

Rammprotokoll und Tragfähigkeit WEAP - CAPWAP - CAPWEAP

Oswald Klingmüller, Mannheim und Frank Rausche, Cleveland

Inhalt

1. Einleitung
2. GRLWEAP – Vorberechnung des Rammens und Rammen der Testpfähle
Ergebnisse der dynamischen Tragfähigkeitsprüfung mit vollständiger
Modellbildung CAPWAP und der statischen Tragfähigkeitsprüfung
4. Dynamische Prüfung an zusätzlichen Test-Pfähle zur Bestimmung der
Rammtiefe mit vollständiger Modellbildung CAPWAP
5. Nachberechnungen mit GRLWEAP und CAPWEAP

Contents

The combination of GRLWEAP a priori calculations to prepare a driving job, evaluation of dynamic pile tests by CAPWAP and static pile tests with a posteriori modelling of pile driving by GRLWEAP and CAPWEAP is discussed. An illustrative example shows the application of this combined approach to a difficult piling job where very soft cohesive soil is covering the competent sand.

Zusammenfassung

Die Verbindung von Vorberechnungen von Rammvorgängen mit der Wellengleichungsmethode (GRLWEAP) mit der Auswertung dynamischer Pfahltests ausgewertet mit der CAPWAP-Modellbildung unter Berücksichtigung der Ergebnisse statischer Pfahltests und anschließender Nachberechnung mit GRLWEAP und CAPWEAP wird erläutert. Das konsequente Vorgehen wird durch ein Beispiel einer Pfahlgründung in schwierigen Bodenverhältnissen mit sehr weichen bindigen Schichten über tiefliegenden tragfähigen Sanden illustriert.

1. Einleitung

Mit dem Programm GRLWEAP™ ist es möglich, Rammvorgänge voraus zu berechnen und nachzuvollziehen. Insbesondere die Nachberechnung ermöglicht die Bestimmung der Tragfähigkeit aus der Angabe der Schlagzahlen. Gegenüber den empirischen Rammformeln hat die Wellengleichungsmethode, welche die Grundlage des Programms bildet, den Vorteil, dass nicht nur das elastische Verhalten des Pfahles sowie des Rammgerätes mit Rammhaube und Futter sondern auch die Bodenschichtung mit Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten genau modelliert werden kann. Bei der Vielzahl der beteiligten Parameter ist die zuverlässige und richtige Bestimmung der Tragfähigkeit aus erreichten Schlagzahlen darauf angewiesen, vorhandene Informationen über den Rammvorgang und das Tragverhalten in die Berechnung einzubringen.

Das Vorgehen wird im folgenden erläutert, wobei die Einbeziehung von Ergebnissen statischer und dynamischer Pfahlprüfungen beispielhaft anhand einer Projektbearbeitung erläutert wird.

Im Zuge der Erweiterung der Gas-Verflüssigungsanlage auf Bonny Island in Südost Nigeria wird ein neuer Anleger für die Warenanlieferung und den Personentransport gebaut. Der Anleger besteht aus einer Zufahrt und einem Ladedeck aus Betonfertigteilen. Diese werden auf gerammte Stahlpfähle als offene Rohrprofile gesetzt. Auf Grund der Bodenverhältnisse müssen die Stahlpfähle durch den weichen und verformungsfähigen Ton in den tragfähigen Sand gerammt werden. Die Anforderungen der Zufahrtsbrücke, des Ladedecks, der Festhaltepunkte und der Kranbahnlager führen zu unterschiedlichen Nutzlasten und damit verschiedenen Einbindetiefen.

Durch Vorberechnung mit der Wellengleichungsmethode (Programm GRLWEAP®) für die aus den Bodenuntersuchungen abgeleiteten Tragfähigkeitswerte – Mantelreibung und Spitzendruck – wurden die für die nachzuweisende Tragfähigkeit aufzubringenden Schlagzahlen ermittelt. Die Richtigkeit dieser Rammkriterien wurde

durch dynamische Prüfungen an 5 Testpfählen überprüft. Durch statische Pfahlprüfungen konnte das Zeitsetzungsverhalten und der Zusammenhang zwischen den dynamischen und den statischen Ergebnissen bestimmt werden. Die Abweichungen im statischen und dynamischen Verhalten führten zur Aufstellung eines speziellen zusätzlichen dynamischen Testprogramms durch das die endgültige Pfahllänge festgelegt wurde.

