

## **STATISCHE AUSWERTUNG VON DYNAMISCHEN PFAHLPROBEBELASTUNGEN MIT FINITEN ELEMENTEN**

Dr. Hasan Aboumatar und Dr., Dipl.-Ing. Frank Rausche

### **1 EINLEITUNG**

Dynamische Simulationen von Rammvorgängen an Pfählen werden in vielen Ländern seit den frühen 60er Jahren elektronisch berechnet (SMITH, 1960; RAUSCHE, 1974). Diese Berechnungen dienen meistens der Ermittlung der Pfahltragfähigkeit, wobei Beobachtungen oder Messungen am Pfahl während der Rammung ausgewertet werden. Statische Pfahluntersuchungen werden auch in immer grösserem Masse elektronisch vorgenommen. Hierbei werden Belastungsgrenzen für Zug-, Druck- und Seitenkräfte ermittelt und zusätzlich vorläufige und langzeitliche Setzungs- oder Verformungsberechnungen durchgeführt.

Die Auswertung von Messungen oder eine Vorrausberechnung der Pfahlrammbarkeit werden immer noch recht vereinfacht durchgeführt und daher ist ihre Anwendung auf häufig vorkommende Fälle begrenzt. Bisher war der Fortschritt auf diesem Gebiet vor allem deswegen recht zögernd, weil die Methoden zur Festlegung der statischen und dynamischen Bodenkennwerte für höher entwickelte Verfahren unzureichend waren. Das FEM Programm, TIPWHIP, soll zusammen mit dynamischen Messungen am Pfahlkopf, die sowohl am Rammpfahl wie am Bohrpfahl durchgeführt werden können, weiterhelfen. Dieses Programm hat gegenüber anderen den Vorteil, dass es relativ schnell die Berechnungen auf einem einfachen PC durchführen kann.

### **2 GRUNDLAGEN**

Während dynamische Berechnungen sich hauptsächlich mit dem einfachen Pfahl- und Bodenrechenansatz nach Smith begnügen, werden für statische Rechnungen oft kompliziertere FEM Programme benützt. In der Pfahldynamik werden also die Bodenwiderstandskräfte durch eine elasto-plastische Feder und einen mehr oder weniger linearen Stossdämpfer in der Boden-Pfahlgrenzschicht dargestellt. Das Wellengleichungsverfahren (z.B. GRLWEAP, s. GRL, 1996) simuliert damit den gesamten Pfahleindringungsvorgang und kann zu recht guten Ergebnissen führen, wenn die Eindringungen pro Schlag relativ gross sind. Relativ kleine Eindringungen pro Schlag treten aber besonders bei grossen Pfahldurchmessern häufig auf. Weitere Schwierigkeiten treten in diesen Berechnungen dort auf, wo sich das dynamische vom statischen Verhalten unterscheidet, was besonders bei offenen Stahlprofilen vorkommen kann. Zum Beispiel durchfahren offene Rohre grösserer Durchmesser oft den Boden ohne Pfropfenbildung und erfahren dabei Bodenreibung im Profilinneren. Im statischen Zustand oder im dynamischen mit kleinen Pfahlbeschleunigungen, bildet der Boden aber in diesen Pfählen einen

Pfropfen und macht sie damit zu Verdrängungspfählen ohne inneren Reibungswiderstand. Obwohl schon verschiedene Ansätze entwickelt wurden (STEVENS, 1988, MURFF *et al.*, 1990, PAIKOWSKY *et al.*, 1990), konnte man bisher die Pfropfenbildung nicht verlässlich auf Grund von Pfahlgeometrie und Bodenkennwerten voraussagen.

