

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr. 19

Zusammengestellt von H. Meseck

Dynamische Pfahltests

Fachseminar 23. – 24. Oktober 1985
Braunschweig

Braunschweig 1985

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr. 19

Zusammengestellt von H. Meseck

Dynamische Pfahltests

Fachseminar 23. – 24. Oktober 1985
Braunschweig

Braunschweig 1985

Vorwort

Unter der Leitung von Professor Dr.-Ing. Hanns Simons begann das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig im Jahre 1978 mit der Entwicklung eines eigenen Meß- und Auswertungssystems für dynamische Pfahltests. In den folgenden Jahren wurde damit die Tragfähigkeit bzw. Integrität von mehr als 2.000 Pfählen im In- und Ausland überprüft. Parallel zu diesen Baustelleneinsätzen wurden verschiedene Forschungsvorhaben bearbeitet.

Um die Einsatzmöglichkeiten und die Grenzen der dynamischen Pfahltestverfahren einem größeren Fachpublikum vorzustellen, veranstaltete das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig am 23. und 24. Oktober 1985 ein Fachseminar über dynamische Pfahltests. Vortragende aus Hochschulen, Behörden und ausführenden Firmen berichteten über die Bestimmung der Tragfähigkeit und Integrität von Pfählen mit dynamischen Pfahltestverfahren. Die Referate aller Vortragenden sind in diesem Tagungsband zusammengestellt. Für die Anfertigung ihrer Manuskripte möchte ich den Referenten hiermit vielmals danken.

Ergänzt wurde das Seminar durch ein Praktikum im Labor des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Hier wurden die vorhandenen Meßanlagen sowie die Auswertungssysteme vorgestellt und durch Messungen an einem Modellpfahl erläutert.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H. Meseck', written in a cursive style.

Holger Meseck

Inhaltsverzeichnis

Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen E. Franke	1
Theoretische Grundlagen dynamischer Pfahltestverfahren H.-G. Balthaus	21
Einsatz von Wellengleichungsprogrammen zur Vorausbe- stimmung der Rammbarkeit und Tragfähigkeit von Pfählen H. Meseck	53
Meßtechnische Grundlagen dynamischer Pfahltestverfahren H.-G. Balthaus	77
Einsatzmöglichkeiten dynamischer Pfahltests bei Bohrpfählen J. Seitz	97
Integritätsprüfungen an Ortbetonpfählen G. Ulrich	123
Einsatz dynamischer Pfahltests aus der Sicht eines Bauherrn H. Braaker	149
Was leisten Rammbare wirklich ? H. Meseck, J. Seitz	161
Neue Forschungsergebnisse H.-G. Balthaus, H. Meseck	181
Kritische Betrachtung der dynamischen Pfahlprüfverfahren H. Meseck	203

Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen

Prof. Dr. – Ing. E. Franke

TH Darmstadt

Die DIN 1054 befaßt sich in Abschnitt 5 mit den allgemeinen Angaben zum Entwurf von Pfahlgründungen. Hinsichtlich vieler Angaben zur Festlegung der Grenzlast ist sie als überholt zu betrachten, nicht jedoch hinsichtlich des Grundsatzes, zwischen Grenzlast Q_g und Bruchlast Q_f zu unterscheiden.

Normalerweise ordnet man ja Tragfähigkeit und Bruchlast einander zu. Nach der Einführung der Großbohrpfähle mußten wir jedoch erkennen, daß die Verwendung der Bruchlast bei der Anwendung üblicher Sicherheitswerte von etwa $\eta = 2$ bei der Ermittlung der zulässigen Pfahlbelastung

$$\text{zul } Q = \frac{Q_f}{\eta} \quad (1)$$

viel zu große Setzungen in Gebrauchszustand ergibt, so daß in sinnvoller Weise $Q_g \leq Q_f$ definiert werden muß (s. dazu Formel 3, in der Q_g in Abhängigkeit von den zulässigen Setzungen angegeben wird).

Wie gesagt, ist in der DIN 1054 unter 5.4.1 bereits früher

$$Q_g \leq Q_f \quad (2)$$

definiert worden, jedoch im Vergleich zu Formel (3), die erst später unter 5.4.3 in DIN 1054 eingefügt wurde und auf die noch näher eingegangen wird, zu weit auf der sicheren Seite. Dazu nun einige Einzelheiten.