Die Auswertung des umfangreichen Testprogramms ermöglichte dann auch, durch Nachberechnung der Rammvorgänge bei der späteren Rammung von Produktionspfählen Tragfähigkeiten einzelner Pfähle allein aus den Schlagzahlen zuverlässig zu bestimmen.

In der Planungsphase wurden Bodenuntersuchungen in üblicher Form mit der Entnahme (ungestörter) Bodenproben, Druck- und Rammsondierungen, ausgeführt. Zusammengefasst ergibt sich das in Bild 1 gezeigte übliche Schwemmlandprofil mit sehr weichen undrainierten bindigen Boden über einem Sand mit zunehmender Lagerungsdichte und Tragfähigkeit.

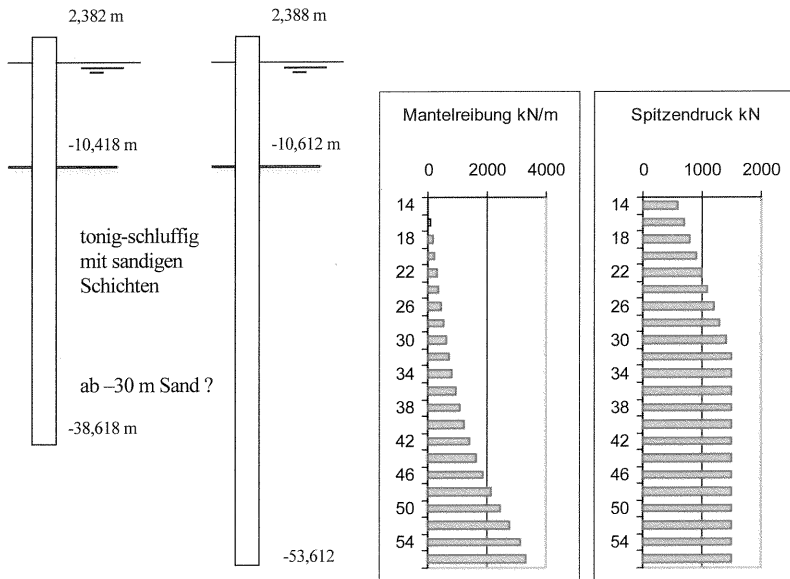
Für die Festlegung der Pfahllängen waren Prüfungen an 5 vorab gerammten Pfählen vorgesehen. Davon waren 2 auf die minimale Länge ausgelegt, 39 m Einbindung bezogen auf NN bzw. MSL - mean sea level) sowie 3 auf die erwartete Maximallänge von 54 m Einbindung. Je ein kurzer und ein langer Pfahl war auch statisch zu prüfen.

Es war vorgesehen, offene Stahlrohre ($\varnothing 762$ mm, Wandstärke 12 mm) mit einem Hydraulikhammer Menck MHF 5-12 mit 10-t-Rambär und 1,2 m Fallhöhe, nominelle Energie 104 kNm, einzubringen.

2. WEAP – Vorberechnung des Rammens und Rammen der Testpfähle

Aus den Sondierungsergebnissen wurden die Tragfähigkeiten als Mantelreibung und Spitzendruck (siehe Bild 1) abgeleitet und standen für die Vorberechnung mit dem Programm GRLWEAP® zur Verfügung (siehe Bild 2 und 3).

Bild 2 zeigt das Ergebnis der Rammbarkeitsuntersuchung.



Prüflast :

2.873 kN

5.449 kN

Bild 1 : Testpfähle, Bodenprofile und Prüflasten

Pfahlwiderstände aus Bodenprofil für WEAP-Vorberechnung

Bild 2 zeigt den errechneten Rammvorgang mit den Schlagzahlen (links) und der Entwicklung der Tragfähigkeit über die Tiefe (rechts). Bei 50 Schlägen auf 25 cm sollte also mit der Endtiefe ein statischer Rammwiderstand von 4.800 kN erreicht

werden. Es konnte davon ausgegangen werden, dass die Pfähle durch “Festwachsen” die erforderliche Zunahme auf die vorgesehene Prüflast von 5.449 kN nach kurzer Standzeit aufweisen. Bei einer Einbindung von 38 m wäre noch ein Rammwiderstand von 2.500 kN bei lediglich 15 Schlägen auf 25 cm zu erwarten. Hier wäre ebenfalls eine Zunahme mit der Zeit anzunehmen, um die erforderliche Tragfähigkeit von 2.800 kNm zu erreichen.