Für CAPWAP (Kombiniertes Verfahren in RAUSCHE, 1974), das Kraft- und Geschwindigkeitsmessungen am Pfahl über eine Systemidentifikationsrechnung auswertet, wurde das Smith-Modell weiterentwickelt, damit Bewegungen des den Pfahl umgebenden Bodens näherungsweise berücksichtigt werden können. Aber auch in diesem Verfahren kommt es bei relativ kleinen Eindringungen eines Pfahles unter einem Schlag wegen der Mitschwingung des den Pfahl umgebenden Bodens zu Unsicherheiten bei der Berechnung der Eindringung oder Tragfähigkeit des Pfahles. Dazu kommt noch, dass die statische Berechnung nach CAPWAP praktisch eine langsame dynamische Belastung simuliert, die nur bis zu der dynamischen Belastung entsprechenden Eindringung durchgeführt wird. Dieses vereinfachte Rechenmodell kann daher weder Last-Setzungslinien für grosse Pfahleindringungen noch die Pfropfenbildung in offenen Rohrpfählen oder anderen offenen Profilen nicht genügend genau berechnen.

Zusammenfassend werden Grenzen der bestehenden Verfahren also in den folgenden drei Fällen gesehen

- (a) bei der dynamischen Berechnung von offenen Pfahlprofilen, bei der die Reibung im Pfahl unzureichend berücksichtigt wird,
- (b) bei der statischen Berechnung von offenen Profilen, bei der die Pfropfenbildung nicht rechnerisch bestimmt werden kann und
- (c) bei kleinen Pfahleindringungen pro Schlag, d. h. wenn die Bewegungen des den Pfahl umgebenden Bodens nicht wesentlich geringer sind als die Verformungen in der Pfahl-Bodengrenzschicht.

Um die Möglichkeiten der pfahldynamischen Verfahren GRLWEAP und CAPWAP zu erweitern, hat GRL firmenintern TIPWHIP (Transients in Piles: Wave, Halfspace and Interface Program) entwickelt. Dieses Program wird im folgenden beschrieben. Zwei Beispiele sollen dabei die Lösungsmöglichkeiten dieser Methode beschreiben.

### 3 DAS BODENMODELL

TIPWHIP repräsentiert einen rotationssymmetrischen Boden und Pfahl. Die **Pfahl-Bodengrenzschicht** wird mit einem elasto-plastischen "Dünnschicht-Element" (DESAI *et al.*, 1982) dargestellt. Wie in allen anderen Elementen werden die Beziehungen zwischen Spannungen und Verformungen durch eine Normalkomponente,  $C_{nn}$ , und eine Scherkomponente,  $C_{ss}$ , berücksichtigt. Gekoppelte Spannungsgrößen ( $C_{ns}$ ,  $C_{sn}$ ) werden dabei vernachlässigt. In diesem Element besteht entweder Haftung oder Gleitung je nach Scherspannung relativ zur

Scherfestigkeit, die nach Mohr-Coulomb berechnet wird. Das Element kann sich auch vom Pfahl ablösen, wenn die Druckkräfte auf Null abnehmen. Zugkräfte, die rechnerisch in der Boden-Pfahlgrenzschicht auftreten, werden in iterativen Rechenschritten auf Null gebracht, indem sie auf die umgebenden Bodenelemente verteilt werden.

Der den Pfahl **umgebende Boden** wird auch elasto-plastisch mit dem Mohr-Coulombschen Fließkriterium modelliert. Dämpfung wird proportional zur Massen- und Steifigkeitsmatrix angesetzt (Rayleigh Dämpfung), wobei die entsprechenden Faktoren Funktionen der Eigenfrequenzen des Bodenpfahlsystems sind und durch einen Eingabewert, das Dämpfungsverhältnis, an die Gegebenheiten, die vielleicht durch dynamische Messungen bestimmt wurden, angepasst werden können.

Die nicht reflektierende **Grenze des Bodenhalbraums**, etwa 5 Pfahldurchmesser vom Pfahl entfernt, wird mit viskoser Dämpfung modelliert (LYSMER *et al.*, 1969). Diese viskosen Kräfte sind von den tangentialen und normalen Geschwindigkeiten des Elements abhängig und werden mit Hilfe von Schubmodul, Poisson-Zahl und Dichte des Bodens berechnet.

Am **Pfahlfuss** kann zusätzlich zur proportionalen Dämpfung auch noch die viskose Dämpfung berücksichtigt werden.

