

Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Ramppfählen

DR. F. RAUSCHE

G. G. Goble Consultants, Cleveland, vorm. Joh. Keller GmbH., Frankfurt

1. Einleitung

Während des Rammens eines Pfahles kann man von seinem dynamischen Verhalten auf seine statische Tragfähigkeit schliessen. Diese Tatsache ist längst bekannt und wird mit mehr oder weniger guten Ergebnissen überall zur Baustellenüberwachung verwendet.

Dabei werden i. a. Rammformeln benutzt, die jedoch, trotz ihres im Grunde richtigen Ansatzes und trotz der oft weitgehenden, abgeleiteten und empirischen Zusätze, immer wieder Anlass zur Unzufriedenheit geben.

Mit der Entwicklung elektronischer Mess- und Rechenverfahren wurde es während der letzten Jahre möglich, die Rammformeln zu ersetzen oder durch andere dynamische Verfahren zu ersetzen. Dabei ist zunächst die Wellengleichungsmethode zu nennen, die praktisch eine einer Rammformel entsprechende Kurve analytisch entwickelt, und dann das Case Verfahren, das auf dynamischen Messungen am Pfahlkopf aufgebaut ist. Ein drittes, das Kombinierte Verfahren bedient sich sowohl der Messung, als auch einer, der Wellengleichungsmethode entsprechenden, Rechnung.

2. Allgemeines

Jedes dynamische Verfahren, das die Tragfähigkeit eines Pfahles voraussagen soll, muss drei wesentliche Elemente berücksichtigen:

- (a) Die Rammenergie oder das Bärverhalten,
- (b) Die Pfahleigenschaften und
- (c) Den Bodenwiderstand.

Bild 1 zeigt diese drei Elemente, wobei ein Dieselbär wegen seiner häufigen Verwendung und seines komplizierteren Mechanismus vereinfacht dargestellt wurde. Dieselbären bestehen aus einem elastischen und schweren Schlaggewicht und Schlagstück, einem leichten und relativ weichen Rammfutter, einer meist schweren und steifen Schlaghaube und, bei Betonpfählen, einem weiteren Rammfutter. Die Rammfutter haben meistens nichtlineare Charakteristiken, aber selbst linear-elastische Bärkomponenten zeigen an Aufschlagflächen ein vom Linearen abweichendes Verhalten.

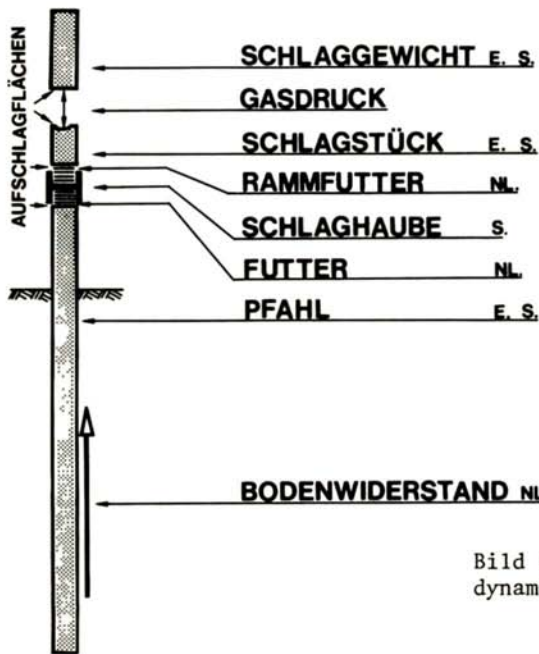


Bild 1: Elemente der Pfahldynamik.

Verglichen mit dem Bären ist der Pfahl ein recht einfaches Element, das fast immer als ein linear-elastischer und massenbehafteter Stab aufgefasst werden kann. Um das dynamische Verhalten des Bodenwiderstandes zu beurteilen, betrachten wir nun Bild 2.

