

Dynamische Probelastung Offshore, Rammen, Festwachsen und Nachrammen - Auswirkung auf den Nachweis der axialen statischen Tragfähigkeit

Oswald Klingmüller, Christian Mayer, Matthias Schallert
GSP mbH, Mannheim, Deutschland

Frank Rausche
Pile Dynamics Inc., Cleveland, OH, USA

1 Einleitung

Es gehört zur Erfahrung der Spezialtiefbauer, dass durch die Herstellung von Pfählen, beim Ein-Rammen, Einrütteln oder Bohren, der Bodenaufbau gestört wird. Erst nach einer gewissen Zeit gewinnt der Boden seinen ursprünglichen Aufbau zurück und der Bodenwiderstand, Mantelreibung und Spitzendruck, erreicht seine endgültige Größe. Dieser Vorgang wird allgemein als „Festwachsen“ (oder auch „freeze“ oder „set up“) bezeichnet und wurde mehrfach beschrieben (u.a. bei RAUSCHE u.a. 2004, mit einer ausführlichen Literatürübersicht).

Das Einrütteln axial zu belastender Pfähle wird bislang vergleichsweise selten ausgeführt und ist wenig untersucht. Bei Bohrpfählen ist der Effekt eher gering und nicht bemessungsrelevant. Beide Problemstellungen werden deswegen hier nicht betrachtet.

Im folgenden Beitrag werden die ingenieurmäßigen Aspekte der Definition und Bestimmung eines Festwachsfaktors für mit Schlagrammung eingebrachte Pfähle und die Verwendung des Festwachsfaktors in der Pfahlbemessung bzw. in Standsicherheitsnachweisen erläutert. Die komplexen bodenmechanischen Vorgänge der Änderung des Korngerüsts mit der Zeit, des Stofftransports beim Abbau des Porenwasserüberdrucks und weitere Fragestellungen sind bislang wenig erforscht. Einige Hinweise hierzu finden sich in (RAUSCHE u.a. 2004).

Neben den theoretischen Grundlagen und den in der zitierten Literatur beschriebenen Fällen, werden die Erfahrungen der Autoren bei offshore Projekten anhand von Beispielen beschrieben.

2 Grundlagen

Obwohl der Sachverhalt Allgemeinwissen darstellt, gibt es keinen allgemein anerkannten Stand der Technik für den Umgang mit dem Phänomen des Festwachsens:

1. Definition

Den Standard für Standsicherheitsnachweise bilden die auf der Grundlage von statischen Probelastungen ermittelten Werte für die Pfahltragfähigkeit. Theoretisch müsste ein Festwachs faktor f_s also aus dem Vergleich einer statischen Probelastung direkt nach dem Einbringen des Pfahles und einer statischen Probelastung nach unendlich langer Standzeit bestimmt werden.

f_s = statischer Langzeitwiderstand / statischer Rammwiderstand

f_s = LTR (Long Term Resistance) / SRD (Static Resistance to Driving).

Die Bestimmung des Festwachs faktors durch statische Probelastungen ist praktisch unmöglich. Der Aufbau der statischen Probelastung dauert üblicherweise so lange, dass der Beruhigungsvorgang des Bodens schon fortgeschritten ist und damit Mantelreibung und Spitzendruck gegenüber dem Zustand direkt nach dem Einbringen schon verändert sind. Das Abwarten einer unendlich langen Standzeit ist auch unmöglich, da ja irgendwann ein Bauvorhaben abgeschlossen sein und das Bauwerk genutzt werden muss. Es ist insofern nur möglich, den Festwachs faktor durch geeignete Methoden näherungsweise zu ermitteln.

Aus Sicht der ingenieurmäßigen Näherung ist auch der Zeitpunkt „unendlich“ nicht relevant, sondern es ist eine Zeit zu betrachten, innerhalb der zu erwarten ist, dass die Bemessungslast auftritt. Auch diese Zeit kann vergleichsweise lang sein. Der Festwachs faktor ist dann üblicherweise aus einem Vergleich von Probelastungen mit kürzerer Zeitdifferenz zu extrapolieren und als Quotient f_s der Tragfähigkeit nach langer Standzeit, LTR, und der Tragfähigkeit zur Zeit am Ende der Rammung, SRD, anzugeben. Eine genauere Betrachtung ergibt sich bei Differenzierung der Widerstände an Pfahlmantel und -spitze (RAUSCHE ET AL., 2004). Derartige Extrapolationen werden unter Berücksichtigung der Informatio-

nen der Pfahlinstallation (z.B. Energie, Schlagzahlen aus Rammprotokollen) mit sinnvollen mathematischen und ingenieurmäßig pragmatischen Methoden durchgeführt.

Von BULLOCK, 2008 wurde festgestellt, dass die Widerstände zum Zeitpunkt „0“, also direkt beim Abschluss des Einrammens, sehr stark variieren. Er schlägt deswegen vor, sich zur Definition des Festwachs-faktors auf einen Referenzwert von 1 Tag zu beziehen.

Aus praktischen Gründen, weil i.A. und besonders Offshore, die Wartezeiten für ein Nachrammen kurz gehalten werden müssen, schlagen RAUSCHE U.A. 2004 vor, den Anfangswert dadurch zu stabilisieren, dass ein Zeitpunkt kurz nach dem Ende des Einrammens zur Bestimmung des Anfangspunktes gewählt wird. Und zur Vergleichbarkeit der Festwachs-faktoren wird vorgeschlagen, sich auf die Bestimmung des Widerstandes nach 24 h Wartezeit zu beziehen.

Zur Bestimmung des Festwachs-faktors für eine längere Zeit wurde von SKOV/DENVER 1988 ein linearer Zusammenhang zwischen dem Festwachs-faktor und dem dekadischen Logarithmus der Zeit aufgestellt (siehe z.B. Abb. 1 aus BULLOCK 2008), dabei ist der Faktor A das relative Festwachsen während einer zehnfachen Wartezeit (z.B. von der ersten bis 10ten Stunde oder vom ersten bis zehnten Tag).

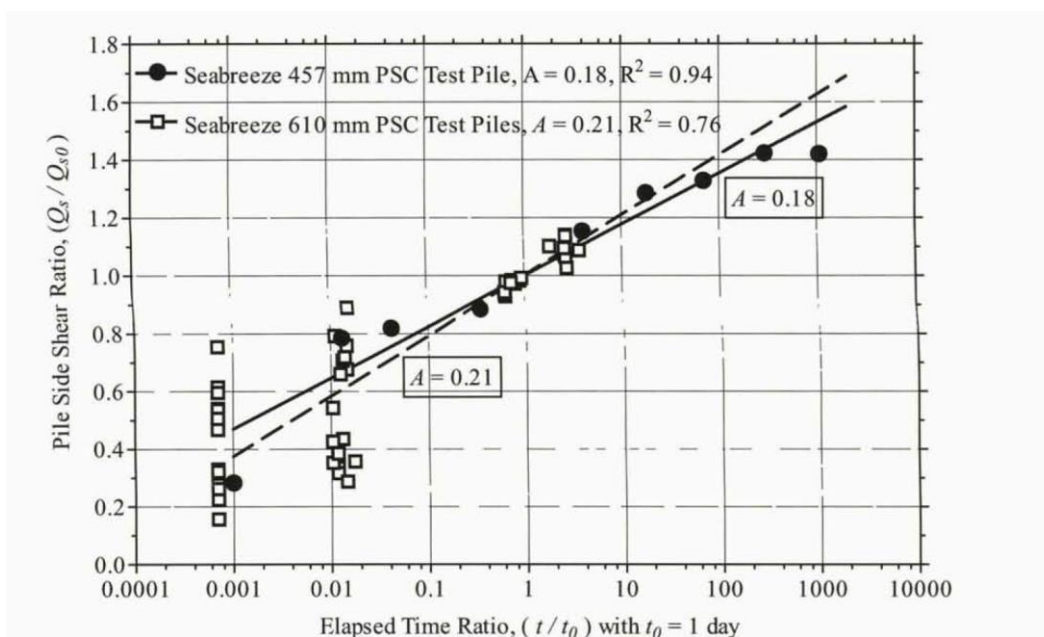


Abbildung 1: Festwachsen mit Bezug auf eine logarithmische Zeitachse (nach BULLOCK 2008)

2. Bestimmung

Da die Bestimmung eines Festwachs-faktors mit statischen Probelastungen nur eine theoretische Möglichkeit ist, wird dieser üblicherweise auf der Grundlage des Widerstandes aus dynamischen Pfahlprobelastungen bestimmt.