Um die notwendigen Elementparameter berechnen zu können, müssen die folgenden Daten eingegeben werden:

Für alle Berechnungen: E-Modul und Quermodul von Pfahl und Boden, Kohäsion und Reibungswinkel der Bodenschichten.

Für dynamische Berechnungen: Wichte von Boden und Pfahl und das proportionale Dämpfungsverhältnis.

Für die Simulation des Rammvorgangs: entweder die elastischen und Massengrößen des Rammgerätes oder die vom GRLWEAP berechneten Pfahlkopfgrößen Kraft und Geschwindigkeit.

Für die Systemidentifikation: die dynamischen, am Pfahlkopf gemessenen Größen Kraft- und Geschwindigkeit.

## 4 BEISPIELE

### 4.1 Rohrpfähle

Zur Veranschaulichung der TIPWHIP Berechnung für offene Profile, einschliesslich der Bestimmung der Haftung bzw. Gleitung des Bodenpfropfens, wurden zwei offene Rohrpfähle mit 600 bzw. 1500 mm Durchmesser, 12,5 bzw. 50 mm Wandstärke und 20 bzw. 88 m Länge untersucht (Tabelle 1). Der grössere Pfahltyp kommt häufig im Offshorebau zum Einsatz. Die Rammsimulation wurde dabei mit

variablen Bärmassen und Fallhöhen so vorgenommen, dass die Bärenergie in allen Fällen gleich war. Ein Futter aus künstlich hergestelltem Material befand sich zwischen Bär und Schlaghaube. Nach der dynamischen Berechnung wurde auch eine statische Belastung simuliert.

Für den Boden wurde angenommen, dass die Pfähle durch eine weichere obere Tonschicht in eine festere Tonschicht auf 18 bzw. 60 m Tiefe gerammt wurden und, dass der Boden dabei einen 16,5 bzw. 58,5 m langen Pfropfen in den Pfählen bildete. Die obere Schicht hatte etwas geringere Festigkeitswerte als die zweite Schicht. Im Bereich der oberen 3 m wurden die Bodenwerte auf Null gesetzt (Tabelle 2).

Tabelle 1: Pfahldaten

Pfahldaten	Pfahl 1	Pfahl 2
Durchmesser (mm)	600	1500
Wandstärke (mm)	12,5	50
Länge (m)	20	88
Tiefe (m)	18	60

Tabelle 2: Bodenwerte

Bodendaten	Schicht 1	Schicht 2	Boden-Pfahl
Spez. Masse (Mg/m <sup>3</sup> )	1,6	1,6	1,6
E-Modul (MPa)	200	500	100
Poisson-Zahl	0,3	0,3	
Kohäsion (kPa)	200	500	100

Für den kleineren Rohrpfahl konnten Elementgrößen von etwa 250 mm Länge und 100 mm Breite für Boden und Pfahl gewählt werden. Die Breite der Grenzschiebtelemente war 10 mm. Wegen der Grösse des Pfahldurchmessers und der Eindringungstiefe und der begrenzten Rechnerkapazität (PC, 586, 200 MHz, 32 kB) mussten beim zweiten Rohrpfahl die Elemente etwas grösser als normal gewählt werden. So wurden in diesem Beispiel die Boden- und Pfahlelemente mit 950 mm vertikaler Länge und ungefähr 150 mm Breite angesetzt. Weiter vom Pfahl entfernte Elemente waren noch grösser. Die Breite der Grenzschiebtelemente war 40 mm. Bild 1 zeigt das Rechenetz ohne diese dünnen Elemente im verzerrten Masstab. Die vertikale Netzlinie am linken Rand ist die Symmetrieachse.

In den beiden Rohrpfahlbeispielen sind die Bewegungen und Verformungen des Bodenpfropfens im Pfahl von besonderem Interesse. Bilder 2 und 3 zeigen die

berechneten vertikalen Verschiebungen der Pfahlemente und der die Elemente der Grenzschicht berührenden Bodenelemente.

