischen, d.h. den vom Eindringungsweg abhängigen Anteil des Rammwiderstandes (SRD = Static Resistance to Driving). Der dynamische Widerstandsanteil, d.h. der von der Pfahlgeschwindigkeit abhängige Bodenwiderstand, spielt eine untergeordnete Rolle. Für die Dämpfung wird daher i.a. angenommen, dass sie mit den gleichen Ansätzen für Rammung und eine spätere Nachrammung berechnet werden kann. Statischer und Dämpfungswiderstand ergeben zusammen den gesamten dynamischen Widerstand.

Hauptsächlich für die Mantelreibung aber parallel dazu auch für den Spitzenwiderstand, ergibt sich

$$\text{SRD} = R_u / f_s .$$

Der sogenannte "Soil Setup Factor",  $f_s$ , kann umgekehrt mit den während der Rammung durch dynamische Messungen ermittelten Mantelreibungen multipliziert werden (Rausche et al. 2004-a). Das führt dann auf den Langzeit-Bodenwiderstand. Für normal konsolidierte Offshore-Tone wurden bereits  $f_s$ -Werte bis zu 10 ermittelt. Als Grund dafür wird oft eine Umlagerung der Tonteilchen durch die dynamischen Bewegungen in der Pfahl-Bodenschicht gesehen. Bei Sanden sind diese Faktoren kleiner und werden entweder durch kurzfristig erhöhte Porenwasserdrücke oder durch ein vergrößertes Rammloch und

dadurch verringerte horizontale Effektivspannungen in der Umgebung des Rohrpfahles erklärt.

Bei offenen Rohren ergibt sich noch eine weitere Schwierigkeit beim Spitzenwiderstand. Für kleinere Rohrdurchmesser, z.B. 500 mm oder weniger, bildet der Pfahl beim Rammen durch dichte Böden einen Pfropfen. Dann tritt keine innere Rohrreibung auf und der Spitzendruck wirkt auf der gesamten Querschnittsfläche des Pfahles. Bei sehr großen Pfahldurchmessern ist die Trägheit des Bodens im Pfahl aber so groß (Beschleunigungen können während der Rammung leicht mehrere hundert g-Werte erreichen,  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ), dass der Bodenpfropfen dann relativ zum Pfahl während der Rammung nach oben wandert (Durchstanzen). Es entsteht Reibung im Inneren des Pfahles und Spitzendruck an der Unterkante des Stahlrohres selbst. Allerdings nimmt diese innere Rohrreibung i.a. während einer Rammung mit hohen Beschleunigungen sehr schnell ab, weil sich im Inneren des Rohres keine hohe horizontale Effektivspannung aufbauen kann.

In der Praxis tritt weder eine vollkommene Pfropfenbildung noch ein vollständiges Durchstanzen ein. So werden sich wohl im ersten Augenblick der Pfahlsitzenbewegung unter einem Rammschlag (Beschleunigung und Spitzendruck sind noch gering) Pfahl und Bodenpfropfen zusammen bewegen. Wenn die Pfahlbeschleunigung und der Spitzendruck am Pfropfen zu groß werden, dringt der Pfropfen in das Rohr ein. Am Ende des Schlages, wenn Beschleunigung und Spitzendruck abnehmen werden, bewegen sich Boden und Rohr wieder zusammen. Man spricht dann von einer teilweisen Pfropfenbildung.

## **Berechnung des Rammvorgangs**

Zur Untersuchung der Rammbarkeit des Pfahles, der Auswahl geeigneter Rammgeräte und Berechnung der Grenztragfähigkeit muss eine dynamische Simulierung des Rammvorganges unternommen werden. Bär und Pfahl werden dabei als eine Serie von linearen Federn und Massenpunkten dargestellt. Der Bodenwiderstand wird, wie erwähnt, durch einen statischen, d.h. eindringungsabhängigen, elastisch-plastischen Anteil repräsentiert. Die elastische Grenzeindringung, bei der der Bodenwiderstand vom elastischen in den plastischen Zustand übergeht, wird gewöhnlich mit "Quake" bezeichnet. Zum statischen Widerstandsanteil kommt noch der dynamische, d.h. geschwindigkeitsabhängige Bodenwiderstand.