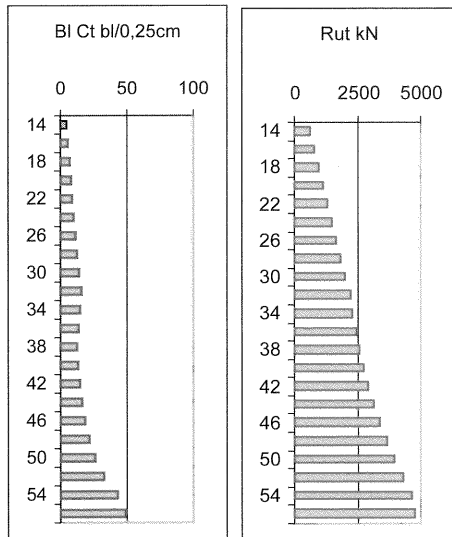


Bild 2 : Ergebnis der Rammbarkeitsuntersuchung –
zu erwartende Schlagzahlen und Entwicklung der Tragfähigkeit über die Tiefe

Wird das Bodenwiderstandsprofil aus Bild 1 für die jeweiligen Einbindungen von 54 m bzw. 38 m lediglich als proportionale Verteilung angesehen und zudem der Spitzendruck als Anteil des Gesamtwiderstandes angegeben, kann eine Tragfähigkeitskurve errechnet werden, die angibt wie groß die zu erwartenden Tragfähigkeiten bei höheren oder niedrigeren Schlagzahlen sind (siehe Bild 3).

Beim Rammen der Testpfähle zeigte sich, dass die Schlagzahlen die vorberechneten Werte erreichten (Bild 4).

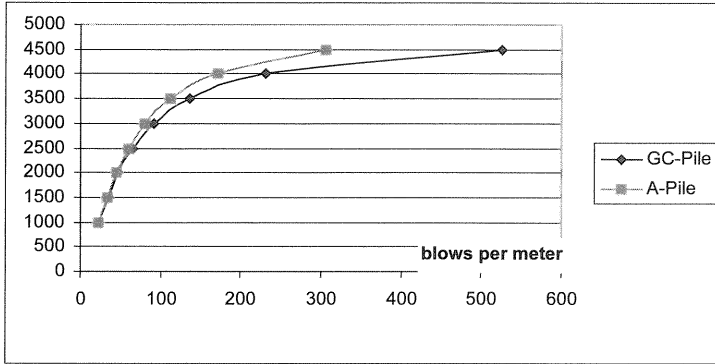


Bild 3 : Tragfähigkeitskurve (bearing graph) für die beiden Testpfähle

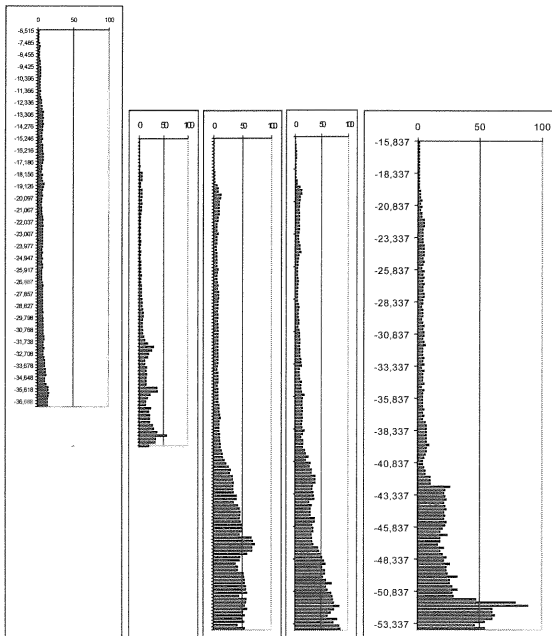


Bild 4 : Tatsächliche Schlagzahlen der Testpfähle

3. Ergebnisse der dynamischen und statischen Tragfähigkeitsprüfungen

Die Auswertung von Einzel-Schlägen beim Nachrammen mit der vollständigen Modellbildung CAPWAP konnte auch in etwa die vorhergerechneten Tragfähigkeiten bestätigen (siehe Tabelle 1).

Bei dem kurzen Pfahl TPA1 überstieg der beim Beginn des Nachrammens ermittelte aktivierte statische Widerstand mit 4.541 kN den Zielwert von 2.873 kN erheblich.