Durch die kontinuierliche Messung beim Einbringen des Pfahles und anschließender Auswertung eines Schlags am Ende der Rammung durch vollständige Modellbildung (z.B. CAPWAP®) ist der Widerstand zum Ende des Rammvorganges bekannt. Wenn die Messung nicht kontinuierlich als Monitoring ausgeführt wird, lässt sich nach kurzer Unterbrechung zur Montage der Sensoren der Bodenwiderstand zum Ende eines Rammvorganges bestimmen.

Eine dynamische Probelastung nach einer bestimmten Standzeit (Restrike Test) ergibt dann immer eine konservative Abschätzung des Festwachs-faktors.

Gelingt es beim Nachrammen des Pfahls den festgewachsenen Zustand zu überwinden, kann der Festwachs-faktor, f_s , auch als Verhältnis des Widerstandes zu Beginn des Nachrammens zum Widerstand beim Ende des Nachrammens bestimmt werden. Dafür ist allerdings ausreichend Nachrammstrecke erforderlich, um den Zustand am Ende der Rammung wieder zu erreichen.

Im vorliegenden Beitrag wird davon ausgegangen, dass der Widerstand zuverlässig zum Ende des Rammens als Referenzwert bestimmt und zu einem späteren Zeitpunkt eine Nachrammung durchgeführt werden konnte. Der Festwachs-faktor ist dann in konservativer Näherung das Verhältnis von Widerstand zum Beginn des Nachrammens zum Widerstand zum Ende des Einrammens.

3 Erfahrungswerte

Einen wesentlichen Einfluss auf die Größe des Anwachseffektes hat die Bodenart. Je nach Bodeneigenschaften werden die Lagerung und der Porenwasserdruck durch den Rammvorgang mehr oder weniger verändert.

Während beim Rammen der bindige Boden erheblich verändert wurde und ein Mehrfaches des Einrammwiderstandes nach längerer Standzeit erreicht wird, ist der Zuwachs im nichtbindigen Boden geringer (siehe auch BULLOCK 2008, RAUSCHE U.A. 2004).

Der grundsätzliche Unterschied ist in Abb. 2 links schematisch dargestellt. Während der Endzustand im nichtbindigen Boden (also z.B. dichtgelagertem Sand) sich schon nach kürzerer Zeit wieder einstellt, dauert dieser Prozess im bindigen Boden länger. Ausnahmen bestätigen hier wieder einmal die Regel, denn es wurden auch schon in sehr dichten Sandböden zunächst große Reibungsverluste und späteres Anwachsen beobachtet (SEIDEL UND KALINOWSKI, 2000). Von SKOV, R., UND DENVER, H. 1988 wurde aufgrund von vielen Messungen gezeigt, dass das Festwachsen im logarithmischen Zeitmaßstab durch eine Gerade darstellbar ist (Bild 2 rechts, siehe auch Bild 1).

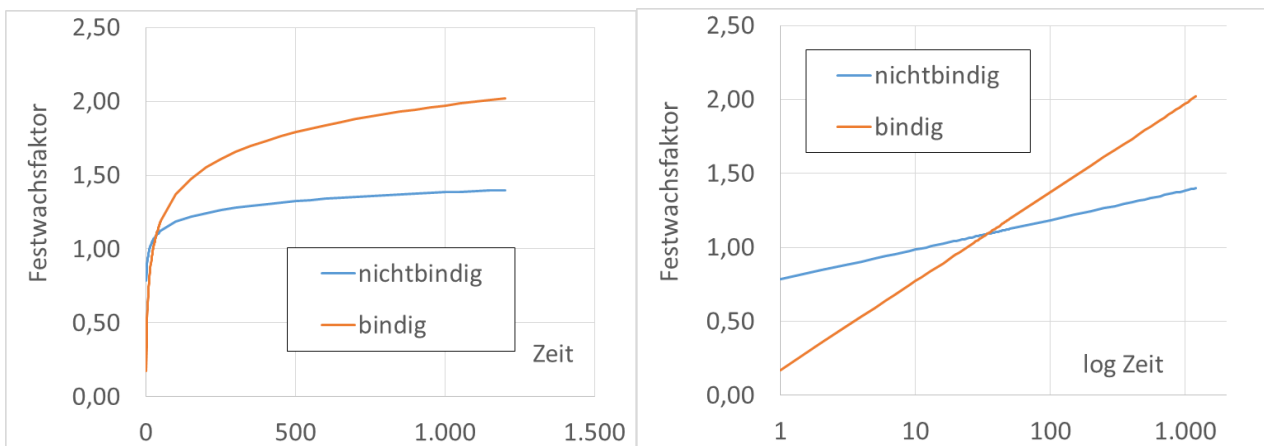


Abbildung 2: Entwicklung des Festwachsfaktors - Prinzip

Aus einer Serie von Probelastungen konnten von RAUSCHE U.A. 1996 Setup-Faktoren zusammengestellt werden. Die vorgeschlagenen Faktoren markieren den unteren Wertebereich des möglichen Festwachsens und können insofern als konservativ bei der Voraussage der Rammpbarkeit gelten. Wie auch bei anderen geotechnischen Fragestellungen war es in dieser Untersuchung nicht möglich, jeweils eindeutig nach den Böden klassifizierbare homogene Grundgesamtheiten zu bestimmen. Insbesondere für den Bereich tonig-schluffig hat die Streuung in der sehr begrenzten Datenbasis verhindert, dass hierfür ein allgemein gültiger Festwachsfaktor angegeben werden konnte.

Aufgrund der Variabilität der Bodeneigenschaften und vor allem, weil bei geschichteten Böden eine eindeutige Klassifizierung nicht möglich ist, sollten für wirtschaftlichere Bemessungen dynamische Probelastungen ausgeführt werden.

Der reduzierte Widerstand beim Einrammen wird meist ausgehend von den statischen Langzeitwerten aus boden-/pfahlbezogenen bekannten Tragfähigkeitswerten durch Division mit den Festwachsfaktoren bestimmt. Eine direkte Bestimmung des reduzierten Wider-

standes für offene Stahlrohrpfähle in dichtgelagertem Sand auf der Grundlage von Drucksondierungsergebnissen wurde von ALM/HAMRE 2001 (zitiert nach SCHNEIDER 2010) durch Kalibrierung an einer Vielzahl von dynamischen Probelastungen vorgeschlagen.

Tabelle 1: Vorgeschlagene Festwachs-faktoren nach RAUSCHE u.a. 2004

Boden	Streuungsbereich		empfohlener Wert
	unterer Wert	oberer Wert	
Ton	1,2	5,5	2,0
Toniger Schluff, schluffiger Ton	1,0	2,0	1,0
Schluff	1,5	5,0	1,5
toniger Sand, sandiger Ton	1,0	6,0	1,5
schluffiger Sand, sandiger Schluff	1,2	2,0	1,2
feinkörniger Sand	1,2	2,0	1,2
Sand	0,8	2,0	1,0
sandiger Kies, kiesiger Sand	1,2	2,0	1,0

4 Erfahrungen bei der Durchführung von Nachrammungen (Restrike-Tests)

4.1 Arbeitsvorbereitung

Zum Nachweis möglichst hoher Pfahltragfähigkeiten wäre es sinnvoll, Probepfähle herzustellen, die Wartezeit für Restrike Tests an diesen Probepfählen möglichst lang zu wählen und die Ergebnisse im Pfahldesign der Bauwerkspfähle zu berücksichtigen. Jedoch werden nur in wenigen Fällen Probepfähle hergestellt, die für die Durchführung der Nachrammung ausreichend lange zugänglich gehalten werden können.