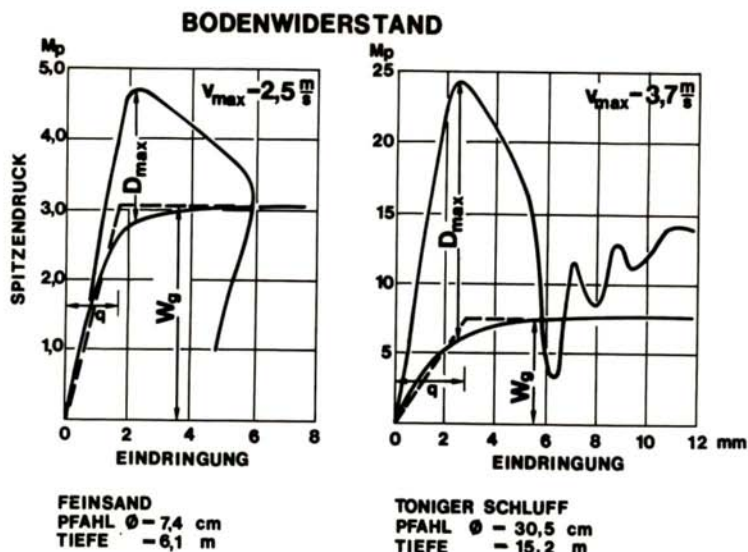


Bild 2: Vergleich von statischem mit dynamischem Pfahlspitzenruck für einen Modellpfahl in Sand und einen Stahlrohrpfahl in tonigem Schluff.

In diesem Bild sind die Ergebnisse von Kraft- und Beschleunigungsmessungen, die an den Pfahlspitzen eines sondenartigen Modellpfahles in Feinsand und eines grösseren Stahlrohrpfahles in Schluff und Ton vorgenommen wurden, in ausgewerteter Form dargestellt. Die Beschleunigung war dabei zweimal integriert worden, und das Ergebnis, die Eindringung des Pfahlfusses, auf der Abzisse, die Kraft am Pfahlfuss auf der Ordinate aufgetragen worden. Zum Vergleich wurden auch die entsprechenden, in einer statischen Probelastung ermittelten Kurven eingezeichnet.

Die Differenz zwischen der dynamischen und statischen Kurve bezeichnet man als dynamischen Widerstand oder Dämpfung. Diese Dämpfung ist im Falle des bindigen Bodens - rechts im Bild 2 - wesentlich grösser als die zugehörige statische Grenztragfähigkeit, W_g , während beim Feinsand die Differenz nicht so gross ist. Obwohl die Dämpfung einen Maximalwert zur Zeit der grössten Geschwindigkeit (7) erreicht, ist sie nicht immer von der

Geschwindigkeit des Pfahlfusses allein abhängig. Zum Beispiel nahm der Spitzendruck im rechten Bild noch zu, während die Geschwindigkeit schon sehr klein war und abnahm. Eine bessere Interpretation dieser Kraftzunahme muss die Bewegung des Bodens berücksichtigen.

In den beiden Diagrammen des Bilds 2 sind auch elasto-plastische Linienzüge eingezeichnet, die das statische Verhalten des Bodens i.a. genügend genau beschreiben und daher in der Pfahldynamik verwendet werden. Dabei soll noch erwähnt werden, dass in der Literatur der elastische Grenzweg, bei dem das Bodenverhalten vom elastischen in den plastischen Zustand übergeht, mit "q" bezeichnet wird.

Auf zeitabhängige Vorgänge, die die Tragfähigkeit eines Pfahles nach dem Schlagen verändern, sei hier nicht eingegangen. Es sei nur erwähnt, dass es sich bewährt hat, dynamische Tests nach einer Wartezeit nach dem Rammen durchzuführen.

3. Die dynamischen Methoden zur Bestimmung der Pfahltragfähigkeit.

3.1 Die Rammformeln

Diese alte und weit verbreitete Methode zur Pfahltragfähigkeitsbestimmung stellt eine Beziehung zwischen der durch den Bären aufgebrachten und der durch den statischen Anteil des Bodenwiderstandes aufgenommenen Energie her. Energieverluste werden mehr oder weniger pauschal erfasst. Als erste Verbesserungsmaßnahme errechnet man meistens einen Schlagverlust unter der Annahme zweier aufprallender Körper und einer Stossziffer k . Die im Pfahl gespeicherte Verformungsenergie ist eine weitere Grösse, die häufig von der gesamten Rammenergie abgezogen wird. In manchen Formeln werden dann noch weitere pauschale Abschläge gemacht, um die durch den dynamischen Bodenwiderstand verursachten Energieverluste zu erfassen.