Seit den 70er Jahren wurde dieses Modell erfolgreich für Berechnungen von Offshore Pfahlrammungen eingesetzt. Der Ansatz wurde von Smith, (1960) entwickelt und später vielfach angewendet und bestätigt (Rausche et al., 2004-b). GRLWEAP ist ein Rechenprogramm, das seit Jahren mit gutem Erfolg weltweit zum Einsatz gekommen ist. Weil sich der Bodenwiderstand durch den dynamischen Einfluss verändert, ist die größte Schwierigkeit bei der Rammbarkeitsberechnung, den statischen Anteil des zur Zeit der Rammung auftretenden Widerstandes realistisch abzuschätzen. Im Vergleich zu dieser Schwierigkeit ist die Abschätzung des zusätzlichen dynamischen Widerstandsanteils relativ unproblematisch.

Wegen der vielen Annahmen und Unbekannten, werden wie oft in der Praxis, im folgenden Beispiel zwei Fälle untersucht, so dass obere und untere Grenzen für bemessungsbestimmende Größen, wie maximale zu erwartende Spannungen oder maximale zu erwartende Schlagzahlen, bestimmt werden können:

- (a) Optimistisch mit reduziertem Bodenwiderstand für eine Rammung die ohne Unterbrechung abläuft und gut arbeitendem Rammsystem und
- (b) Pessimistisch, das heißt mit erhöhtem Bodenwiderstand und geringerer Rammeffizienz.



Wenn Extremwerte von statischen und dynamischen Bodenwiderstandswerten zusammen mit maximalen und minimalen Effizienzen in die Rechnung eingegeben werden, dann können die Ergebnisse leicht unrealistisch werden. Im folgenden Beispiel werden daher nicht extreme, sondern häufig angetroffene Werte als Eingaben gewählt.

### Pfahl

Der Pfahl soll einen Durchmesser von 4000 mm und eine Wandstärke von 100 mm haben. Die Wandstärke soll auf 150 mm im Meeresbodenbereich zunehmen, und auf 60 mm in der unteren Pfahlhälfte abnehmen. Wie erwähnt ist das für die Rammung ein recht ungünstiges Pfahlprofil, da die Rammenergie und -kraft praktisch an dem schweren Mittelteil reflektiert wird. Zur Reduzierung der inneren Rohrreibung werden die unteren 1.5 m der 63 m Gesamtpfahllänge mit einem inneren Rammschuh, d.h. mit einer auf 76 mm erhöhten Wandstärke, versehen. Der Pfahl soll mindestens auf eine Tiefe von 40 m gerammt werden, damit die Horizontalkräfte und Momente sicher in den Boden abgetragen werden können. Die vertikalen Lasten eines Monopiles sind i. a. für die Bemessung bei WEA nicht

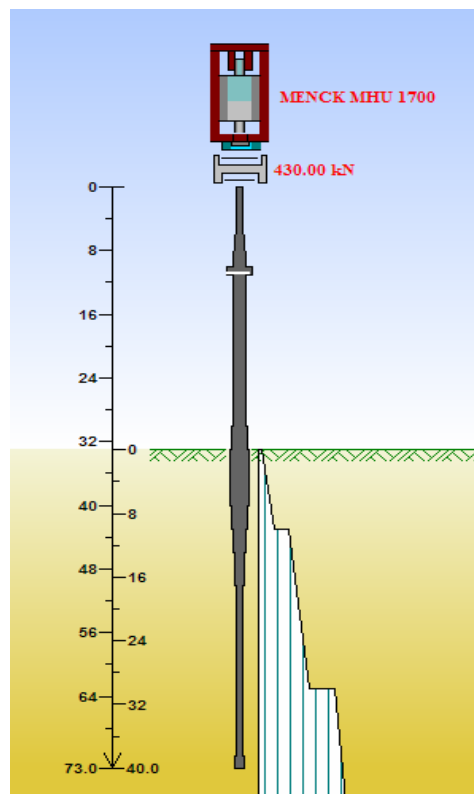


Bild 2: Wellengleichungssystem

kritisch. Bild 2 zeigt die graphische Darstellung des Systems im GRLWEAP Programm. Die Bilder 3a und 3b zeigen die Querschnittsfläche und Wandstärke über die Tiefe.