Bei der Prüfung von Bauwerkspfählen verlangen die Vorgaben des Planungs- und Installationsprozesses meist eine kurze bis sehr kurze Wartezeit (Abb. 3). Es liegt dann im Wesentlichen am zeitlichen Ablauf der Pfahlinstallation und an vertraglichen Aspekten zwischen Installationsunternehmen und Bauherr, wie viel Wartezeit zur Verfügung gestellt werden kann.

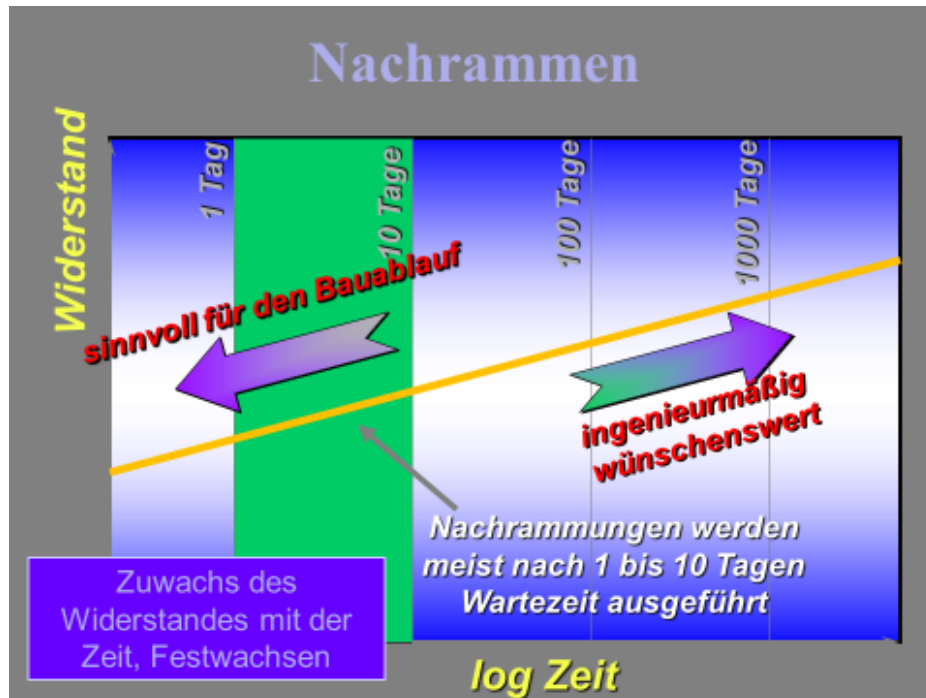


Abbildung 3: Wirtschaftliche oder sichere Wartezeit (Illustration nach Dr. Julian Seidel)

Werden keine Probepfähle hergestellt, so sollte zwingend bereits in der Arbeitsvorbereitung darauf geachtet werden, dass Pfähle auch nach einer gewissen Wartezeit für die Prüfung zugänglich bleiben. Dieser Zwang ergibt sich aus der Notwendigkeit der Bestimmung des Festwachsfaktors vor allem dann, wenn der zu erwartende Widerstand am Ende der Rammung für die Nachweisführung nicht ausreichend groß ist. Die Erfahrung zeigt, dass dies kein seltener Fall ist.

Bei größeren Pfahlgruppen ist es in der Regel nicht möglich, innere Pfähle außerhalb der Reihenfolge zu prüfen.

Auch die Kosten für den Geräteeinsatz müssen beachtet werden. In der Regel lohnen sich Nachrammungen, solange das Rammgerät auf der Baustelle verfügbar ist. Ein erneutes Anfahren einer Baustelle mit schwerem Rammgerät ist häufig so kostspielig, dass der Ansatz höherer Pfahllasten keinen wirtschaftlichen Vorteil bringt. Nicht nur die reinen Transportkosten sondern auch die Befahrbarkeit der Zugangswege sind zu beachten.

Dazu kommt, dass für die Durchführung von dynamischen Probelastungen Sensoren und Kabel am Pfahl derart montiert werden müssen, dass die Messungen auf jeden Fall erfolgreich abgeschlossen werden können. Hierfür muss Zeit und Zugänglichkeit gegeben sein. Für das Monitoring der Rammung können diese Tätigkeiten bei guter Planung im

Vorfeld, guter Kooperation mit den beteiligten Entscheidungsträgern und den praktisch erfahrenen Verantwortlichen i.d.R. ohne Verzögerungen der Installationsprozesse optimal in die Abläufe integriert werden, sodass dafür kein signifikanter Mehraufwand entsteht.

Um den Aufwand für die Durchführung von Restrike Tests auf das mögliche Minimum zu reduzieren, ist es erforderlich, die für die dynamische Probelastung Zuständigen frühzeitig in die Arbeitsvorbereitung einzubinden. Leider zeigt die Erfahrung, dass diese Zusammenhänge nicht erkannt werden und dadurch unnötig hohe Kosten entstehen. Da die geotechnische Problemstellung von den Beteiligten nicht richtig erkannt werden kann oder manchmal gar ignoriert wird, folgen dann Argumentationen, wie z.B. die dynamische Probelastung störe bei der Arbeit, verursache exorbitante Kosten und führe zu keinem verwertbaren Gewinn. Dies ist selbstverständlich nicht der Fall. Der gute Wille aller Beteiligten für eine erfolgreiche Durchführung der Messung, ist jedoch die wichtigste Grundvoraussetzung.



Abbildung 4: Zugänglichkeit des Pfahls für die Montage von Sensoren beim Nachrammen
(links: vom schwankenden Boot, rechts: vom Mannkorb)

4.2 Masse und Energie des Rammgeräts

Für das Einrammen der Pfähle wird der Effekt, dass der Widerstand durch den Rammvorgang verringert ist, dadurch genutzt, dass das Rammgerät ausgewählt wird, welches gerade in der Lage ist, den Pfahl auf Endtiefe einzurammen. Das heißt, das Rammgerät ist aus wirtschaftlichen Gründen für einen geringeren als den Widerstand im festgewachsenen Zustand ausgelegt. Nicht nur das Gewicht des Rammgeräts allein ist für die Kosten

bestimmend, sondern es sind auch die Kosten für Transport und das Heben und Bewegen des Rammgeräts zu berücksichtigen.

Beim Nachrammen kann es vorkommen, dass dieses, für das Einrammen genügende, Gerät nicht in der Lage ist, den tatsächlichen Widerstand zu aktivieren. Es wird dann oftmals das Ziel des Nachweises eines bestimmten Widerstandes nicht erreicht. Insbesondere wenn der Spitzendruck ein wesentliches Element der Lastabtragung darstellt, hat die Mantelreibung im festgewachsenen Zustand schon die eingebrachte dynamische Kraft aufgenommen und nur eine geringe Kraft bzw. Energie steht dafür zur Verfügung, den Spitzendruck zu aktivieren. Dieser aktivierte Spitzendruck ist dann kleiner als der tatsächlich mögliche.

Wenn es in solchen Fällen gelingt, den Pfahl zu bewegen und einen Rammfortschritt wie zum Ende des Einrammens zu erreichen, kann der Gesamtwiderstand näherungsweise durch die Überlagerung der hohen Mantelreibung zu Anfang des Nachrammens und des hohen Spitzendrucks zum Ende des Nachrammens bestimmt werden. Dieses Vorgehen kann auch gewählt werden, wenn bei aufeinanderfolgenden Schlägen die Mantelreibung in tieferen Bodenschichten immer stärker aktiviert werden kann. Diese Erfahrung und das vorgeschlagene Vorgehen wurden auch von LIANG u.a. 2014 für die Prüfung von Pfählen, die bei 190 m Wassertiefe 143 m in den Seeboden einbinden, beschrieben.