Pile no.	blow no.	R-ult-CW kN	Rskin kN	Rtoe kN
TPA1	5 BOR	4.541	4.272	268
TP1	1220 EOI	3.119	2.378	741
TP1	5 BOR	5.609	5.553	56
TP2	19 BOR	4.236	3.883	353
TP2	113 EOR	4.057	3.172	885
	envelope of initial driving and redriving blows	6.505	5.620	885
TP3	2	4.976	4.704	272
TP3	19	4.740	4.687	53
TP3	613 EOI	3.776	3.208	568
	envelope	6.358	5.589	568

Tabelle 1 : Ergebnisse der CAPWAP-Berechnungen

Da die aktivierten statischen Widerstände der längeren Pfähle nur bei Pfahl TP1 den Zielwert von 5.449 kN erreichten, wurde die Mantelreibung von Rammschlägen bei verschiedenen Eindringtiefen überlagert, um eine Grenztragfähigkeit zu bestimmen (Bild 5). Bei dieser Berechnung wurde kein Festwachsen der Pfähle berücksichtigt.

Die CAPWAP Auswertung zeigte aber auch, dass die hohen angesetzten Spitzenwiderstände (Bild 1) nicht erreicht wurden. Im Bodenwiderstandsmodell für die offenen Stahlrohre wurde angenommen, dass sich ein Propfen bildet und

dadurch ein Spitzendruck auf die gesamte Kreisfläche wirkt. Bei der dynamischen Pfahlprüfung, die Messungen am Stahlrohr auswertet, wird dieser Spitzendruck aber als zusätzliche Mantelreibung im Innern erfasst (siehe Bild 6). Diese Art der Lastabtragung kann durch eine mögliche Verspannung im Inneren des Pfahls auch eine Erhöhung der Gesamt-Mantelreibung gegenüber den erfahrungsmäßigen Werten bewirken.

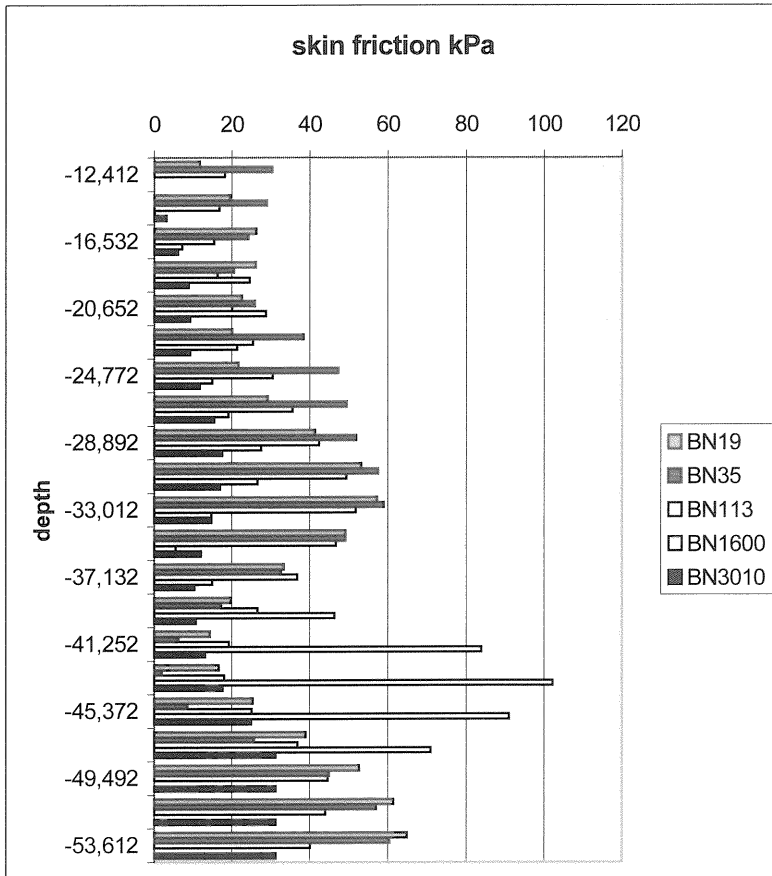


Bild 5 : Mantelreibungsverteilung im Rammfortschritt für Testpfahl TP2
Grundlage der Überlagerung