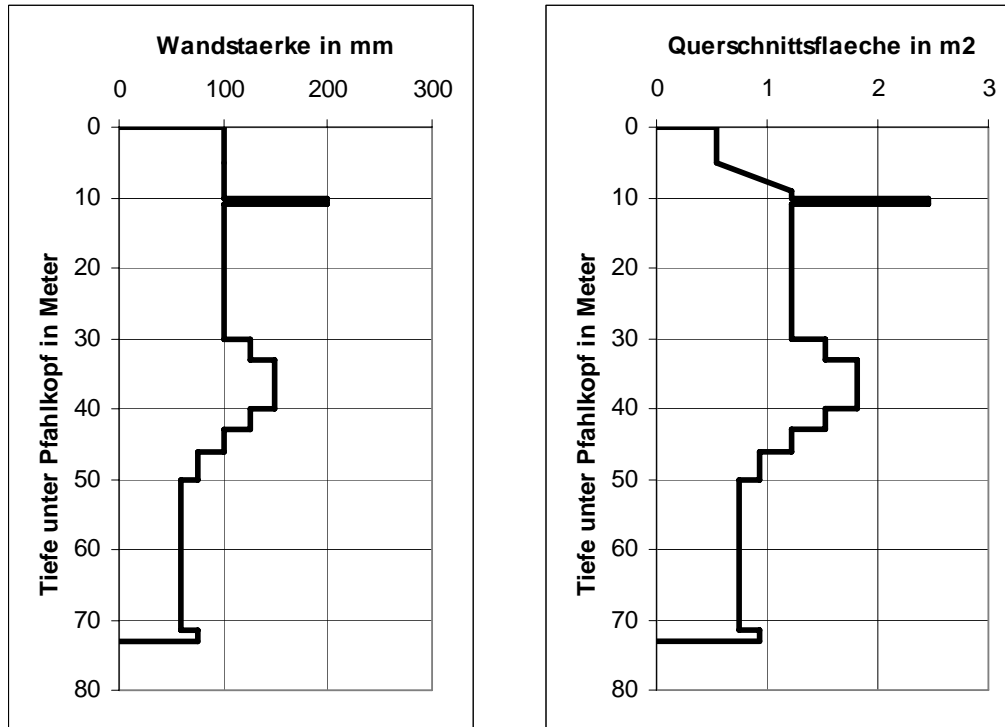


Bild 3: (a) Pfahlwandstärke und (b) Querschnittsfläche für die Beispielsberechnung

### Rammsystem

Als Hammer soll ein Menck MHU 1700 eingesetzt werden. Das Gewicht der am Schlag beteiligten Massenteile ist bei diesem Hydraulikbär 922 kN und seine maximale kinetische Energie ist 1667 kJ, was einer Freifallhöhe von 1.81 m entspricht. Da die kinetische Energie bei diesem Hammer kurz vor dem Aufschlag gemessen wird, sind weitere unbekannte Energieverluste gering und es wird i.a. mit einer Hammereffizienz von 95% gerechnet. Für den pessimistischen Fall wird von einem Wirkungsgrad von 75% ausgegangen.

Die Schlagkraft und -energie muss durch eine Haube auf den Pfahl übertragen werden. Eine für einen Pfahl von 4 m Durchmesser gefertigte Haube wäre nicht nur teuer, sie würde wahrscheinlich auch hohe Energieverluste verursachen. Daher wird in diesem Beispiel angenommen, dass eine Haube für einen 1.8 m Durchmesser Pfahl zur Verfügung stünde. Darunter kommt dann ein 10 m langer, konischer Adapter zum Einsatz mit 100 mm

Wandstärke. Er soll oben aus einem Rohr mit Durchmesser 1,8 m bestehen und dann über eine Länge von 4 m auf einen Durchmesser von 4 m zunehmen. Dieser Adapter sitzt frei auf dem Pfahlkopf auf und wird durch ein äußeres, 1 m langes Rohrstück geführt.