4.3 Hammerperformance

Wenn das Rammgerät theoretisch in der Lage ist, den Pfahl-Boden-Widerstand des festgewachsenen Zustandes zu aktivieren, muss darauf geachtet werden, dass dies auch praktisch umgesetzt wird.

Insbesondere, wenn das Rammgerät zwischen dem Einrammen und dem Nachrammen längere Zeit nicht betrieben z.B. auf der Baustelle zwischengelagert wird, benötigt es i.d.R. mehrere Schläge, um die nominelle Leistung bzw. die für den Test notwendige Energie zu erreichen. Dieser Effekt ist für Hydraulikhämmer, die auf ein leistungsfähiges Hydraulikaggregat angewiesen sind, eher gegeben als für Dieselhämmer. Es hängt von der Erfahrung und vom Fingerspitzengefühl des Hammeroperators ab, ob es im gegebenen Fall sinnvoller ist, Einzelschläge durch manuelle Steuerung aufzubringen oder Schläge mit automatischer Schlagsequenz auszuführen.

Wenn die Nachrammung aber mit geringer Energie begonnen wird, so kann es sein, dass der für den Nachweis erforderliche Teil der Mantelreibung in diesen ersten Schlägen schon teilweise oder vollständig abgebaut wird, bevor das Rammgerät die erforderliche Energie zur Aktivierung des vollständigen Widerstandes des festgewachsenen Zustandes erreicht (siehe Beispiele in Abschnitt 5 und Darstellung bei LIANG u.a. 2014).

Oft spielen diesbezüglich auch vertragliche Regelungen mit wirtschaftlichen oder ökologischen Hintergründen, wie der Schutz spezieller Meeresfauna, eine Rolle, die im Widerspruch zur fachlich optimalen Performance stehen können.

4.4 Erfassung des Rammfortschritts

Für die Auswertung der dynamischen Pfahlprobebelastung als Restrike Test sollte die bleibende Setzung mit mm-Genauigkeit nach jedem Einzelschlag bestimmt werden können. Da, wie oben erwähnt, die Messungen als „störendes Element“ oft erst viel zu spät zwangsweise planerisch zu einem Zeitpunkt eine Rolle spielen, zu dem die Methoden der Erfassung des Rammfortschritts längst geplant, genehmigt und konstruktiv umgesetzt sind, kann dieser Forderung nur näherungsweise Rechnung getragen werden.

Während es bei Ausführung von Einzelschlägen an Land meist kein größeres Problem ist, die bleibende Setzung mit der verlangten Genauigkeit zu bestimmen, ist es für Pfähle für Anleger oder uferentfernte Ladebrücken schwierig und für Offshore-Pfähle eine größere Herausforderung. Dies ist vor allem gegeben, wenn sich die Pfahlköpfe beim Rammen unter Wasser befinden.

Wird die Eindringung summarisch für eine Anzahl von Einzelschlägen bestimmt (Hitze) oder die Anzahl der Schläge für eine vorgegebene Eindringung (25 cm oder 10 cm), so lässt sich hieraus die bleibende Setzung des Einzelschlages nur näherungsweise bestimmen. Dies ist für die Auswertung von Restrike Test i.d.R. zu ungenau bzw. gänzlich unbrauchbar. Spezielle Markierungen an Pfahl und Rammhaube in der erforderlichen Auflösung können bei gleichzeitiger Beobachtung mit geeigneten Mitteln („über Flucht peilende Kamera“ am ROV o.ä.) zu einer sinnvollen Verbesserung führen, siehe Beispiel in 5.1.

Von RAUSCHE u.a. 2004 wurde darauf hingewiesen, dass die Bestimmung des Rammwiderstandes je nach Vorgehensweise von der Schlagzahl pro Einheitseindringung oder

der Eindringung pro Schlag zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Dies ist bei Tragfähigkeitsnachweisen zu beachten.

4.5 Anzahl der Rammschläge und Rammweg

Theoretisch wäre es zur Bestimmung des Festwachsfaktors ausreichend, den ersten Rammschlag des Nachrammens zur Bestimmung des Widerstandes auszuwerten. Aufgrund der praktischen Probleme, die mit der Ausführung von Nachrammungen verbunden sind, ist es nach der Erfahrung der GSP immer sinnvoll, mehrere Rammschläge auszuführen.

Da nicht unbedingt damit gerechnet werden kann, dass der Pfahl beim Nachrammen so festgewachsen ist, dass er nicht mehr bewegt werden kann, ist ein gewisser Rammweg vorzuhalten. Dieser sollte nicht so groß sein, dass beim Nachrammen durch die tiefere Einbindung die geotechnische Situation verändert wird.

Gute Erfahrungen wurden mit Rammwegen von 5 cm bis 10 cm gemacht. Auch unter schwierigen Offshore-Bedingungen ist ein Absetzen des Pfahles bei 5 cm vor Endtiefe möglich gewesen.

Liegt kein Ergebnis vom Ende der Rammung vor, sollte die Nachrammstrecke größer gewählt werden (z.B. 25 cm bis 50 cm), damit während der Nachrammung der Anwachs-effekt aufgehoben und die realistische Abschätzung des Festwachsfaktors ermöglicht wird.

4.6 Normative Aspekte

Nach der aktuellen Fassung der Anwendungshinweise zum Standard „Konstruktion“ des BSH von 2012 bzw. den dort angesprochenen Vorgaben aus EA-Pfähle 2012, EC7 und DIN 1054-2012 sind dynamische Probelastungen für die Nachweisführung von hauptsächlich vertikal beanspruchten Offshore-Pfählen mit einer Mindestanzahl durchzuführender Messungen gefordert. Eine derartige Forderung für Restrike Test gibt es derzeit noch nicht. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass diese Messungen generell angewendet werden sollen, wenn die zeitliche Entwicklung der Tragfähigkeit im Nachweis berücksichtigt werden soll.

Wenige Projekte haben gezeigt, dass der Nutzen der Informationen aus den Tests während der Nachrammung von Projektbeteiligten erkannt und deshalb baubegleitend und

standortspezifisch sowohl der Prüf- (mehr Testpfähle) als auch der Auswertumfang (zusätzliche Auswertung von Einzelschlägen in verschiedenen Einbindetiefen, die Ausnutzung von unplanmäßigen Ramppausen für weitere Auswertungen zum Festwachsen) erhöht wurde. Dabei hat sich gezeigt, dass die so gewonnene Information über den standortspezifischen Festwachs faktor hilfreich für den Tragfähigkeitsnachweis nach EC7 ist.

Einige andere Projekte haben gezeigt, dass die möglichst genaue messtechnische Ermittlung des Festwachsens durch Nachrammungen sogar unabdingbar für die Nachweisführung ist, da die prognostizierten Tragfähigkeiten am Ende der Rammung nicht nachweisbar waren.

Aus diesen Gründen wird von den Autoren empfohlen, bei der jetzigen Praxis baubegleitender dynamischer Probelastungen an Gründungspfählen von Offshore-Strukturen zu bleiben und zusätzlich Nachrammungen explizit auch mit einer Mindestanzahl zu fordern.

Die zusätzliche Durchführung von Messungen an Probepfählen im Vorfeld kann wichtige Informationen liefern, die Einfluss auf Pfahldesign und Rammsystem des Projekts haben können.

5 Beispiele

Die bisher beschriebenen Aspekte sollen anhand von einigen ausgewählten Beispielen, bei denen die Messungen von den Autoren dieses Beitrags durchgeführt und ausgewertet wurden, verdeutlicht werden.

Bei diesen Messungen wurden Sensoren, Kabel und Messgeräte (Pile Driving Analyzer®) der Fa. Pile Dynamics, Inc. USA eingesetzt. Abb. 5 zeigt links Sensoren für verschiedene Spezifikationen des Unterwassereinsatzes und das entsprechende Messkabel, rechts die Messgeräte, mit denen Daten von bis zu 8 Sensoren gleichzeitig, kabellos oder unter Verwendung von Messkabeln gesteuert werden können. Genauere Spezifikationen zur Messtechnik können z.B. SCHALLERT ET AL., 2011 entnommen werden.