Hier sei noch einmal auf Bild 2 hingewiesen, in dem man die durch den statischen und den dynamischen Bodenwiderstand aufgezehrte Energie

sehr leicht miteinander vergleichen kann. Man sieht, dass im Fall des bindigen Bodens der dynamische Energieanteil mindestens ebensogross wie der statische ist. Aus diesem Grund und wegen der grossen Ungewissheit, was die eigentliche Bärenergie betrifft, schwanken die Sicherheitsfaktoren bei manchen Rammformeln zwischen 0,5 und 6,0.

3.2 Das Wellengleichungsverfahren

Im Jahre 1950 stellte Smith (1) ein numerisches Rechenverfahren vor, mit dessen Hilfe die Differentialgleichung der sich in einem Stab fort-pflanzenden Druckwelle auch in Gegenwart von komplizierten Randbedingungen gelöst werden konnte. Es handelte sich dabei eigentlich um eine Differenzenmethode, die man sich aber auch als die Lösung für einen Stab, der in einzelne Massenpunkte und Federn aufgeteilt ist, vorstellen kann. 1960 zeigte Smith(2) dann, wie das Pfahlproblem im einzelnen mit Hilfe der diskreten Rechnung zu lösen ist. Viele andere Veröffentlichungen, z.B. (3) und (4), behandelten später die Auswahl der Parameter und andere Einzelheiten, die zur richtigen Bär- und Pfahlsimulierung notwendig werden. Während Smith seine ersten Berechnungen noch von Hand ausführte, wurden bald Programme geschrieben, die die erforderlichen Arbeiten in kurzer Zeit erledigten.

Bild 3 zeigt das Rechenmodell: ein in Federn und Massenpunkte aufgeteilter Bär und Pfahl. Entsprechend Bild 1 wurde auch hier das Modell eines Dieselbären dargestellt. Das Diagramm rechts oben im Bild zeigt das vereinfachte Kraft-Verformungsverhalten eines Rammfutters, wie es häufig in dem Verfahren zur Anwendung kommt. Dabei hat die Feder während der Belastung eine Steifigkeit c und während der Entlastung eine Steifigkeit c/k^2 , wobei k die Stossziffer ist. Tatsächlich ist dieser Kurvenverlauf natürlich gekrümmt.

In der Mitte rechts im Bild 3 ist das Modell, das allgemein zur Beschreibung des Bodenverhaltens angesetzt wird, dargestellt. Es besteht aus einer Feder, die, wenn die Zusammendrückung grösser als der elastische Grenzweg, q , wird, plastifiziert. Ausserdem ist ein linearer Dämpfer eingebaut, d. h. also ein Mechanismus, der eine der Pfahlelementsgeschwindigkeit proportionale Widerstandskraft erzeugt. Ein typisches, diesem Modell entsprechendes Kraft-Eindringungsdiagramm ist rechts unten eingezeichnet. Die Summe der Grenzwiderstände aller Elemente ist die Pfahltrügfähigkeit.