### Bodeneigenschaften

Nach Wiemann et al.(2002) besteht der Boden in den für die WEA in der Nordsee in Frage kommenden Gebieten aus lockeren Feinsanden, sehr dichten Mittelsanden, manchmal mit Kies, Geschiebemergel und manchmal hartem Ton. Für das Rechenbeispiel wurde ein entsprechendes Bodenprofil angenommen und in der Tabelle 1 zusammengestellt. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wurde dabei auch angenommen, dass die während der Rammung auftretenden statischen Bodenwiderstände höher sein können als die für vertikale Lasten zugelassenen Werte (API empfiehlt z.B. für sehr dichten Sand nicht mehr als 125 kPa Mantelreibung anzusetzen).

Schicht No.	Tiefe	Beschreibung*	Mantelreibung	Spitzen- druck	Dämpfung am Mantel
	m		kPa	MPa	s/m
I	0 - 10	Feinsand $v' < 35^\circ$ ; $q_c < 6 \text{ kN/m}^2$	5 - 30	0.5 – 2.5	0.16
II	10 - 20	Sehr dichter Sand $v' < 40^\circ$ ; $q_c > 11 \text{ kN/m}^2$	60-100	6.0 – 10	0.16
III	20 - 40	Geschiebelehm $c_u > 50 \text{ kN/m}^2$	150 - 200	1.0	0.60

\*  $v'$ ... Effektiver Reibungswinkel;  $q_c$  ... Sondenspitzen-  
druck  
 $c_u$  ... undrained Scherfestigkeit

### Statischer Rammwiderstand (SRD)

Die Werte in der Tabelle 1 gelten von der oberen zur unteren Schichtgrenze. Tatsächlich würde man auch hier optimistische und pessimistische Grenzwerte für die Rammung erwarten können. In unserem Beispiel wird aber angenommen, dass die in Tabelle 1 angegebenen Werte Mittelwerte sind; diese Werte werden dann auf die SRD Werte

reduziert für die Berechnung des optimistischen Falls oder vergrößert für die Berechnung des pessimistischen Falls. Stehen bodenmechanische Ergebnisse von mehreren Verfahren zur Verfügung, dann könnten diese ebenfalls als obere und untere Widerstandsgrenzen in die Berechnung eingehen.

Für den optimistischen Fall wird daher in unserem Beispiel angenommen, dass der Sand nur 80% ( $f_s = 1.25$ ), die bindigen Bodenschichten nur 66% ( $f_s = 1.5$ ) ihrer Langzeit-Mantelreibung während der Rammung haben. Für den pessimistischen Fall wird dagegen volle Mantelreibung und ein um 25% ( $f_s = 0.8$ ) erhöhter Spitzendruck angesetzt. Ein  $f_s$ -Wert kleiner als 1.0 kommt im Relaxationsfall vor, z.B. wenn durch Dilatation in sehr dichten feinen Sanden bedingt, ein negativer Porenwasserdruck während der Rammung an der Pfahlspitze auftritt. Bild 4 zeigt die untere und obere Grenze des für die Berechnung angenommenen Bodenwiderstandes und seinen Spitzendruckanteil.