Abbildung 5: Sensoren, Messkabel und Messgerät (Pile Driving Analyzer) zum Monitoring der Rammung und zur Durchführung von Restrike Tests - offshore und onshore

5.1 Erfolgreiche Restrike Tests

Dieses Beispiel zeigt einen Ausschnitt aus dem Monitoring der Rammung von Gründungspfählen von Offshore Windenergieanlagen zum Ende der Rammung und zu Beginn der Nachrammung im vorwiegend nichtbindigen (Abb. 6) und vorwiegend bindigen Boden (Abb. 7). Jeweils links sind die in den Pfahl eingetragene Energie (blau) und die Schlagzahlen je Einheitseindringung (rot) über die Tiefe dargestellt. Rechts ist der entsprechende nach der CASE-Methode berechnete Tragfähigkeitsverlauf für einen für das Beispiel willkürlich gewählten Dämpfungsfaktor gezeigt.

In beiden Fällen war es möglich, zu Beginn der Nachrammung durch Einzelschläge höherer Energie und im weiteren Verlauf näherungsweise die Energie im Vergleich zum Ende der Rammung aufzubringen.

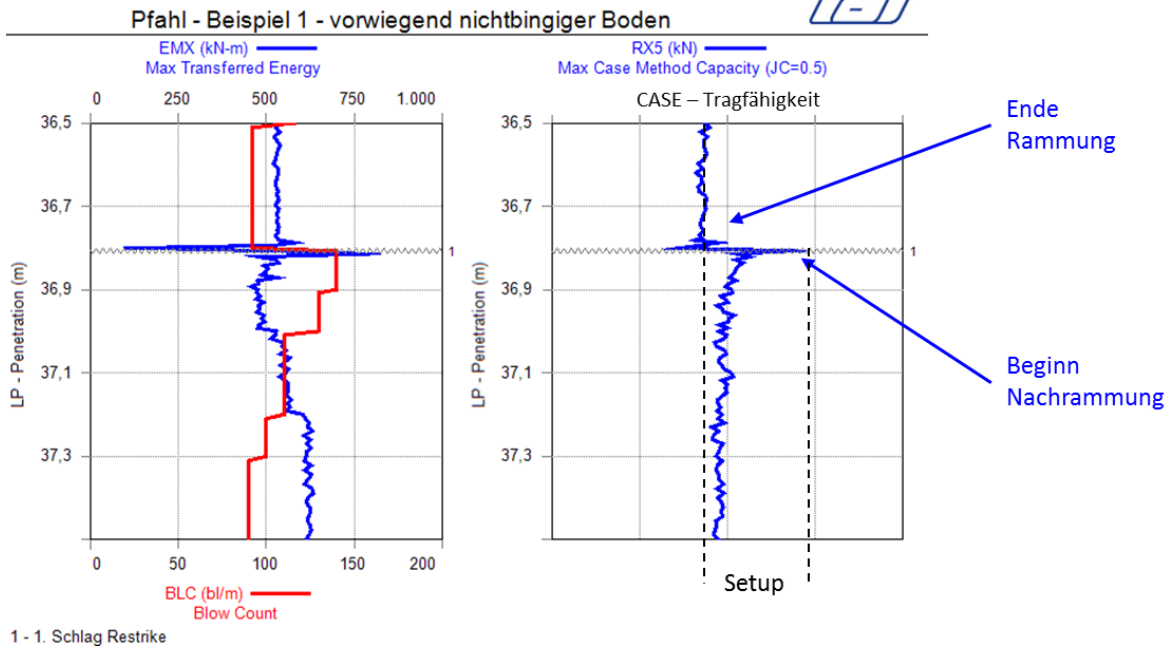


Abbildung 6: Energie, Schlagzahlen (Blowcount) und Widerstand im vorwiegend nichtbindigen Boden am Ende der Rammung und zu Beginn und Ende der Nachrammung

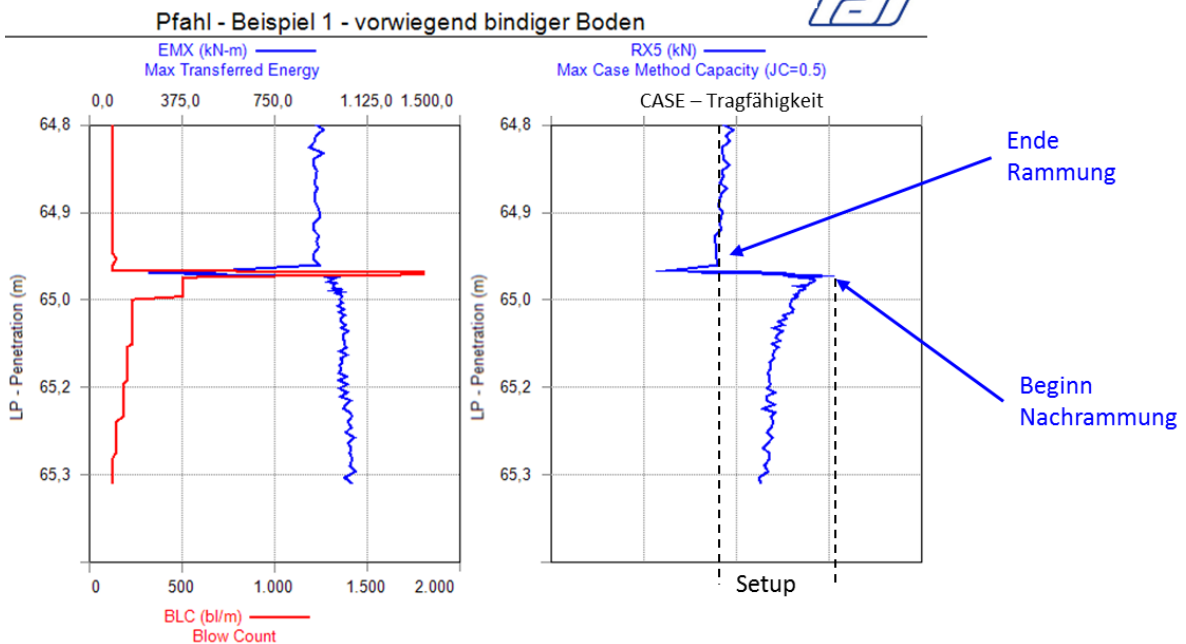


Abbildung 7: Energie, EMX, Schlagzahlen (BLC) und Widerstand (RX5) im vorwiegend bindigen Boden am Ende der Rammung und zu Beginn und Ende der Nachrammung

Die Rammstrecke beim Restriktre Test betrug in beiden Fällen mehr als 30 cm, wodurch die Tragfähigkeit der Pfähle durch vollständige Modellbildung für die 3 Zustände

- Ende der Rammung (eod - end of driving)
- Beginn der Nachrammung (bor - begin of redrive) und
- Ende der Nachrammung (eor - end of redrive)

zuverlässig bestimmt und die Festwachsfaktoren ermittelt werden konnten.

Die Verschiebung bei den ersten Rammschlägen konnte ausreichend genau mit Hilfe einer Unterwasserkamera und Markierungen am Pfahl beobachtet werden (Abb. 8, links).