Tabelle 3: Bärdaten

Hammerdaten	Beispiel 1			Beispiel 2		
Bärmasse (Mg)	5.0	7.75	25.8	37	55.5	185
Fallhöhe (m)	1.55	1.00	0.30	1.55	1.00	0.30
Bärenergie (kJ)	76	76	76	544	544	544
Bärlänge (mm)	1000	1600	2900	1500	2250	4800
Bärdurchm. (mm)	900	900	1200	2000	2000	2500
E-Futter (MPa)	1930	1930	1930	1930	1930	1930
Futterstärke (mm)	200	200	200	250	250	250
Haubenmasse (kg)	1500	1500	1500	9900	9900	9900

Diese Verformungen wurden für drei verschiedene Fallhöhen berechnet aber nur für die höchste (1.5 m) und geringste (0.3 m) Fallhöhe in den Bildern dargestellt. Nicht unerwartet zeigt es sich dabei, dass sich die vertikalen Verschiebungen des Bodens im Inneren des Pfahles mehr an die des Pfahles angleichen, wenn der Pfahldurchmesser kleiner ist oder mit einer geringeren Fallhöhe belastet wurde. Bilder 4 und 5 zeigen auch die entsprechenden Verschiebungen unter den statischen Belastungen. Sie sind praktisch für Pfahl und Pfropfenboden identisch.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei kleinen Durchmessern auch im dynamischen Fall der Pfropfen mit dem Pfahl bewegen kann, und dass bei genügend kleinen Fallhöhen (oder Pfahlbeschleunigungen) der Pfropfen ebenfalls haften kann. Andererseits muss man aber auch erwarten können, dass für sehr grosse Durchmesser die Pfropfenhaftung sogar im statischen Fall ungenügend ist und, dass es dann nicht zum vollen Spitzenwiderstand, sondern zum Reibungswiderstand im Pfahl kommt.