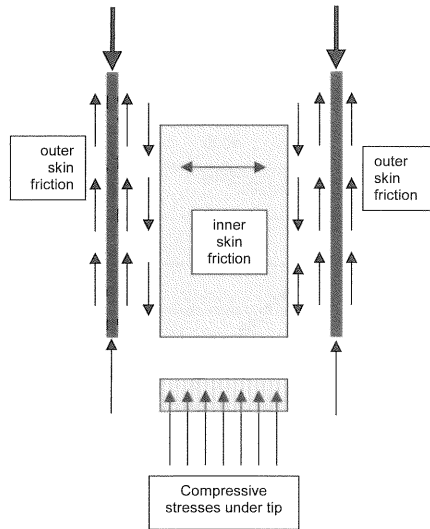


Bild 6 : Modell der Lastabtragung eines offenen Stahlrohrpfahls

Bei den nachfolgenden statischen Prüfungen zeigte sich ein starkes zeitabhängiges Setzungsverhalten. Der kürzere Pfahl kam bei ca.80% der vorgesehenen Prüflast nicht mehr zur Ruhe. Im Gebrauchslastbereich sind Setzungen aus dynamischen und statischen Versuchen etwa in gleicher Größenordnung (Bilder 7 und 8). Die aus dem Beginn des Nachrammens ermittelten Tragfähigkeiten haben die tatsächliche Tragfähigkeit aber überschätzt. Es musste also gefolgert werden, dass die Übergangszone vom bindigen zum sandigen Boden wesentlich geringere Widerstände zeigt, als aus der Bodenuntersuchung angenommen. Beim längeren Testpfahl zeigt sich für die Einzelschläge eine bessere Übereinstimmung, allerdings führt die Überlagerung von Schlägen aus Einrammen und Nachrammen ebenfalls zu einer Überschätzung (siehe Bild 8).

Zugversuche an beiden Pfählen zeigten, dass diese Überschätzung auf die Bodenwiderstände im Bereich des bindigen Bodens zurückzuführen sind, da diese bei einer Kurzzeitbelastung viel höher sind als bei Dauerbelastung. Deswegen war

der Unterschied zwischen dynamischen und statischen Prüfergebnissen auch beim kurzen Pfahl mit geringer Einbindung in den Sand sehr viel größer als beim langen Pfahl mit großer Einbindung in den Sand.

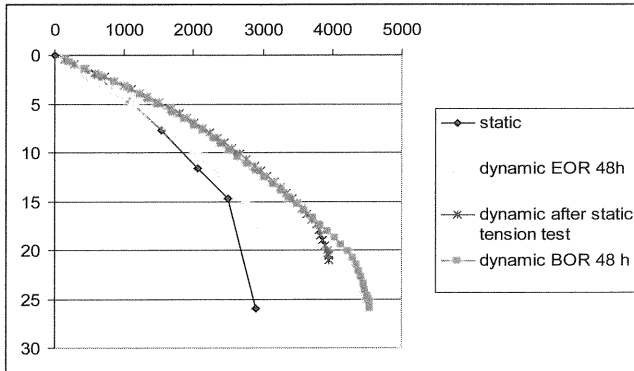


Bild 7 : Vergleich der statischen und dynamischen Belastung ohne Zeitsetzung
Testpfehl TPA1

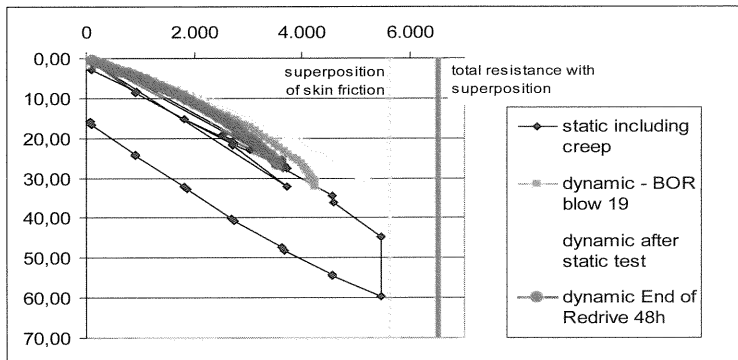


Bild 8 : Vergleich der statischen und dynamischen Belastung - Testpfehl TP2

Nach der Gegenüberstellung von dynamischen und statischen Testergebnissen wurde auch die vollständige Entwicklung der Tragfähigkeit beim Nachrammen, wie sie mit der CASE-Formel bestimmt wird, betrachtet. Es fällt auf, dass die Tragfähigkeit während des Rammens nahezu auf die Hälfte abnimmt (siehe Bild 9).