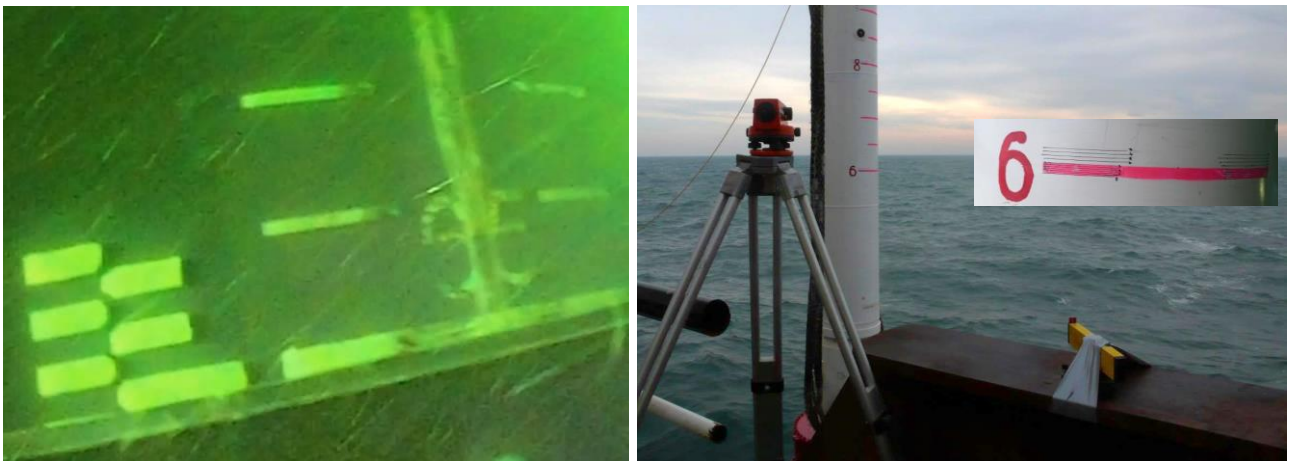


Abbildung 8: Markierungen am Pfahl zur möglichst genauen Erfassung des Rammfortschritts beim Restrike Test

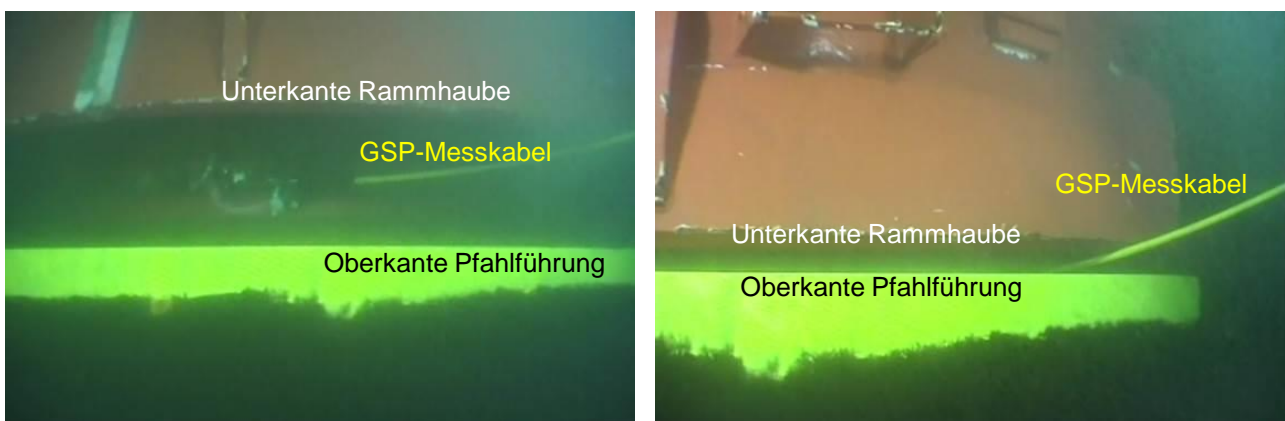


Abbildung 9: Beginn (links) und Ende (rechts) eines erfolgreichen Restrike Tests

Abb. 9 zeigt derartige Aufnahmen von einem Restrike Test, der mit ausreichend Vorlauf mit allen Projektbeteiligten geplant und hinsichtlich Sensorpositionen am Pfahl, Kabelführung am Pfahl und zur Monitoring-Station optimal durchgeführt werden konnte. Am Ende der Nachrammung bei planmäßiger Einbindetiefe betrug der Abstand zwischen Oberkante

Pfahlführung und Unterkante Rammhaube gerade eine Daumenbreite, die für die Durchführung des Messkabels hinreichend groß war.

Für das in Abb. 7 gezeigte Beispiel der Rammung offener Stahlrohrpfähle im vorwiegend nichtbindigen Boden wurden Festwachsfaktoren von bis zu ca. 1,5 ermittelt, siehe Abb. 10 und KIRSCH ET AL. (2012).

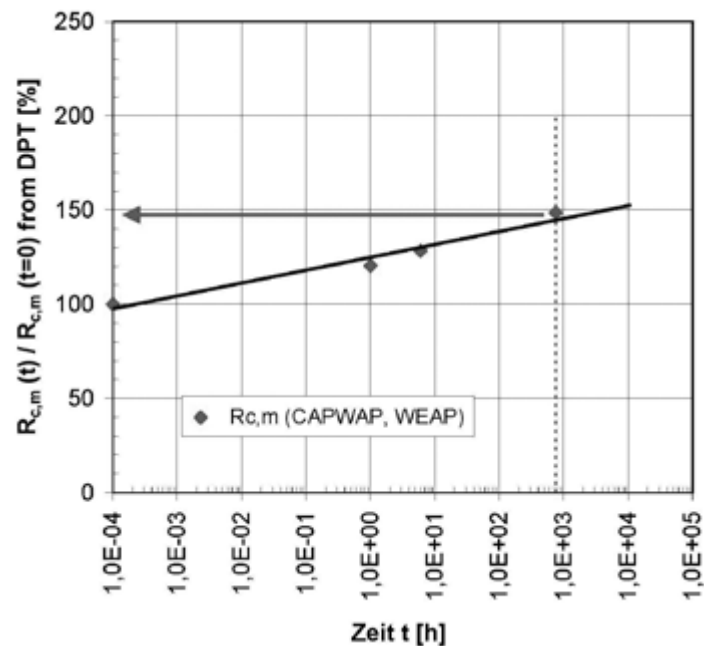


Abbildung 10: Festwachsfaktoren aus KIRSCH ET AL. (2012).

5.2 Restrike Test - schwache Hammerperformance

Anhand dieses Beispiels ist zu erkennen, dass es nicht gelang, zu Beginn der späten Nachrammung die erforderlich hohe Energie aufzubringen, um die Widerstände vollständig zu mobilisieren. Die eingetragene Energie im Pfahl steigt langsam von einem niedrigen Wert auf annähernd den Wert an, der am Ende der Ein-Rammung vorhanden war. Bis dahin wurden 7-8 Schläge aufgebracht und eine Strecke von ca. 3-5 mm gerammt.

Der Verlauf des Pfahlwiderstandes von Schlag zu Schlag zeigt einen Anstieg mindestens bis zu dem Schlag, ab dem die Energie konstant bleibt. Nach weiteren 10mm Rammfortschritt ist der Festwachseffekt aufgehoben, der Pfahlwiderstand nimmt ab.

Zur Bestimmung eines konservativen, auf der sicheren Seite liegenden, Festwachsfaktors wird ein Schlag mit repräsentativ hoher Energie durch vollständige Modellbildung ausge-

wertet, also im Beispiel Pfahl 2 (untere Grafik) ein Schlag zwischen 8 und 10, für Pfahl 1 (obere Grafik) ein späterer Schlag, da der Widerstand auch nach Schlag 10 zunächst weiter ansteigt.

Der reale Festwachs faktor lässt für beide Pfähle aus den Messungen nicht eindeutig bestimmen. Es sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.