DAS WELLENGLEICHUNGSVERFAHREN

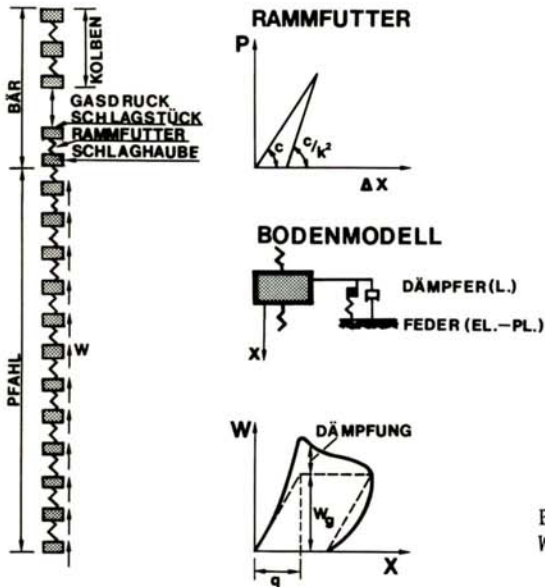
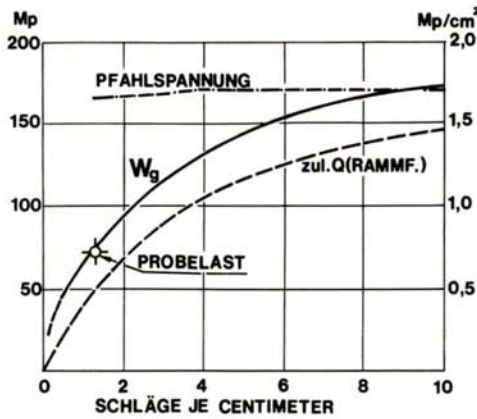


Bild 3: Grundelemente des Wellengleichungsverfahrens.

Ein Beispiel (5) ist im Bild 4 zusammenfassend dargestellt. Für einen Stahlpfafl von 15,1 Meter Länge, der mit einem Dieselpfählen in einen Kiessand gerammt wurde, wurde eine "Tragfähigkeitskurve" nach dem Wellengleichungsverfahren berechnet. Dies geschah, indem man eine beliebige Tragfähigkeit annahm und entsprechend dem Diagramm rechts oben am Pfahl verteilte. Für q nahm man an allen Elementen 2,5 Mille-

BEISPIEL ZUM WGV

PFAHL: \bar{I} 250 mm; L - 15,2 m
 BÄR: D-12
 BODEN: KIESSAND



$$q_{\text{Mantel}} - q_{\text{Spitze}} = 2,5 \text{ mm}$$

$$J_{\text{Mantel}} = 0,15 \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

$$J_{\text{Spitze}} = 0,45 \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

Bild 4: Wesentliche Bodenkennwerte und Pfahldaten als Eingabewerte, die Tragfähigkeitskurve und die errechnete maximale Pfahldruckspannung als Ausgabewerte des Wellgleichungsverfahrens.

meter an. Der Dämpfungskoeffizient, J , der mit Geschwindigkeit und statischer Widerstandskraft multipliziert die Dämpfung ergibt, wurde am Mantel mit 0,15 und an der Spitze mit 0,45 Sekunden je Meter gewählt. Diese Bodenwerte sind typisch für rollige Böden.

Unter der Annahme all dieser Bodenwerte wurde nun mit der dem Bären entsprechenden Fallhöhe ein Schlag simuliert, wodurch man eine Pfahleindringung oder umgekehrt eine Schlagzahl fand. Die Rechnung wurde dann mit anderen Grenztragfähigkeiten wiederholt und die Ergebnisse in Form einer Tragfähigkeitskurve aufgetragen. Diese Kurve wird nun ähnlich einer Rammformel benutzt, indem man die zu einer Schlagzahl gehörige Tragfähigkeit an der Ordinate abliest.

In dem Beispiel des Bildes 4 wurde auch ein Probelastergebnis eingetragen. Zum Vergleich wurde dazu das Resultat der meistverwendeten amerikanischen Rammformel, der Engineering News Record Formel, eingezeichnet. Die Kurvenverläufe sind ähnlich, jedoch hatte die ENR-Formel hier einen zu

kleinen Sicherheitsfaktoren ergeben (die Formel ergibt die zulässige Pfahllast).

Ein weiteres Ergebnis, nämlich die maximale Pfahlspannung wurde hier der Berechnung entnommen und aufgetragen. Dieses Resultat ist insbesondere bei Betonpfählen sehr wesentlich.