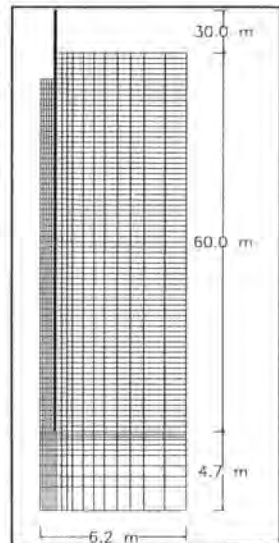


Bild 1: Elementierung für den 1500 mm Pfahl

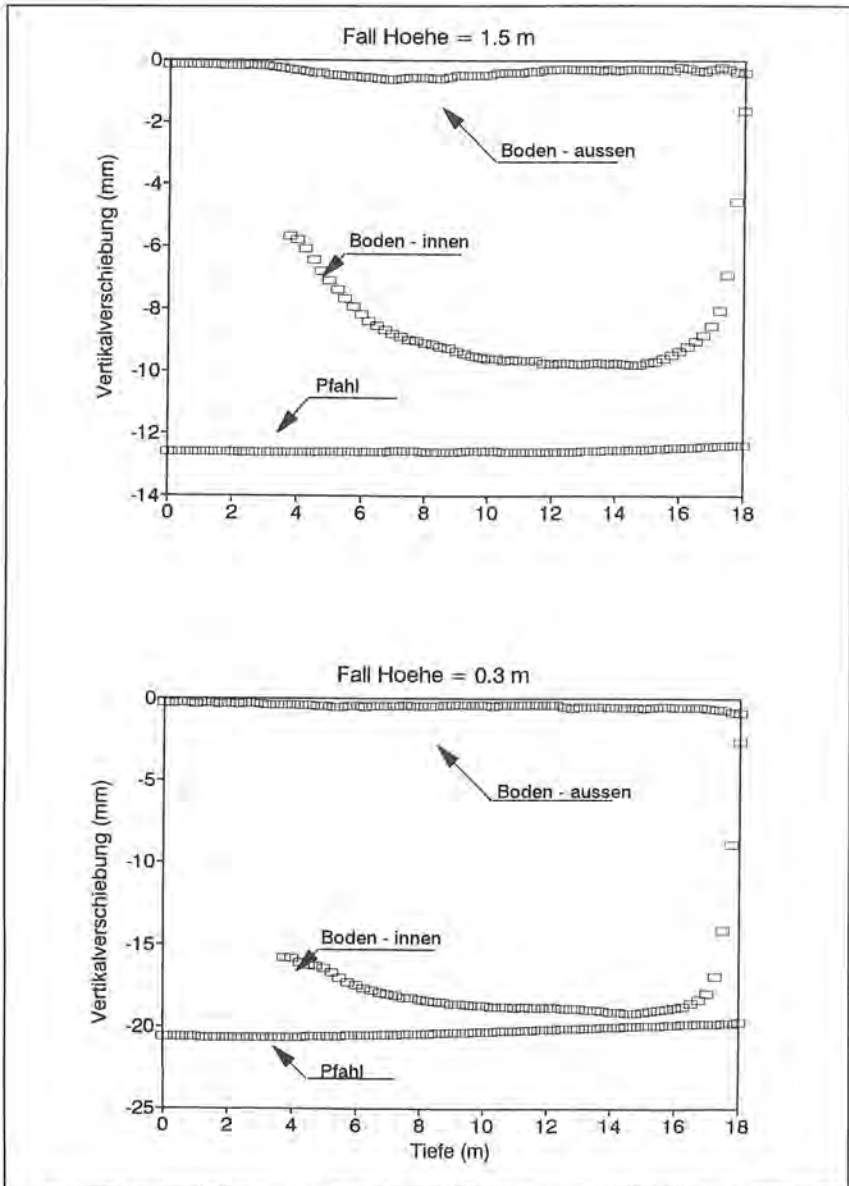


Bild 2: Berechnete vertikale Pfahl- und Bodenverschiebungen für Pfahl 1

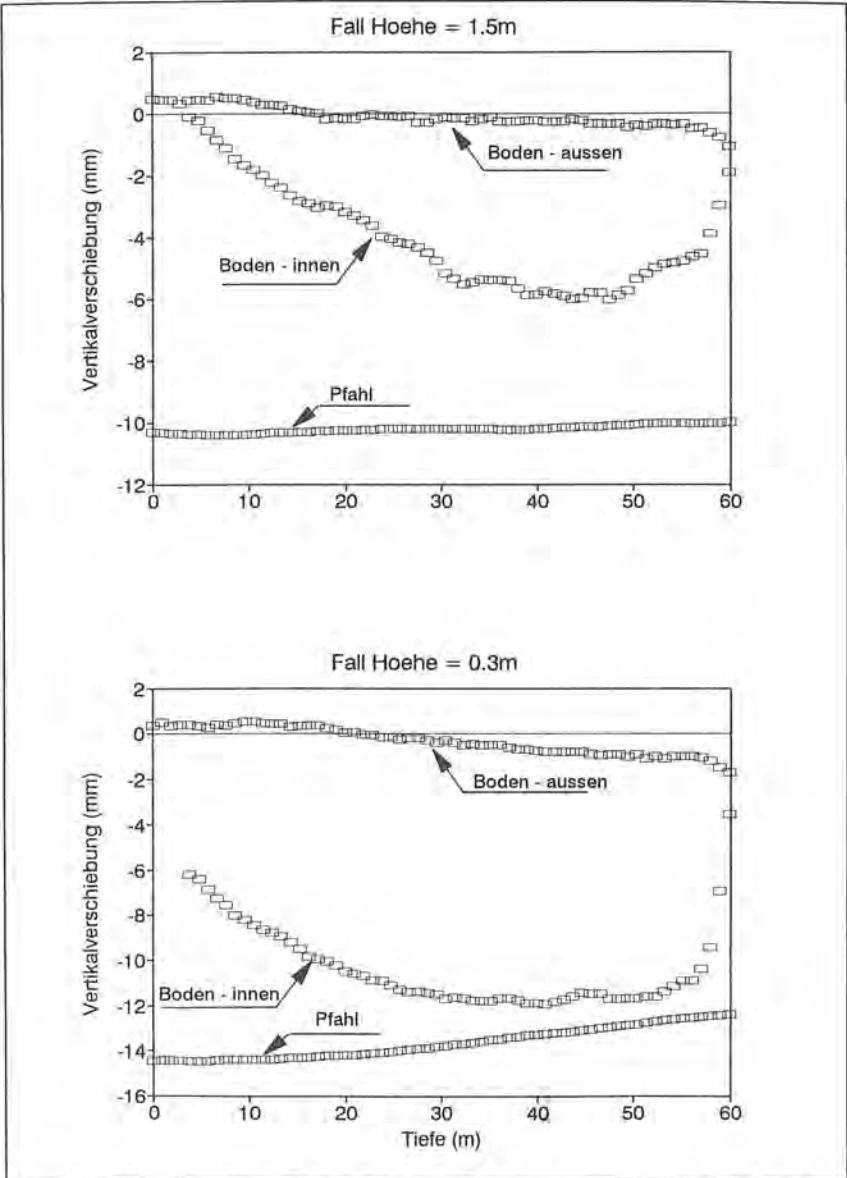


Bild 3: Berechnete vertikale Pfahl- und Bodenverschiebungen für Pfahl 2

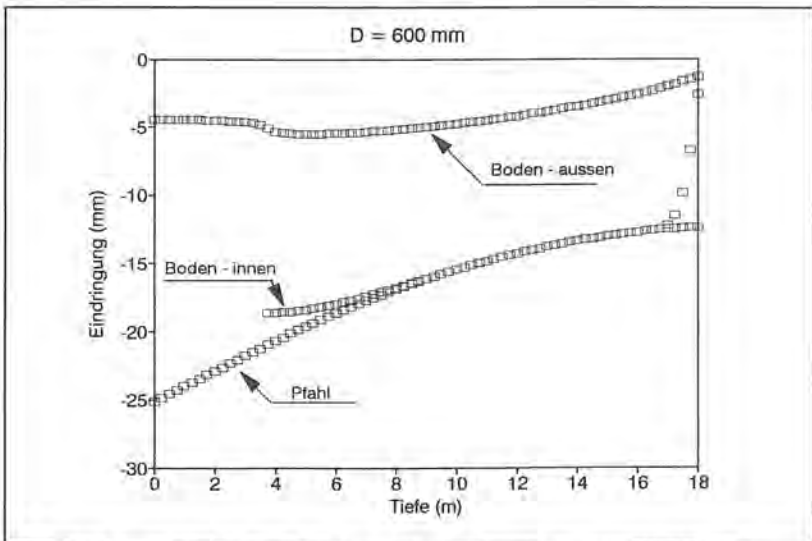


Bild 4: Statisch berechnete, vertikale Verschiebungen für Pfehl 1

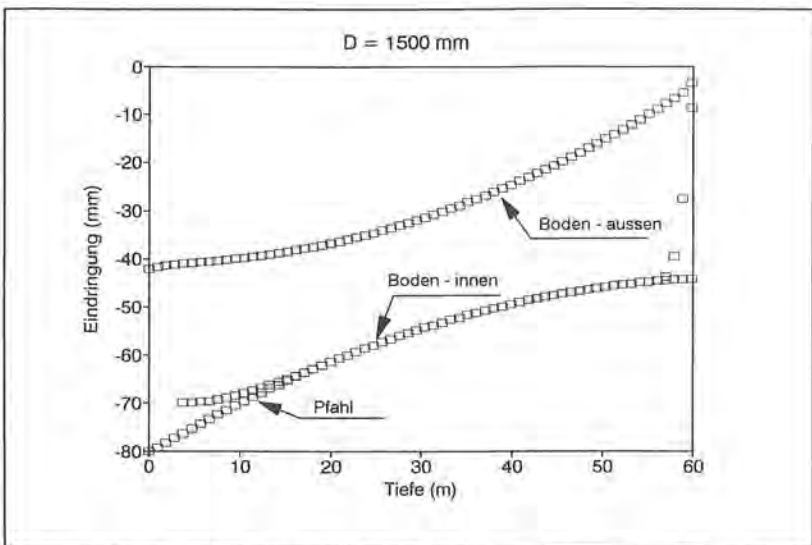


Bild 5: Statisch berechnete vertikale Verschiebungen für Pfehl 2



## 4.2 Bohrpfahl

Dieses Beispiel zeigt, dass dynamische Messungen und TIPWHIP Berechnungen zusammen eine vernünftige Vorrassage der