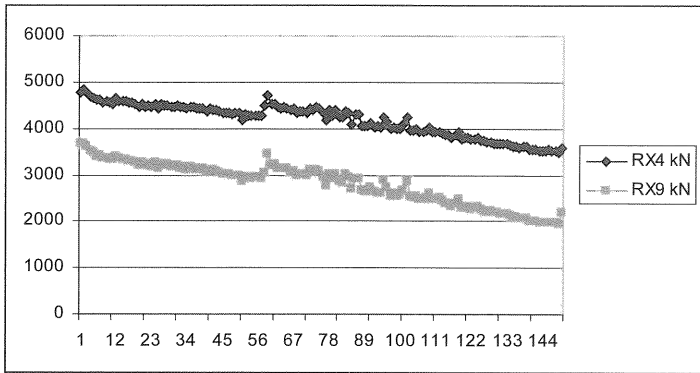


Bild 9 : Entwicklung der Tragfähigkeiten nach der vereinfachten CASE-Formel beim Nachrammen

4. Dynamische Prüfung an zusätzlichen Testpfählen

Die Schlussfolgerung war, dass die endgültigen Pfahllängen aus zusätzlichen dynamischen Versuchen zu ermitteln sind, wobei ausschließlich die Mantelreibung im Sand beim Einrammen (nicht beim Beginn des Nachrammens) zu bestimmen ist.

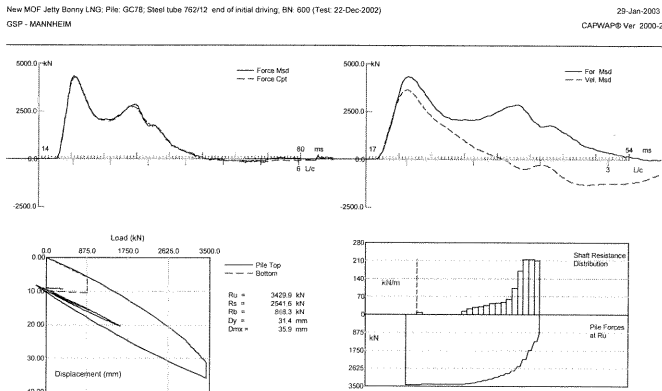


Bild 10 : CAPWAP-Auswertung beim Einrammen
Bestimmung der Mantelreibung im Sand

Für dieses Testprogramm wurden drei zusätzliche Testpfähle, jeweils neben den geprüften längeren Pfählen, gerammt. Bei der Auswertung mit dem CAPWAP-Verfahren wurde auf die Mantelreibung besonders geachtet (Bild 10). Da sich auch der Sand beim Rammen lockert, ist der tatsächliche Widerstand im Sand bis ca. 6 m oberhalb der Spitze des Pfahls vorhanden. Um eine Zunahme der Mantelreibung im Sand zu erfassen, wird die Mantelreibung für verschiedene Eindringtiefen bestimmt (siehe Bild 11).

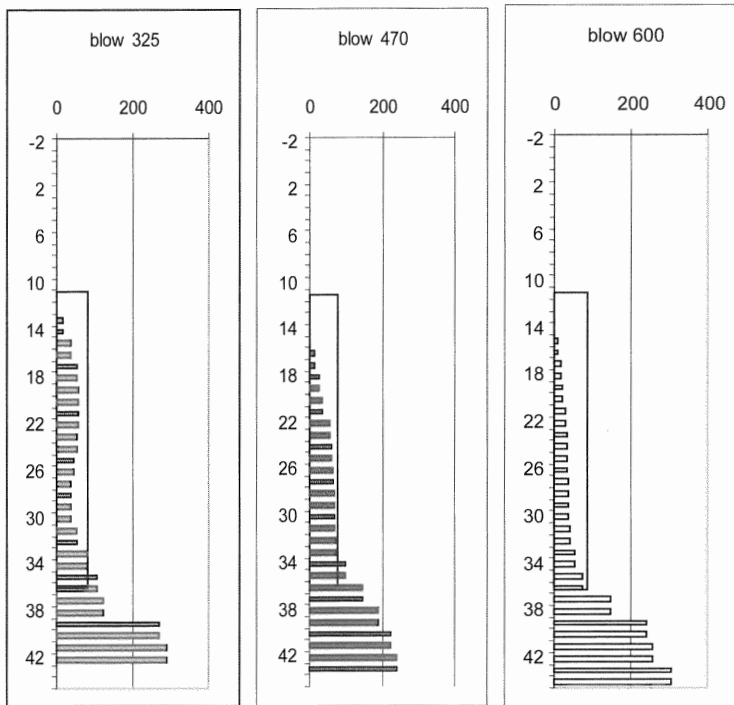


Bild 11 : Bestimmung der Mantelreibung im Sand durch CAPWAP-Auswertung bei fortschreitender Eindringung