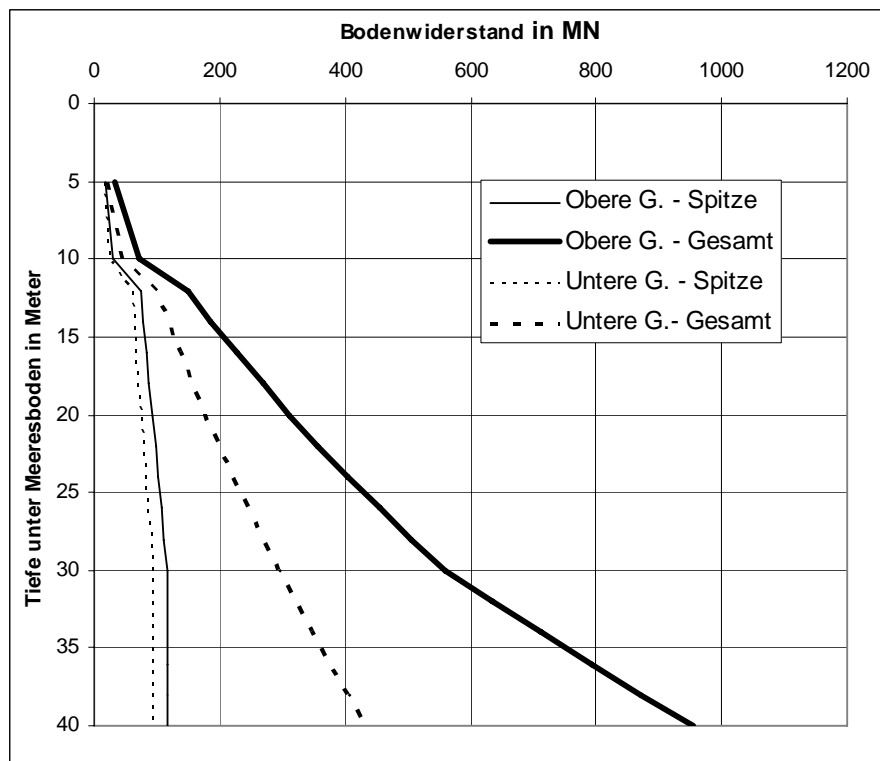


Bild 4: Annahmen für den Bodenwiderstand

Im statischen Fall erwartet man den kleineren Wert von entweder Spitzendruck über den Gesamtquerschnitt oder die innere Reibung im Rohr. Beim kontinuierlichen Rammen von

großen Rohren wird aber Spitzendruck nur unter dem Stahlrohr selbst entstehen, weil die Trägheitskräfte beim großen Pfahldurchmesser viel größer sind als die im Pfahlrohr auftretenden Reibungskräfte. Für den optimistischen Fall kann erwartet werden, dass im Bereich des 1.5 m langen Rammschuhs Reibungskräfte im Rohrrinnern entstehen, die gleich groß wie die an der Außenwand auftretenden Reibungskräfte sind. Im pessimistischen Fall werden zusätzliche innere Reibungskräfte dort angesetzt, wo sich der innere Pfahldurchmesser verringert. Wo sich der innere Durchmesser nach oben hin wieder erweitert, wird es kaum zu inneren Reibungskräften kommen können. Die Berechnung wird also mit verdoppelten Mantelreibungskräften im Bereich des Rammschuhs (optimistisch) und von Pfahlspitze bis zur Oberkante des 150 mm starken Rohrteils (pessimistisch) durchgeführt.

Schließlich müssen noch die dynamischen Bodenwiderstandswerte festgelegt werden. Die Smith-Dämpfungswerte am Pfahlfuß und die Quakewerte am Mantel werden mit ihren Normalwerten von 0.5 s/m und 2.5 mm sowohl für die optimistische wie auch für die pessimistische Berechnung eingesetzt. Je nach Feingehalt der Bodenarten können die Dämpfungswerte am Pfahlmantel aber stark variieren. Aus diesem Grund wird die optimistische Berechnung mit den Standardwerten, die pessimistische mit um 50% erhöhten Dämpfungsfaktoren durchgeführt. Für die Quakewerte am Pfahlfuß wird für offene Rohrpfähle meist ein Wert von 2.5 mm angenommen. Für den pessimistischen Fall wird dieser Wert in unserem Beispiel verdoppelt.

### Ergebnisse

Bild 5 zeigt die erwarteten Schlagzahlen für den optimistischen und pessimistischen Fall. Selbst im oberen Grenzfall, der hauptsächlich die Bedingungen nach einer längeren Rammunterbrechung wiedergibt, liegen die höchsten Schlagzahlen bei 180 pro 250 mm Eindringung. Das bedeutet, dass der Hammer in der Lage ist, den Pfahl auch nach längerer Rammunterbrechung weiterzurammen. Würde diese schwierigste Rammbedingung für die gesamte Rammung gelten dann müssten insgesamt 4400 Schläge aufgebracht werden, was einer reinen Rammzeit von etwa 110 Minuten entspricht. Im unteren Grenzfall, der für das ununterbrochene Rammen realistischer ist als die obere Grenze, würden die maximalen Schlagzahlen bei nur 18 Schlägen pro 250 mm liegen und die reine Rammzeit würde ungefähr eine halbe Stunde betragen.