3.3 Das Case Verfahren

Im Jahre 1958 wurde am Case Institute of Technology in Cleveland, Ohio vorgeschlagen (6), Messungen während des Rammens am Pfahlkopf vorzunehmen. Es zeigte sich, dass Kraft- oder Dehnungsgeber und Beschleunigungsgeber auch routinemässig am oder über dem Pfahlkopf angebracht werden können.

Mit Hilfe der beiden Messgrössen, Kraft und Beschleunigung am Pfahlkopf, ist es möglich die irgendwie am Pfahl verteilte Bodenwiderstandskraft zu berechnen. Bei der Herleitung der Formel (7), die im Bild 5 gezeigt ist, wurde die Pfahlelastizität berücksichtigt.

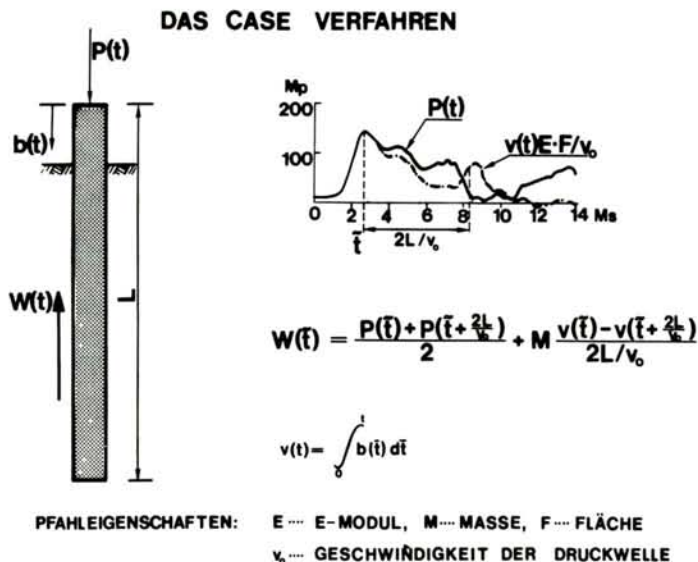


Bild 5: Grundzüge des Case Verfahrens, Messung von Pfahlkopfkraft, P(t), und - beschleunigung, b(t) und Errechnung der Bodenwiderstandskraft unter der Annahme eines elastischen, kontinuierlichen Pfahles.

Allerdings musste angenommen werden, dass die Bodenwiderstandskraft vom ideal-plastischen Typ ist.

Die Kraft- und Geschwindigkeitskurven (die Geschwindigkeit wurde durch Integration der gemessenen Beschleunigung gefunden) des im Bild 4 gezeigten Beispiels sind ebenfalls im Bild 5 dargestellt. Dabei wurde die Geschwindigkeit mit einem Proportionalitätsfaktor $E \cdot F / v_0$ multipliziert, d. h. mit dem E-Modul und der Fläche des Pfahles multipliziert und durch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckwelle im Pfahl dividiert.

Die Formel zur Berechnung der Pfahltragfähigkeit besteht aus einem Kraft und einem Trägheitsanteil. Jeder dieser beiden Teile besteht aus zwei Messungen, nämlich einer zu einer Zeit \tilde{t} und einer zu einer Zeit $\tilde{t} + 2L/v_0$. Da L die Pfahllänge ist, bedeutet dies im Grunde, dass man die Eingabe des Bären zu einer Zeit \tilde{t} misst, und die Antwort des Pfahles, die durch den Bodenwiderstand modifiziert ist, dann bestimmt, wenn die Druckwelle nach der Reflektion am Pfahlfuss zum Pfahlkopf zurückkehrt.

Vergleiche der Resultate mit Probelastungen zeigen, dass die Zeit \tilde{t} umso später gewählt werden muss, je plastischer der Boden ist. Der Grund dafür ist das Abklingen der Dämpfungskräfte mit der Abnahme der Pfahlgeschwindigkeit.