Die Tragfähigkeit der Pfähle wurde dann folgendermaßen bestimmt :

1. Mantelreibung im bindigen Boden aus statischen Zugversuch 2.040 kN
2. Mantelreibung im Sand aus dynamischen Versuchen mit CAPWAP-Modellbildung in verschiedenen Tiefen,
3. Spitzendruck mit der Tiefe zunehmend wie mit CAPWAP-Modellbildung bestimmt.

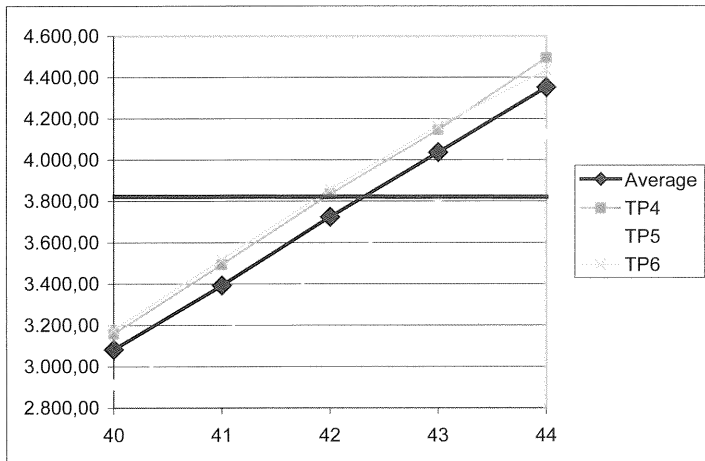


Bild 12 : Zunahme der Tragfähigkeit mit der Eindringung in Sand
Nachzuweisende Tragfähigkeit bei 2facher Sicherheit : 3.830 kN

Auf diesem Weg wurde die Zunahme der Tragfähigkeit mit der Tiefe bestimmt. Während die Auswertung zeigt, dass für die ursprüngliche Prüflast mit 1,5facher Sicherheit eine Einbindung von 40 m ausgereicht hätte, ist für die 2fache Sicherheit eine Einbindung von 44 m erforderlich. Das Konzept mit 2facher Sicherheit auch für die Bestimmung des charakteristischen Wertes aus dem Minimum von 3 Pfahlprüfungen ist im Hinblick auf den EC7 als überaus konservativ einzuschätzen.

Nach der Auswertung der dynamischen und statischen Pfahlprüfungen war es möglich, nunmehr ein verbessertes Widerstandsmodell für Berechnungen mit dem Wellengleichungsverfahren anzugeben (siehe Bild 13).

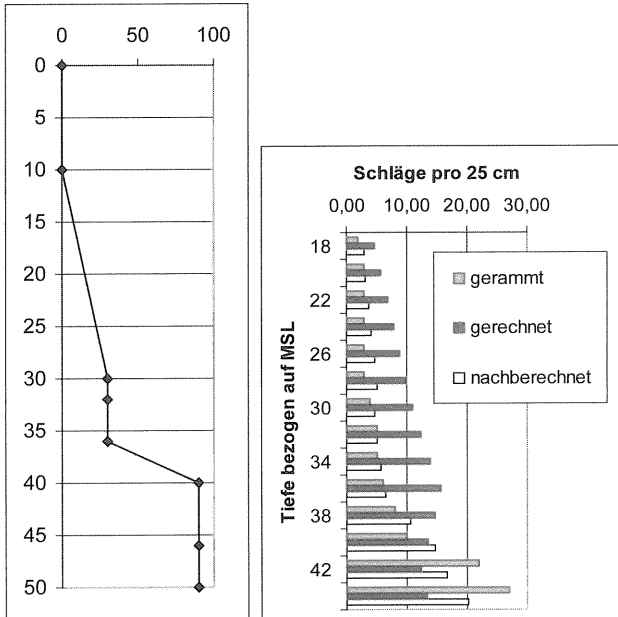


Bild 13 : Relativer Pfahlwiderstand – Spitzendruck 25% -

für GRLWEAP-Berechnungen

Vor- und Nachberechnung des Rammens

Vergleich zu den tatsächlichen Schlagzahlen

Aus der CAPWAP-Modellbildung sind jetzt auch die Dämpfungsparameter und die elastischen Grenzdehnungen (quake) für Mantelreibung und Spitzendruck bekannt, so dass die Rammbarkeitsberechnung (Bild 14) besser dem tatsächlichen Rammvorgang entspricht als die Vorberechnung (Bild 2).