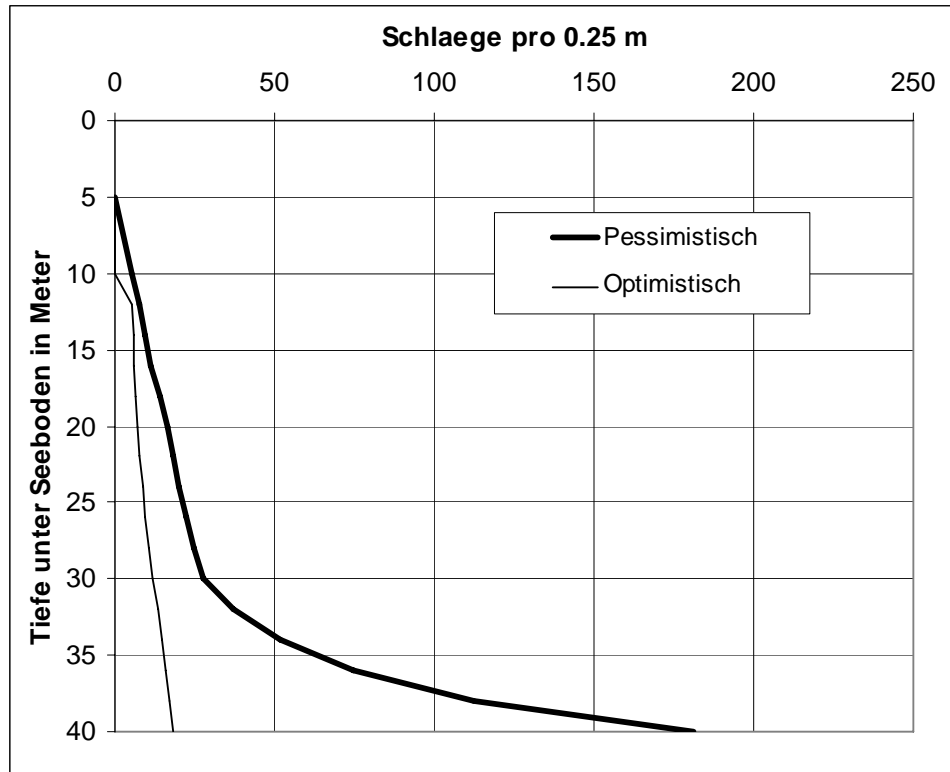


Bild 5: GRLWEAP berechnete Schlagzahlen

Die maximale Druckspannungsverteilung im Pfahl zeigt Bild 6 für den optimistischen Fall (Wirkungsgrad des Hammers 0.95) und für den letzten Rammschlag bei 40 m Tiefe. Die höchsten Spannungen werden im Adapter auftreten und Werte von rund 250 MPa erreichen. Der Grund für diese hohen Spannungen ist die starke Zunahme des Querschnitts und die dadurch bedingten Spannungsreflexionen im oberen Adapterteil, wo der Querschnitt am schwächsten ist. Obwohl diese Spannungen im dynamischen Belastungsfall für Pfähle durchaus annehmbar sind für Stahlgüten mit Fließgrenze über 280 MPa, würde man bei einem Adapter der wiederholt eingesetzt werden soll, doch etwas vorsichtiger sein und seine Querschnittsfläche etwas vergrößern. Günstig ist in diesem Fall, dass die Zugspannungen im Adapter relativ gering sind, wodurch die Ermüdungsgefahr reduziert wird. Wäre der Adapter fest mit dem Pfahl verbunden, dann würden wahrscheinlich höhere Zugspannungen auftreten. Der Spannungsverlauf über die Zeit und die Anzahl der Lastwechsel ist im Bild 7 erkennbar, allerdings zeigen Messungen i.a. ein gedämpfteres Verhalten als die Rechnung, und das bedeutet, dass diese Ergebnisse für eine Ermüdungsuntersuchung auf der sicheren Seite liegen.