Nach Bild 1 wird die Grenzlast Q_g aus der Lastsetzungsline (Arbeitslinie) von Probelastungen an der Stelle definiert, an welcher der flache Ast nach einem Übergangsbereich mit zunehmend größer werden den Setzungen in den steil abfallenden Ast übergeht und der Pfahl "unter der Grenzlast merkbar versinkt".

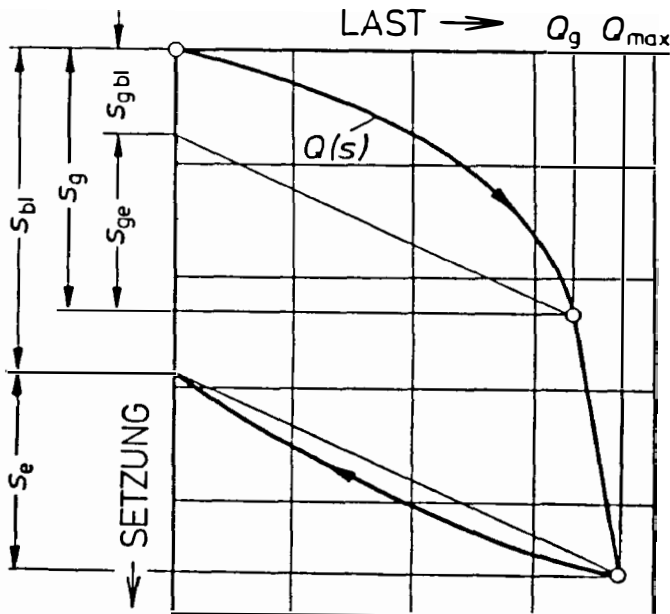


Bild 1: Last-Setzungsdiagramm aus DIN 1054

Sofern der Verlauf der Arbeitslinie es nicht gestattet, Q_g auf diese Weise festzulegen, wird die Grenzlast entweder gleich der n -fachen Gebrauchslast (zul. Q) oder gleich der größten erreichten Last gesetzt oder aber in Abhängigkeit von einer "Grenzsetzung" s_g festgelegt, und zwar ist

- a) $s_g = 2 \text{ cm}$ für Bohrpfähle nach DIN 4014, Teil 1
- b) $s_g = 0,025 b_F$ (bleibende Setzung) für Ramppfähle.

Alle diese Festlegungen unter 5.4.1 der DIN 1054 führen in der Regel zu nur 0,5 bis 1 cm Setzungen s im Gebrauchszustand, so daß die entsprechenden Setzungsdifferenzen Δs (s. Formeln 4) praktisch vernachlässigbar klein werden. Große Pfähle lassen sich dann nicht mehr wirtschaftlich ausnutzen und herstellen. Wie mit Formel (7) noch verdeutlicht wird, gestatten große Pfähle hoher Tragfähigkeit auch große Pfahlabstände a und damit große Setzungsdifferenzen Δs bzw. Setzungen s , die einander proportional sind (s. Formel 4). Stehen große Pfähle eng, so erhalten sie i.d.R. eine steife Kopfplatte, welche unzulässige Setzungsdifferenzen verhindert).

Die Ursache für die zu vorsichtige Einschätzung der Grenzlast Q_g nach DIN 1054, 5.4.1 erklärt sich im übrigen wie folgt:

Mantelreibung und Spitzendruck haben ein recht unterschiedliches Arbeitsverhalten. Der Spitzendruck entwickelt sich gemäß Bild 2 mit den Setzungen s viel "langsamer" als die Mantelreibung. Man aktiviert die Mantelreibung viel "schneller" und erreicht viel "schneller" die Grenzlast. Die zugehörigen Setzungen liegen in der Größenordnung von 1 bis 2 cm bei Pfählen über 50 cm Durchmesser. Unter 50 cm Durchmesser sind die Setzungen im allgemeinen noch geringer. Trägt man jetzt die Summe der beiden Linien auf, wird die starke Krümmung der Mantelreibungslinie häufig den Punkt repräsentieren, wonach die DIN 1054 die Grenzlast festlegt.