Das Ergebnis eines dynamischen Tests, der an einem 42,7 Meter langen Spannbetonpfahl in Schluff und Ton vorgenommen wurde, ist in Bild 6 dargestellt (8). Das Verfahren wurde dabei mit Hilfe von Beschleunigungs- und Dehnungsgebern, die am Pfahlkopf angeschraubt wurden, und mit Hilfe eines speziellen Analogrechners angewendet. Der Spezialrechner führt die erforderlichen Berechnungen innerhalb weniger Millisekunden nach dem Schlag durch und druckt die Tragfähigkeit zusammen mit anderen Ergebnissen, wie hier der in den Pfahl eingeleiteten Energie, aus.

DAS CASE VERFAHREN

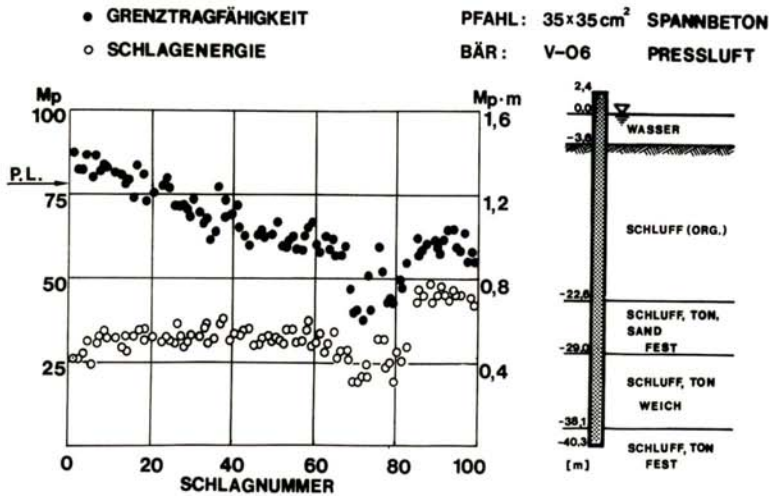


Bild 6: Beispiel zum Case Verfahren. Die im Diagramm aufgetragenen Ergebnisse wurden von einem Spezialrechner während des Rammens ausgedruckt.

Die hier gezeigten Ergebnisse sind typisch für einen Pfahl, der nach einer Wartezeit wiedergerammt wird. Wie man sieht, nahm die Tragfähigkeit unter den ersten Schlägen sehr schnell ab. Die Variation der Energiewerte, die wenig Einfluss auf die Tragfähigkeitswerte hatte, war durch eine Erhöhung des Pressluftdruckes erzeugt worden. Es sei noch erwähnt, dass dieser Pfahl mit durch das Wellengleichungsverfahren bestimmten Energien gerammt worden war, um zu grosse Zugspannungen im Pfahl zu vermeiden.

Dehnungsgeber, die am Pfahl angebracht werden, oder Kraftgeber, die man auf Pfähle setzen kann, und Beschleunigungsgeber sind in mehreren Varianten erhältlich. Ebenso kann der Spezialrechner, der unter Berücksichtigung der auf Baustellen üblichen schweren Bedingungen gebaut wurde im Handel erworben werden.

Eine Anwendung eines Kraftgebers auf Stahlrohrpfählen und eines Rechners auf einer Baustelle ist im Bild 7 gezeigt. Hier wurden die



Bild 7: Kraft- und Beschleunigungsgeber zwischen einem Dieselbären und einem 12-Zoll Stahlrohrpfahl, Spezialrechner und Magnetbandgerät auf einer Baustelle zur Überprüfung der Pfahltragfähigkeiten. (Die auf den Pfählen geschriebenen Werte sind Pfahl-tiefen in Fuss).

Tragfähigkeiten von 20 Pfählen innerhalb von eineinhalb Stunden überprüft. Ein Magnetbandgerät, das ebenfalls auf dem Bild zu sehen ist, nahm die Kraft- und Beschleunigungsdaten zur weiteren Verwendung im Kombinierten Verfahren auf.

3.4 Das Kombinierte Verfahren

Dieses 1970 veröffentlichte Verfahren (7), (9) bedient sich der Messungen des Case Verfahrens und des Pfahl- und Bodenmodells des Wellengleichungsverfahrens. An Hand eines Beispielles (10) sind die Grundzüge dieses Verfahrens im Bild 8 zusammengefasst. Der Pfahl war in diesem Fall ein 23 Meter langes Stahlrohr von oben 36, in der Mitte 32 und unten 28 Zentimeter Durchmesser. Zur Berechnung wurde dieser Pfahl in zehn Elemente aufgeteilt.