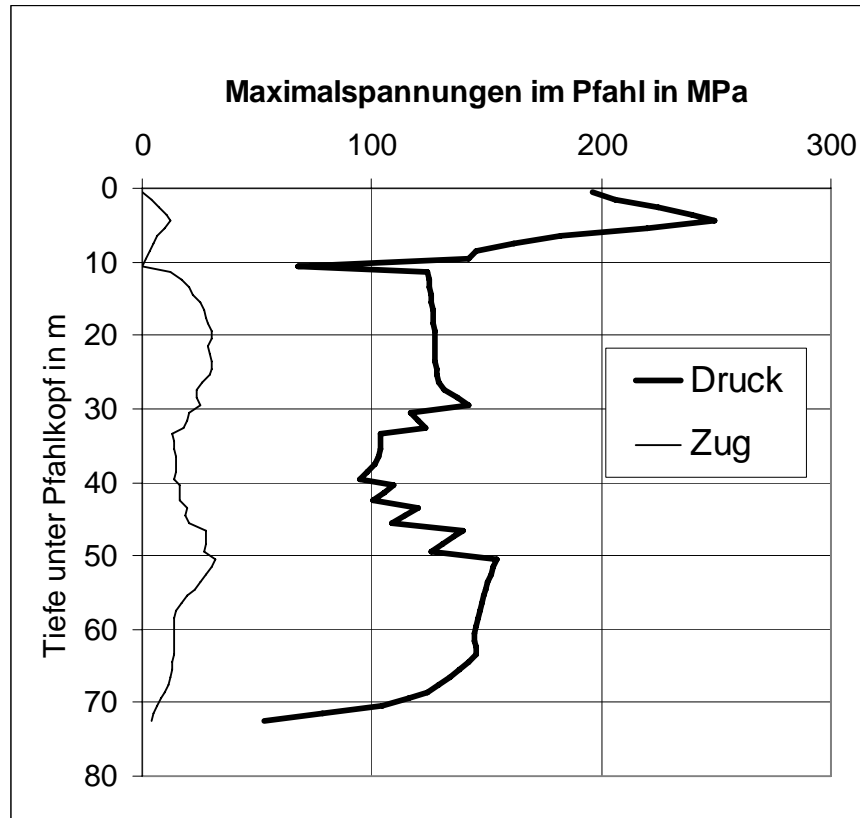


Bild 6: GRLWEAP berechnete Rammspannungen im Pfahl

### Zusammenfassung und Ausblick

Mit diesem Beitrag sollte gezeigt werden wie die bei anderen Offshore Installationen gemachten Erfahrungen für die Rammung von Offshore Monopiles für WEA angewendet werden können. Dabei wurde das Wave Equation Verfahren vorgestellt und Empfehlungen für Pfahl-, Rammsystem- und Bodenmodell zur Untersuchung der Rammbarkeit dieser großen Rohrpfähle gemacht. Es zeigt sich, dass zur Verfügung stehendes Gerät durchaus in der Lage ist einen Monopile sicher und schnell in den Meeresboden zu rammen. Wegen ihrer hohen Steifigkeit (Wandstärke) haben diese Rohre eine große Impedanz und dadurch eine relativ gute Rammbarkeit.