Lastzungslinie auch für grössere Pfahldurchmesser ermöglicht. Der 1300 mm Bohrpfahl von 17 m Länge in sandigem Boden war mit einer 14 Mg Masse dynamisch belastet worden. Dabei waren Pfahlkopfkräfte und -geschwindigkeiten gemessen worden. Diese Messungen wurden mit TIPWHIP in der Form einer Systemidentifikation ausgewertet, wobei die berechneten Bewegungsgrössen Pfahlkopfgeschwindigkeit und -verschiebung den gemessenen angepasst wurden (Bild 6). Mit einem PC (200MHz, 586, 32 kB) dauerte dabei die Berechnung einer einzelnen Versuchsrechnung 2 Minuten; die gesamte Anpassungsrechnung dauerte ungefähr 8 Stunden und ergab die Bodenkennwerte von Tabelle 4. Die relativ hohen Festigkeitswerte des Bodens am Pfahlmantel lassen sich darauf zurückführen, dass der Pfahl nachverpresst worden war. Die mit diesen Werten durchgeführte statische Berechnung zeigt eine gute Übereinstimmung mit der, in der statischen Pfahlprobelastung ermittelten, Last-Setzungslinie (Bild 7).

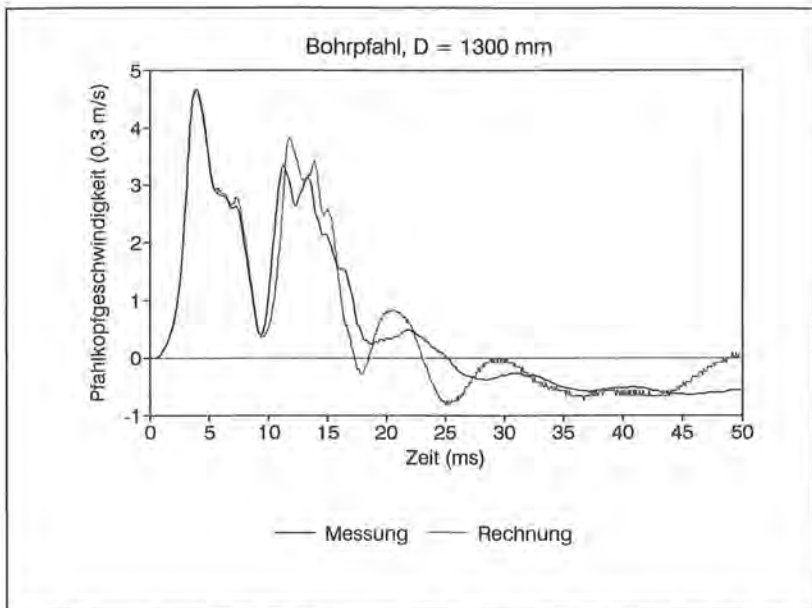


Bild 6: Gerechnete und gemessene Pfahlkopfgeschwindigkeiten für den Bohrpfahl

Tabelle 4: Bodenkennwerte von TIPWHIP  
Auswertung dynamischer Messungen für den Bohrpfahl

	E-Modul MPa	Poisson Zahl	Dichte Mg/m <sup>3</sup>	Kohäsion kPa	Reibungs- winkel °
Grenzschicht	68	.35	1.08	83	0
Boden-Mantel	68	.35	1.08	104	0
Boden-Spitze	68	.35	1.08	69	20