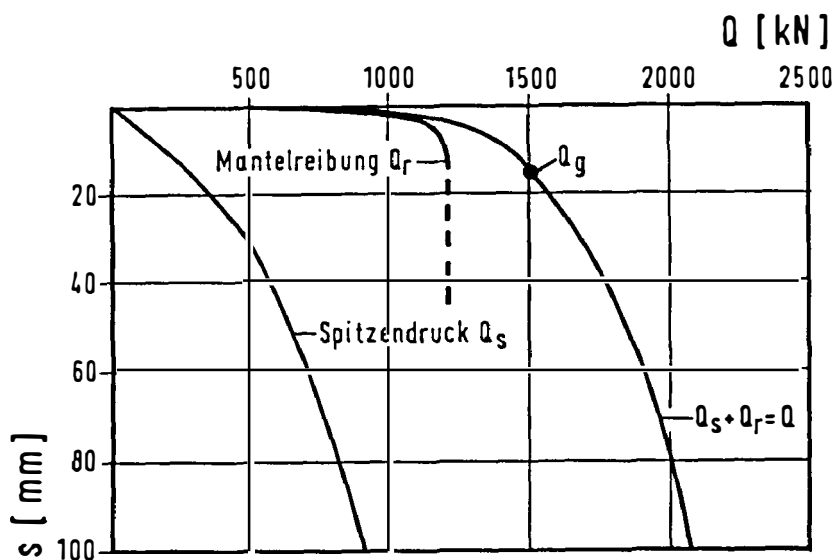


Bild 2: Spitzendruck- und Mantelreibungsverlauf

Wir werden also bei unseren normalen Probelastungen in der Vergangenheit häufig die Grenzlast an der Stelle definiert haben, wo gerade die Grenzlast der Mantelreibung erreicht war und insofern häufig einiges verschenkt haben, nämlich an Spitzendruck in den Fällen, wo die Setzungen bzw. die Setzungsdifferenzen hätten größer sein dürfen, als man auf diese Weise herausbekommt.

Auch wenn man in Fällen, in denen keine Grenzlast wie auf Bild 1 erkennbar ist, die obigen Regeln a) und b) anwendet, ergeben sich i.d.R. nur 0,5 bis 1 cm Setzung im Gebrauchszustand. Dieses Ergebnis war übrigens beabsichtigt. Wie ich in Gesprächen mit den Kollegen der Generation vor uns im Pfahlausschuß bemerkt habe, beruhen die alten Regelungen, die noch gelten, auf der Ansicht, daß eine Pfahlgründung eigentlich überhaupt nie Setzungen erleiden sollte, die Anlaß geben, in irgendeiner Weise Stützensenkungen zu berücksichtigen. Man ist also früher davon ausgegangen, eine Pfahlgründung immer so zu bauen, daß Setzungen praktisch vernachlässigbar klein bleiben.

Dieser Standpunkt kann heute nicht mehr aufrechterhalten werden, da wir bei konventionellen Pfählen eben nicht mehr bei Durchmessern kleiner 50 cm sind, sondern Pfähle bis über 2 m Durchmesser haben.

Wir haben bei der Großbohrpfahlnorm ganz bewußt eingeführt, Setzungen im Gebrauchszustand bis zu etwa 2 ‰ des Pfahldurchmessers, d.h. bis 4 cm zuzulassen. Das bedeutet, daß die Setzungsdifferenzen, die zwischen den Pfählen auftreten, dann in der Größenordnung von 2 cm liegen. Wenn solche Setzungsbeträge bei den großen Pfählen nicht zugelassen werden (das gilt auch bei den großen Rammpfählen über 1 m Durchmesser, wie sie heute angewendet werden) dann sind solche Pfähle, - wie schon gesagt -, wirtschaftlich nicht ausnutzbar.