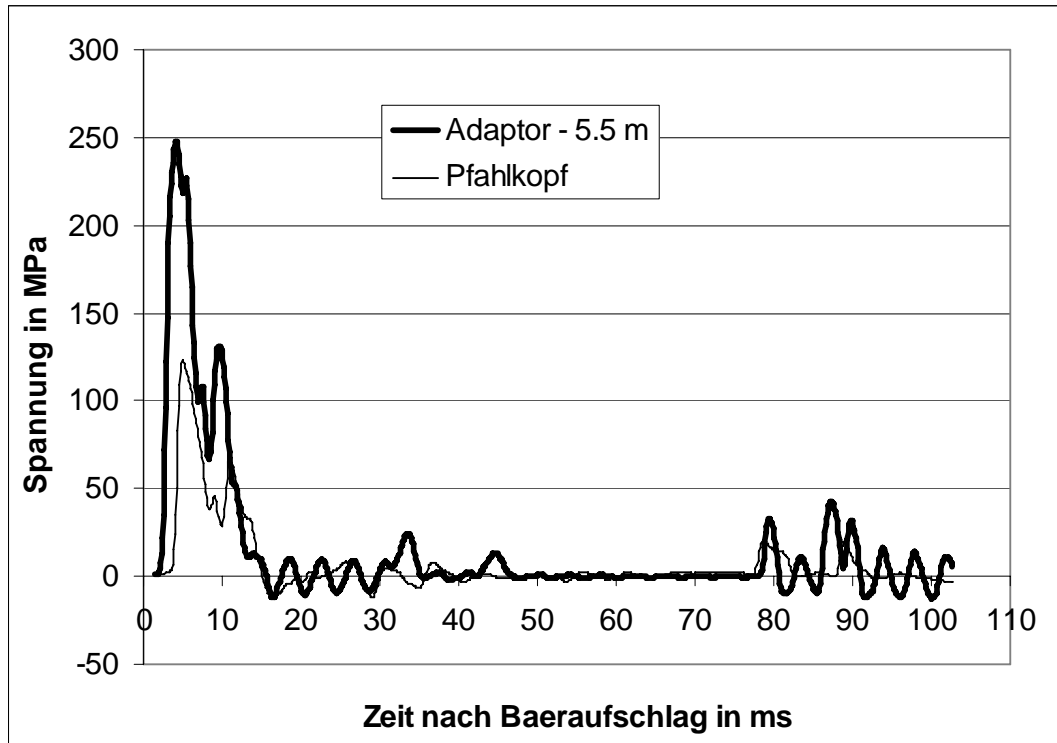


Bild 7: Spannungen im Adaptor und am Pfahlkopf während eines Schlages

Im Hinblick auf die derzeit diskutierten Projekte in der Nordsee und in der Ostsee kann das vorstehende Modell mit den konkreten Planungsvorgaben verwendet werden, um optimale Rammgerät- und Monopileauslegungen zu bestimmen. Durch Überwachung des Rammens mit dem Pile Driving Analyzer können die Eingangswerte der Berechnung mit dem Programm GRLWEAP überprüft werden und die Differenz zwischen oberen und unteren Schranken für die Bemessungsgrößen vermindern.



## Quellenangaben

Achmus, M., Abdel-Rahman, K., 2004. Numerische Untersuchung zum Tragverhalten horizontal belasteter Monopile-Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen; 19. Veder Kolloquium; TU Graz.

American Petroleum Institute, 1993. Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms – LRFD; 1220 L Street, Northwest, Washington, DC 20005

Rausche, F., Robinson, B., and Likins, G., 2004-a, On the prediction of long term capacity from end-of-Driving information. ASCE Special Publication

Rausche, F., Liang, L., Allin, R., and Rancman, D., 2004-b Applications and Correlations of the Wave Equation Analysis Program GRLWEAP; 7<sup>th</sup> Int. Conf. of the Application of Stress Wave Theory to Piles. Kuala Lumpur.

Rausche, F., 2002. Modeling of Vibratory pile driving. Proceedings of Transvib 2002, the Int. Conf. on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Louvain-La-Neuve, S. 21 - 32.

Smith, E. A. L., 1960. Pile-driving analysis by the wave equation, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 86, no. SM4, pp. 35-61.

Seitz, Jörn M., Schmidt, H.-G., 2000. Bohrpfähle, Verlag Ernst&Sohn, Berlin

Wiemann, J., Lesny, K., und Richwien, W., 2002. Gründung von Offshore-Windenergieanlagen – Gründungskonzepte und geotechnische Grundlagen; Verlag Glückauf GmbH, Essen.

Stahlmann, J., Schallert, M., 2003. Geotechnische Aspekte bei der Gründung von Offshore Windenergieanlagen; Pfahlsymposium 2003; TU Braunschweig

Frank Rausche  
GRL Engineers, Inc.  
4535 Renaissance Parkway  
Cleveland, Ohio 44128  
USA  
frausche@pile.com

Oswald Klingmüller  
GSP, Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH  
Käfertalerstrasse 164  
D-68167 Mannheim  
ok@gsp-mannheim.de