5. Nachberechnungen mit GRLWEAP und CAPWEAP

Für die weitergehende Nutzung der GRLWEAP-Berechnung wird eine Tragfähigkeitskurve erzeugt, die es ermöglicht auch bei abweichenden Schlagzahlen die Tragfähigkeiten zu bestimmen (Bild 15).

Die Tragfähigkeitswerte nach (Bild 15) können noch durch einen Faktor für das Festwachsen erhöht werden, indem das unterschiedliche Verhalten der bindigen und der sandigen Schicht berücksichtigt werden muss:

- bindiger Boden von –10 m bis –36 m : aktivierter statischer Widerstand beim Rammen 600 kN aus statischem Zugversuch 2.040 kN = Festwachsen mit Faktor 3
- Sandiger Boden - 36 m bis – 44 m
aktivierter Widerstand beim Rammen 2.500 kN, kein Festwachsen
- Spitzendruck 900 kN
- aktivierter statischer Widerstand beim Einzelschlag (siehe Bild 10)
RUT = 3.430 kN
- Gesamttragfähigkeit : 5.400 kN (voriger Abschnitt)

durchschnittlicher Faktor für Festwachsen $5.400 / 3.400 = 1,6$

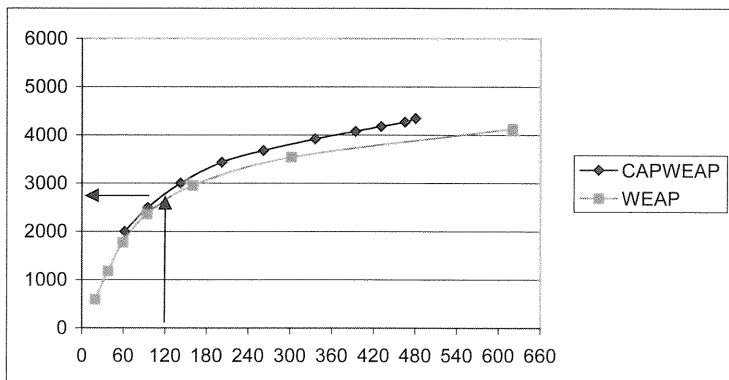


Bild 15 : Tragfähigkeitskurve für Parameter wie mit CAPWAP ermittelt und Direktberechnung mit CAPWAP

Wenn nun bei einzelnen Pfählen während des Rammens geringere Schlagzahlen auftreten, kann entschieden werden, ob die Tragfähigkeit noch ausreicht oder der Pfahl doch tiefer eingebracht werden muss.

Z.B. hatte ein Pfahl nur 120 Schläge auf 1 m (30 Schläge für 25 cm); die Tragfähigkeit ergibt sich dann aus Bild 15 und unter Berücksichtigung des mittleren Faktors für Festwachsen zu : $2.800 \text{ kN} * 1,6 = 4.480 \text{ kN}$, welches bezogen auf die Prüflast mit 2facher Sicherheit (3.830 kN) ausreichend ist.

Bei einem anderen Pfahl mit lediglich 60 Schlägen für 1 m (15 Schläge für 25 cm) ist die Einbindung offensichtlich nicht ausreichend für den Sicherheitsfaktor 2 (Tragfähigkeit $2.000 \text{ kN} * 1,6 = 3.200 \text{ kN} < 3.830 \text{ kN}$).

Literatur

Für Erläuterungen zu den Verfahren und Hintergrundliteratur wird auf die „Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen“ des AK 2.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, herausgegeben vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig 1998, verwiesen.

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller
GSP mbH (info@gsp-mannheim.de)
Käfertalerstraße 164
68167 Mannheim

Dr.-Ing. Frank Rausche
GRL Engineers, Inc. (info@pile.com)
4535 Renaissance Parkway
Cleveland, OH 44128, USA