DAS KOMBINIERTE VERFAHREN

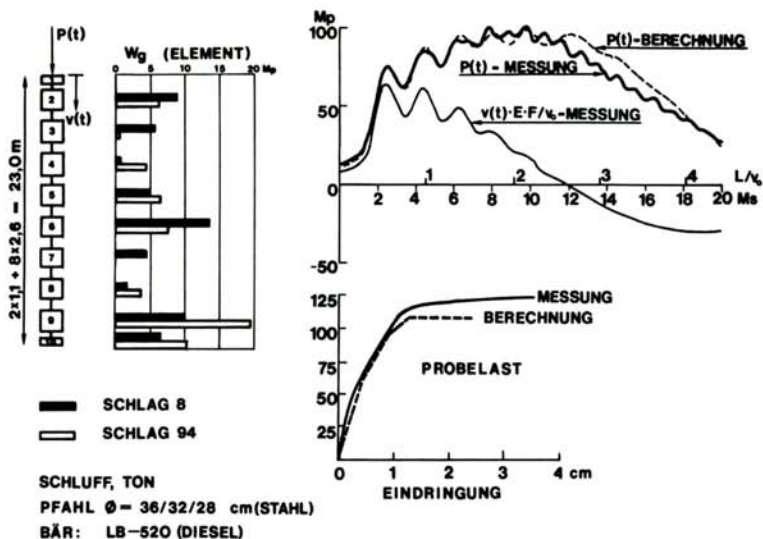


Bild 8: Grundelemente des und ein Beispiel zum Kombinierten Verfahren.

Unter der Annahme einer bestimmten Verteilung von statischen und dynamischen Bodenwiderstandskräften wurde nun eine Rechnung durchgeführt, mit der gemessenen Pfahlkopfgeschwindigkeit als Randbedingung. Das Ergebnis dieser Berechnung war eine bestimmte Pfahlkopfkraft, die mit der gemessenen jedoch nicht völlig übereinstimmte. Aufgrund wellenmechanischer Überlegungen war es aber möglich eine Verbesserung der ursprünglich angenommenen Bodenwiderstandskräfte zu ermitteln, worauf eine erneute Berechnung durchgeführt wurde. Dieses Vorgehen wurde wiederholt bis die Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Pfahlkopfkraftkurve nicht mehr verbessert werden konnte.

Ein Vergleich der gemessenen mit der berechneten Pfahlkopfkraftkurve ist im Bild 8 rechts oben gezeigt zusammen mit der als Randbedingung verwendeten Geschwindigkeitskurve. Als Ergebnis erhält man von dieser Berechnung neben den Dämpfungskoeffizienten die Größe und Verteilung der

statischen Tragfähigkeitswerte für jedes Element. Diese Werte wurden links im Bild für den achten und vierundneunzigsten Schlag nach einer Wartepause aufgetragen. Als Resultat des Wiederschlagens erkennt man hier eine Verschiebung der Mantelreibung zur Pfahlspitze hin.

Als ein weiteres Ergebnis kann nun mit Hilfe einer statischen Berechnung eine Probelastung simuliert werden. Die in Bild 8 gezeigte Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter (vom achten Schlag) Last-Setzungskurve ist sehr gut.

Das Verfahren ist voll automatisiert und wird von einem Programm, genannt CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program), gesteuert. Im allgemeinen werden dabei 15 bis 20 Proberechnungen durchgeführt.

4. Wertung der Verfahren

Das Tragfähigkeitsproblem gerammter Pfähle ist mit den drei hier vorgestellten Verfahren entschärft, wenn auch noch nicht völlig gelöst worden. Einige Daten müssen immer noch auf empirischem Wege bestimmt werden.