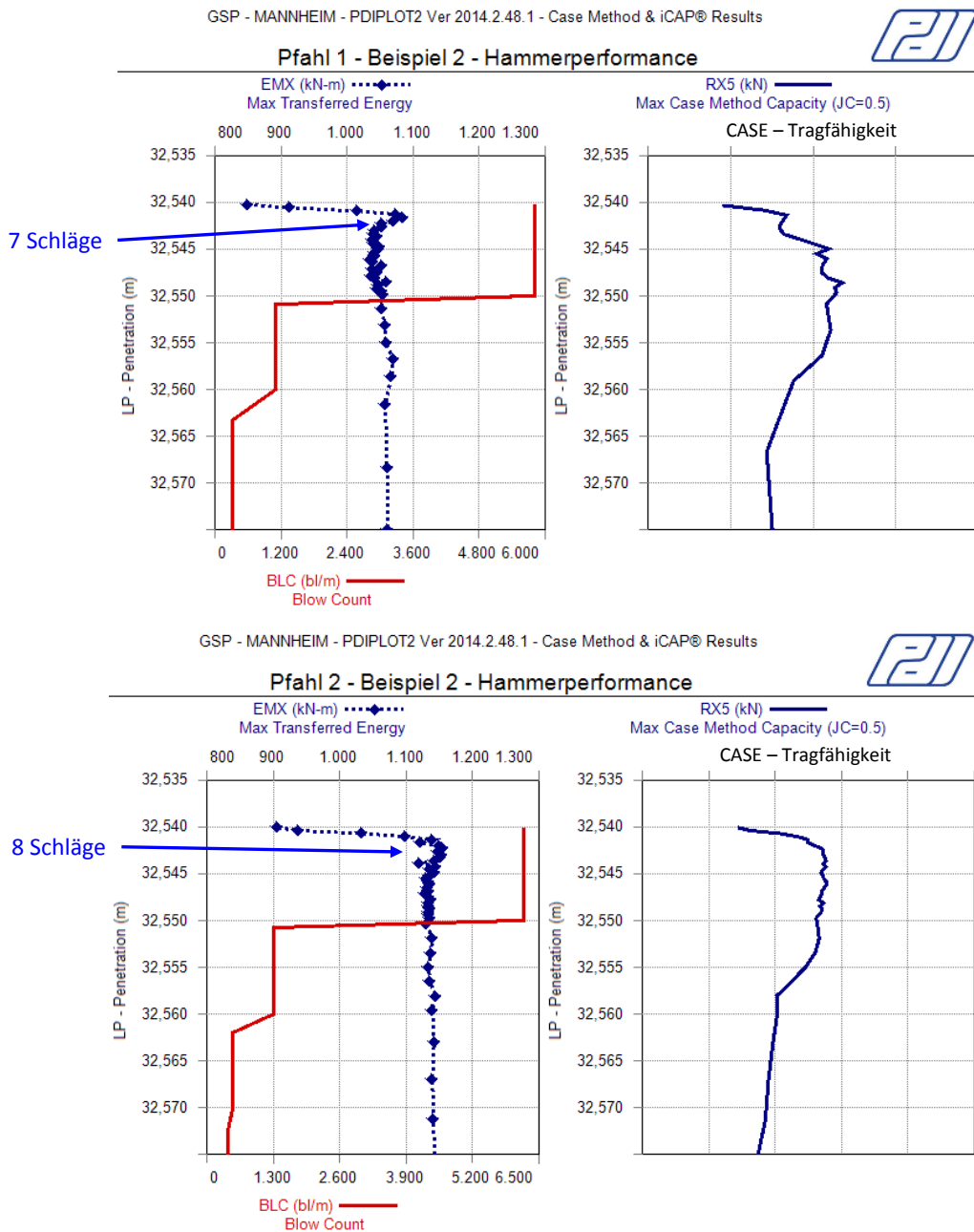


Abbildung 11: Entwicklung der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der eingeleiteten Energie zu Beginn eines Restrike Tests

Dazu kann z.B. die Auswertung mehrerer Einzelschläge gehören und die Methode der Superposition der Widerstände verschiedener Schläge, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, kann auf geotechnische Verträglichkeit geprüft werden.

Die genaue Analyse der Rammdaten, vorausgesetzt der Rammfortschritt konnte ausreichend genau in mm/Schlag ermittelt werden, kann oft schon zu einer deutlich genaueren Aussage des realen Festwachsfaktors für derartige Fälle führen. Dabei wird der Teil der Nachrammung betrachtet, der sich unmittelbar an den Teil mit nicht ausreichender Hammerperformance anschließt. Wird die Schlagzahl über der Eindringung des Pfahls aufgetragen, kann aus diesen Daten ohne tiefgreifende geotechnische Analyse mit einfachen mathematischen Approximationen die Schlagzahl je Einheitseindringung zu Beginn des Restrikes extrapoliert und eine Tragfähigkeit ermittelt werden, die der Ermittlung des realen Festwachsfaktors deutlich näher kommt.

5.3 Ungenutzte Ramppause

Bei einer Umspannplattform, gegründet auf einer Jacket-Struktur, war keine Nachrammung vorgesehen. Die dynamischen Probelastungen wurden auch erst kurzfristig wenige Tage vor dem Offshore-Einsatz geplant und beauftragt. Es bestand keine Möglichkeit, die Prozesse im Sinn einer optimalen Messung für den Tragfähigkeitsnachweis zu beeinflussen.

Die Auswertungen vom Ende der Rammung ergaben jedoch geringe Widerstände, die nicht zu einer erfolgreichen Nachweisführung ausreichten.

Bei einem Pfahl gab es eine wetterbedingte einwöchige Ramppause, die die Möglichkeit eines Restrike Tests gegeben hätte. Die ersten Schläge der Nachrammung wurden als Einzelschläge mit sehr geringer Energie zum Vertreiben der Schweinswale ausgeführt. Die folgenden Schläge konnten aus betrieblichen Gründen nur ohne Sensoren am Pfahl ebenfalls mit geringer Energie, die nur langsam gesteigert wurde, aufgebracht werden. Erst dann, nach einer Rammstrecke von knapp 2 m, erfolgte die Pfahlinstrumentierung und die restliche Rammstrecke konnte messtechnisch erfolgreich begleitet werden. Während der Nachrammung dieser ersten ca. 2 m wurde der mobilisierbare und für den Nachweis wichtige Zuwachs der Mantelreibung weitgehend abgebaut, ohne messtechnisch erfasst werden zu können.

Abb. 12 zeigt für diesen Pfahl die vom Rammsystem aufgezeichneten Schläge je 25 cm Eindringung bis zur Rammunterbrechung in grün. In blauer Farbe sind die entsprechenden Werte der Nachrammung aufgetragen.

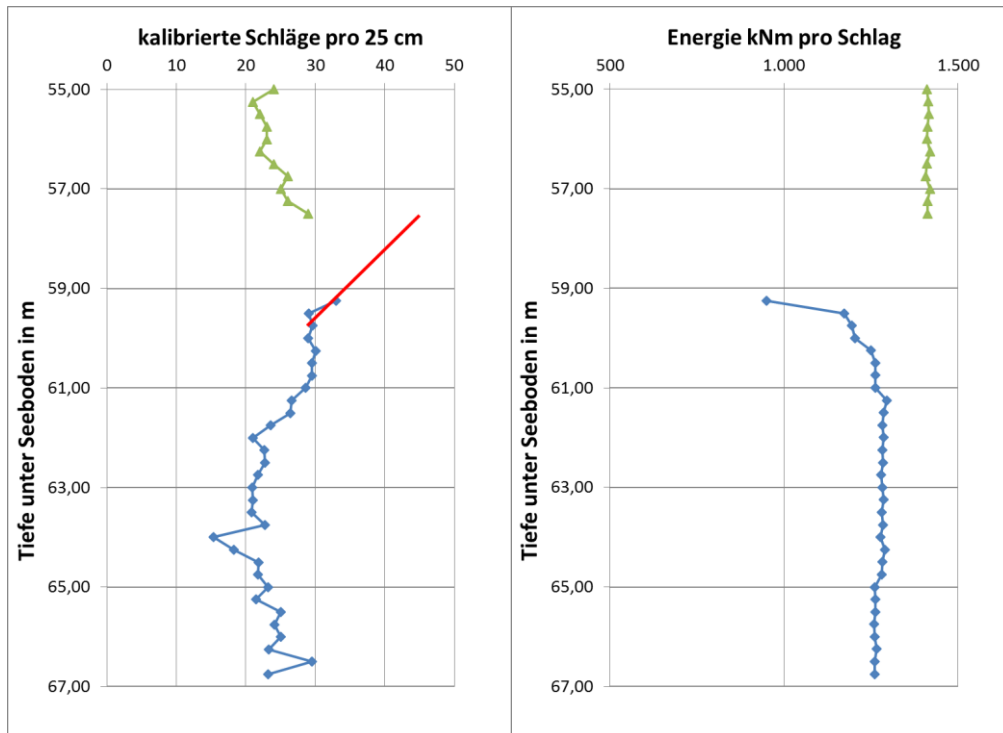


Abbildung 12: Rammprotokoll vor (grün) und nach (blau) einer Rammpause, Extrapolation fehlender Rammdaten zu Beginn der Nachrammung