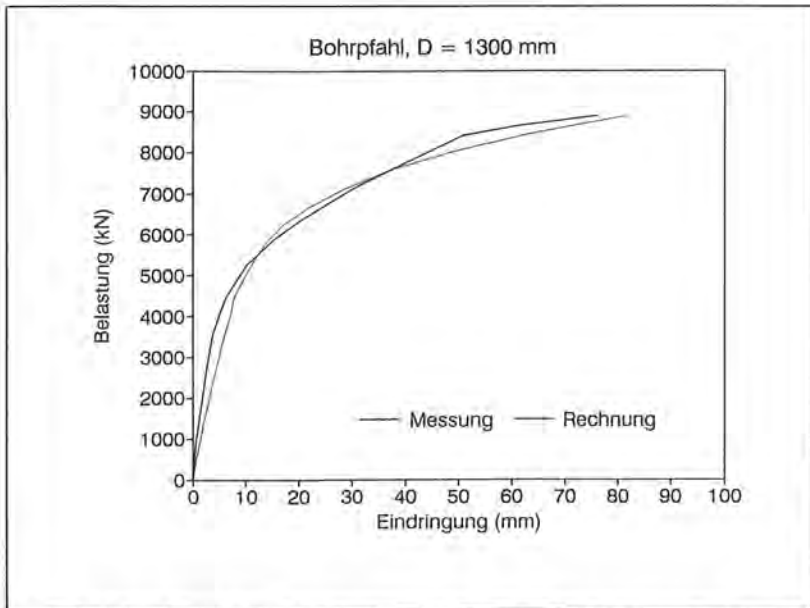


Bild 7: Berechnete und gemessene statische Lastsetzungslinien

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

TIPWHIP ist ein FEM Rechenprogramm, mit dem statische und dynamische Berechnungen von Rammpfählen oder Bohrpfählen durchgeführt werden können. Im allgemeinen sind die notwendigen Bodenparameter nur ungenau auf Grund von

Bodenproben bestimmbar und führen daher zu Unsicherheiten in der Berechnung von Pfahltragfähigkeit und Pfahlbewegungen. Dynamische Messungen am Pfahl können notwendige zusätzliche Daten liefern und damit die Genauigkeit der Berechnungen verbessern.

TIPWHIP ist in der Lage, sogar langwierige Systemidentifikationsberechnungen relativ schnell mit einem PC durchzuführen. Mit diesem Programm kann auch das Pfropfenproblem offener Pfahlprofile vernünftig gelöst werden.

Zur Zeit werden noch weitere Vergleichsrechnungen durchgeführt, um Bodenkennwerte zu finden, die bei Rechnungen ohne Messungen angewandt werden können. Ausserdem sollen noch weitere Erfahrungen gesammelt werden, damit die Notwendigkeit für statische Probelastungen auch in komplizierten Fällen auf ein Minimum reduziert werden kann.

## 6 LITERATURHINWEISE

Desai, C.S., Zaman, M.M., Lightner, J.G. and Siriwardane, H.J. (1984). "Thin-Layer Element for Interfaces and Joints," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8., pp. 19-43.

GRL and Associates, Inc. (1996). GRLWEAP Manual, 4535 Renaissance Parkway, Cleveland, OH, 44128, USA.

Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969), "Finite Dynamic Model for Infinite Media," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-877.

Murff, J.D., Raines, R.D., Randolph, M.F. (1990). "Soil plug behavior of piles in sand." Proc., 22nd Offshore Technology Conf., 4, 25-32.

Paikowsky, S. G., and Whitman, R.V. (1990). "The effects of plugging on pile performance and design." Can. Geotech. J., 27(3), 429-440.

Rausche, F. (1974). "Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen.", Baugrundtagung, Frankfurt

Smith, E.A.L. (1960), "Pile Driving Analysis by the Wave Equation", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 86, No. SM4, pp. 35-61.

Stevens, R. (1988). "The effect of a soil plug on pile drivability in clay.", Proc., 3rd Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa, 861-868.