Beim Wellengleichungsverfahren können Fehler in der Annahme der Aufschlaggeschwindigkeit des Schlaggewichtes und in der Modellierung der Kissen und Aufschlagflächen gemacht werden. Immerhin trägt die Methode aber zu einer wesentlich besseren Erfassung der elastischen Eigenschaften von Bär und Pfahl als in den üblichen Rammformeln bei. Dieses Verfahren ist vereits weit verbreitet und wird an allen praktisch vorkommenden Pfahl-, Bär- und Bodenarten verwendet.

Das Case Verfahren eliminiert jegliche Fehlerquellen in der Annahme der Bärenergie. Tatsächlich können neben Messungenauigkeiten Fehler nur dann auftreten, wenn die Zeit \check{t} , d.h. also die Dämpfungskräfte falsch eingeschätzt werden. Vergleiche mit mehr als einhundert Probelastungen

für eine Vielzahl von Pfahltypen und Bodenarten zeigen jedoch, dass diese Fehleinschätzung relativ kleine Fehler in den meisten praktischen Fällen verursacht.

Das Kombinierte Verfahren ist in seiner Anwendung etwas begrenzter als die beiden anderen Verfahren, da es sich sowohl der Messung als auch des elektronischen Rechners bedient. Es kann wirtschaftlich in Zusammenhang mit dem Case Verfahren angewendet werden und stellt eine wirkungsvolle Kontrolle der Güte aller anderen dynamischen Methoden dar. Die einzige Beschränkung dieses Verfahrens liegt in der Wahl des Bodenmodells.

5. Zusammenfassung

Es wurden drei dynamische Verfahren vorgestellt, die sich entweder eines elektronischen Rechners, dynamischer Messungen oder beider Mittel bedienen. Alle Verfahren präzisieren den dynamischen Lastversuch im Vergleich mit der Rammformel. Da es sich um dynamische Verfahren handelt, sollten Proberammungen nach einer Wartepause nach dem eigentlichen Rammen durchgeführt werden.

Probelastungen können nicht völlig ausgeschaltet, deren Anzahl jedoch stark reduziert werden. Da mit den dynamischen Testmethoden leicht eine grosse Anzahl von Pfählen überprüft werden kann, erhöht sich dann die Sicherheit der Pfahlgründung bei gleichzeitigen Kosteneinsparungen.

6. Quellen

1. Smith, E.A.L., "Pile Driving Impact", Proceedings, Industrial Computation Seminar, September, 1950, International Business Machine Corp., New York, N.Y., 1951, p.44.
2. Smith, E.A.L., "Pile Driving Analysis by the Wave Equation", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, Paper 2574, SM 4, August, 1960, pp. 35-61.
3. Forehand, P.W. and Reese, J.L., "Prediction of Pile Capacity by the Wave Equation", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the ASCE, Paper 3820, SM 2, March, 1964, pp. 1-25.
4. Lowery, L.L., Hirsch, T.J., Edwards, T.C., Coyle, H.M., Samson, C.H., "Pile Driving Analysis - State of the Art", Research Report 33-13 (Final), Texas Transportation Institute, Texas A&M University, January 1969.
5. Goble, G.G., Kovacs, W.D., Rausche, F., "Field Demonstration: Response of Instrumented Piles to Driving and Load Testing", Proceedings of the Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures, Purdue University, Lafayette, Indiana, June 11-14, 1972, Vol. III, pp. 3-38.
6. Eiber, R.J., "A Preliminary Laboratory Investigation of the Prediction of Static Pile Resistances in Sand", Master's Thesis, Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, 1958.
7. Rausche, F., "Soil Response from Dynamic Analysis and Measurements on Piles", Ph.D. Dissertation, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1970.
8. Goble, G.G., Likins, G.E., "A Static and Dynamic Pile Test in Whitehall, New York", Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, August, 1970.
9. Rausche, F., Moses, F., Goble, G.G., "Soil Resistance Predictions from Pile Dynamics", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE, Paper 9220, SM 9, September 1972, pp. 917-937.
10. Goble, G.G., Rausche, F., "Static and Dynamic Pile Tests in the Cuyahoga River Valley", Interim Report, Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, June, 1973.