Die Aufgabe für die Nachweisführung bestand nun darin, aus den Ramm- und Messdaten der Nachrammung einen Festwachs faktor abzuschätzen. Die Schläge pro 25 cm wurden mit Bezug auf die Energie zum Ende des Einrammens skaliert, so dass sie vergleichbar sind. Durch einen ingenieurmäßig pragmatischen Ansatz wurde der Rammverlauf zu Beginn der Nachrammung rekonstruiert (rote Linie in Bild 12 rechts).

Mit der Bestimmung der Schlagzahl zum Beginn des Nachrammens und damit der Setzung pro Schlag konnte über eine Wellengleichungsberechnung (GRLWEAP®) der Widerstand nach der Wartezeit von 1 Woche und so ein pfahl- und standortspezifischer Festwachs faktor bestimmt werden, der die Nachweisführung näherungsweise ermöglichte.

5.4 Restrike Tests - ungeplant

Im diesem Beispiel wurden die Unterwasserrammung von Gründungspfählen an einer Vielzahl von Standorten von Offshore Windenergieanlagen messtechnisch begleitet und planmäßig nach kurzer Standzeit Restrike Tests durchgeführt. Nachrammungen nach längerer Standzeit wurden bauseits versucht zu vermeiden und deshalb gar nicht erst in die Planung einbezogen und waren daher auch nicht Bestandteil des bauseits vorgegebenen Pfahlprüfungskonzepts. Die druckwasserdichten Sensoren und Kabel waren daher nicht mit druckwasserdichten Steckverbindungen auf Seite der Monitoring-Station entsprechend bauseitig fehlender Spezifikation ausgestattet worden. Da es zunächst auch kein Konzept zur Bergung der Kabel vom Pfahl nach der Pfahlinstallation gab, wurden diese zu Beginn willkürlich im freien Fall dem Wasser und Meeresboden anvertraut.

Im weiteren Projektverlauf ergab sich dann aber doch die behördliche Vorgabe der Messungen nach längerer Standzeit mit der Folge, dass Steckverbindungen manuell für eine am Ende der Messung unbekannte Dauer druckwasserdicht versorgt und die am Meeresboden unkontrolliert gelagerten Kabel anfangs mit größerem Zeitaufwand geborgen werden mussten.



Abbildung 13: Bergung Messkabel für Restrike Tests

Am Projektende waren an mehr als 10 Standorten Restrike Tests nach Standzeiten von bis zu 100 Tagen erfolgreich durchgeführt worden.

6 Zusammenfassung

Die Ausführungen in diesem Beitrag zeigen, dass die Bestimmung von standortspezifischen Festwachs-faktoren für Standorte von Offshore-Strukturen durch dynamische Pfahlprobebelastungen zuverlässig, wenn auch konservativ mit guter Näherung an das reale Anwachsen, ermittelt werden können. Die Voraussetzungen dafür sind:

- Frühzeitige Berücksichtigung der Messungen und der damit verbundenen Belange in der Planung,
- Für den Restrike Test erforderliche Hammergröße und -performance,
- Genaue Erfassung des Rammfortschritts (mm-Genauigkeit) während der Nachrammung und zuverlässige Rammprotokolle vom Ende der Rammung (Anzahl der Schläge je 25 cm Rammfortschritt),
- Möglichkeit der Aufbringung mehrerer Schläge beim Nachrammen für eine abgestimmte Nachrammstrecke.

Die aus den Messungen, Auswertungen und Interpretationen gewonnen Informationen sind in vielen Fällen für den Tragfähigkeitsnachweis der Gründungpfähle nach EC7 unabdingbar, da die direkt nach Ende Rammung bestimm-baren Tragfähigkeiten dafür oft unzu-reichend sind.

Literatur

BSH - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie; Standard Konstruktive Ausführung von Offshore Windenergieanlagen, Juni 2007.

BSH - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie; Anwendungshinweise für den Standard Konstruktive Ausführung von Offshore Windenergieanlagen, Januar 2011, Überarbeitung 2012.

Bullock, P.J.; The Easy Button for Driven Pile Setup: Dynamic Testing. *From Research to Practice in Geotechnical Engineering, Geotechnical Publication No.180, Laier, J. E., Crapps, D. K., and Hussein, M. H., February 2008, Eds, American Society of Civil Engineers: Reston, Virginia; 471-488.*

DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle (EA-Pfähle) 2. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

DIN 1054:2010-12 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.

DIN EN 1997-1:2009-09 – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, September 2009.

DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Allgemeine Regeln.

Kirsch, F., von Barges, M.; Offshore Windpark Nordsee Ost – Sichere Gründung bei Wind und Welle, 32. *Baugrundtagung*, 26.-29.09.2012 in Mainz, S. 21--25.

Liang, L., Webster, S., Yuan, R., Tian, H., Han, Y., Wang, C., Yu, L.; Prediction of Long Term Capacity using Dynamic Testing for Underwater Skirt Pile Foundation. *Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference: June 2014. Busan, Korea;* 660-667.

Rausche, F., Thendean, G., Abou-Matar, H., Likins, G., and Goble, G.; Determination of pile driveability and capacity from penetration tests, *FHWA Contract No. DTFH61-91-C-00047, Federal Highway Administration, 1996, McLean Virginia, USA.*

Rausche, F., Robinson, B., Likins, G. E.; On the Prediction of Long Term Pile Capacity From End-of-Driving Information. *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations, Geotechnical Special Publication No. 125, DiMaggio, J. A., and Hussein, M. H., Eds, August 2004. American Society of Civil Engineers: Reston, VA;* 77-95.

Schallert, M., Klingmüller, O., Riecke, R. Galal, G.; Erfolgreicher Einsatz kabelloser Messtechnik bei der dynamischen Pfahlprüfung von Gründungspfählen von Offshore - Bauwerken, *Pfahl-Symposium. 2011, 17.-18.02.2011 in Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 94.*

Schneider, J.A., Harmon, I.A.; Analyzing Drivability of Open Ended Piles in Very Dense Sands, *DFI Journal, Vol.4, No.1, August 2010, pp. 32-44.*

Seidel, J.P. and Kalinowski, M. (2000); Pile set-up in sands. 6th Intl. Conf. on Application of Stress-wave Theory to Piles. Sao Paulo, Brazil, Sept., 2000.

Skov, R., Denver, H.; "Time-Dependence of Bearing Capacity of Piles," *Proceedings 3rd International Conference on Application of Stress-Waves to Piles, (1988), pp. 879-888.*

Autoren

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller
Dipl.-Ing. Christian Mayer
Dr.-Ing. Matthias Schallert
GSP - Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen
und dynamische Prüfmethode mbH, Mannheim
Steubenstraße 46, 68163 Mannheim, Deutschland

P.E., Ph.D. Frank Rausche
Pile Dynamics, Inc.
30725 Aurora Road, Cleveland, OH 44139, USA

ok@gsp-mannheim.de
cm@gsp-mannheim.de
ms@gsp-mannheim.de

www.gsp-mannheim.de
Tel.: 0621 33 13 61

frausche@pile.com
www.pile.com
Tel. 001 216 831 6131