Insofern muß die nächste Ausgabe der DIN 1054 überholt werden, indem wir vom zulässigen Setzungsverhalten der Pfähle ausgehen. Wir haben z.B. in der neuen Bohrpfahlnorm, die jetzt als Gelbdruck herauskommt und die alle Bohrpfähle von 30 cm bis 3 m umfaßt, eingeführt, daß die Grenzsetzungen bei 10 ‰ des Durchmessers liegen soll. Wir gehen also von der unter a) genannten Regel ab und werden das wahrscheinlich auch hinsichtlich der Regel b) tun. Mit einer Grenzsetzung von 10 ‰ des Durchmessers werden wir dann zu einer wirtschaftlichen Ausnutzung der Pfähle kommen.

Kennt man die Grenzlast Q_g , errechnet sich die zulässige Pfahlbelastung zul. Q nach Formel (1) zu

$$\text{zul. } Q = \frac{Q_g}{\eta}$$

wobei sich η gegenüber den jetzt gültigen Werten der folgenden Tabelle nicht ändern soll.

Pfährlart	Anzahl der unter gleichen Verhältnissen ausgeführten Probebelastungen	Sicherheit bei Lastfall		
		1	2 mindestens	3
Druckpfähle	1 ≥ 2	2 1,75	1,75 1,5	1,5 1,3
Zugpfähle mit Neigungen bis 2: 1 ¹⁾	1 ≥ 2	2 2	2 1,75	1,75 1,5
Zugpfähle mit einer Neigung von 1: 1 ¹⁾	≥ 2	1,75	1,75	1,5
Pfähle mit größerer Wechselbeanspruchung (Zug und Druck)	≥ 2	2	2	1,75

¹⁾ Bei Zugpfählen mit Neigungen zwischen 2: 1 und 1: 1 ist die Sicherheit in Abhängigkeit vom Neigungswinkel geradlinig zwischen den Werten der Zeilen 4 und 5 zu interpolieren.

Bild 3: Sicherheit n aus DIN 1054, Tabelle 8

Wichtig ist in diesem Zusammenhang zusätzlich der Abschnitt 5.4.1.3 der DIN 1054. Die aus Formel (1) hinsichtlich des Versagens des den Pfahl umgebenden Bodens ermittelte zulässige Pfahlbelastung darf nämlich nicht zu einer Setzung bzw. Hebung oder zu Setzungsunterschieden führen, die die Konstruktion oder die Nutzung des Überbaus beeinträchtigen. Darauf sollte man schon bei der Konzipierung von Probebelastungen und Belastungsvorrichtungen Rücksicht nehmen. Um das zu erreichen, wird empfohlen, generell von dem Abschnitt 5.4.3 der DIN 1054 Gebrauch zu machen, der zur Zeit noch auf Pfähle größeren Durchmessers beschränkt ist. Es wird dort gesagt, daß die zulässige Pfahlbelastung durch die zulässigen Setzungen zu begrenzen ist, über die sich der Ingenieur ohnehin bei jedem Bauwerk Gedanken machen muß. Deshalb definiert man bei Probebelastungen zweckmäßigerweise eine Prüf-Grenzlast Q_g , die zu folgender Grenzsetzung s_g gehört:

$$s_g = n^2 \cdot s \quad (3)$$

Diese Grenzsetzung, die jetzt die Verträglichkeit der Pfahlsetzung mit dem Bauwerk einbezieht, wird im folgenden erläutert.

Viele Probebelastungen haben gezeigt, daß mit hinreichender Genauigkeit die Last-Setzungslinie als quadratische Parabel angenähert werden kann (Bild 4).

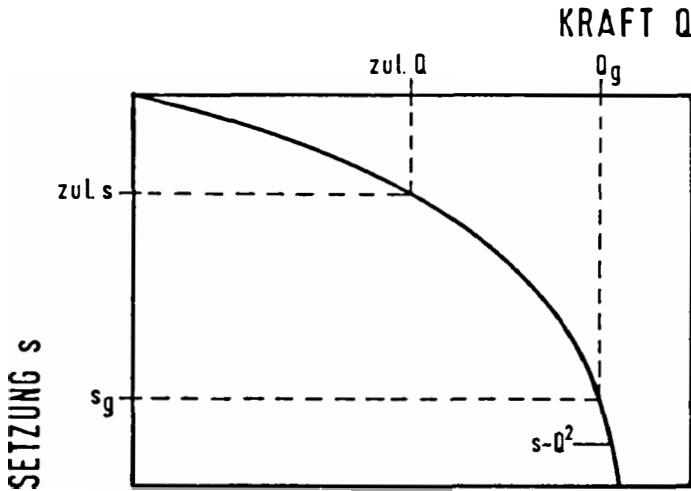


Bild 4: Last - Setzungslinie

Aus der Last-Setzungslinie folgt:

$$\begin{aligned}s &\sim Q^2 \\ s_g &\sim Q_g^2 \\ \text{zul } Q &= Q_g / \eta \rightarrow Q_g = \eta \cdot \text{zul } Q \\ Q_g^2 &= \eta^2 \cdot \text{zul } Q^2 \\ s_g &= \eta^2 \cdot \text{zul } Q^2 \\ \text{zul } s &\sim \text{zul } Q^2 \\ s_g &= \eta^2 \cdot \text{zul } s\end{aligned}$$

Nur auf diese Weise ist es möglich, bei großen Pfählen die bisherigen η -Werte der Tabelle 8 der DIN 1054 (s.o.) aufrecht zu erhalten.

Für die Wahl zutreffender (zul s)-Werte ist folgendes zu beachten: Die Setzungsdifferenzen Δs gleicher und gleichbelasteter Pfähle in gleichartigem Baugrund, die infolge nicht erfaßbarer Schwankungen der Baugrundfestigkeit und der Herstellungsqualität auftreten können, stehen mit den zu erwartenden mittleren Setzungen s (bei biegeweichem Überbau) etwa in folgender Beziehung:

$$\begin{aligned} \Delta s &\leq s/4 \text{ bei Rammpfahlgründungen} \\ \Delta s &\leq s/3 \text{ bei Bohrpfahlgründungen} \\ (\Delta s &\leq s/2 \text{ bei Flachgründungen z. Vgl.}) \end{aligned} \quad (4)$$

Wenn man also wie üblich die Gesamtsetzungen s ermittelt hat, dann kann man die zu erwartenden Setzungsdifferenzen Δs mit (4) und die Grenzsetzung s_g mit (3) auf einfache Weise abschätzen, die man bei einer Probelastung einzuführen hat. Planmäßige Belastungsunterschiede sind darüberhinaus zu berücksichtigen. Die Formeln (4) gelten für Pfahlabstände $a \geq 3 \cdot D$ (D =Pfahldurchmesser). Bei engeren Pfahlabständen und starren Bauwerken bzw. steifen Pfahlkopfplatten ist Δs kleiner und es gelten andere Regeln.

In der nächsten Ausgabe der DIN 1054 wird diese Verfahrensweise im Zusammenhang mit den Probelastungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit voraussichtlich generell eingeführt. Damit wird die Möglichkeit der wirtschaftlicheren Nutzung von Pfählen eröffnet, wobei gleichzeitig die Verträglichkeit der Setzung mit der Verformung des Bauwerkes berücksichtigt wird.

In der DIN 1054 steht seit über 30 Jahren eine Passage, die wir von den beiden Generationen, die vor uns die Normenarbeit gemacht hat, übernommen haben und die wir auch beibehalten wollen:

Die zulässige Belastung von Pfählen darf nicht mit theoretischen Berechnungsverfahren ermittelt werden. Empirische Verfahren werden zugelassen, wenn sie aufgrund örtlicher Erfahrungen als erprobt gelten können. Solche Erfahrungen werden in der Regel mit Probelastungen gewonnen. In diesem Sinne dürfen theoriebegründete Rammformeln nach DIN 4026, 8.2 auch nur dann zur Ermittlung der zulässigen Pfahlbelastung herangezogen werden, wenn sie an statischen Probelastungen geeicht worden sind, wobei der Eichfaktor n sich errechnet aus:

$$n = \frac{Q_{dyn}}{Q_g} \quad (5)$$

Es stellt sich nun die Frage, ob man die Ergebnisse der neueren dynamischen Stoßprüfung nicht in gleicher Weise wie die der alten Rammformeln zu beurteilen hat. Oder mit anderen Worten: Kann eine entscheidende Verbesserung bereits als nachgewiesen betrachtet werden?

Im folgenden Seminar wird hauptsächlich über diese Frage zu reden sein. Ich will hier nur noch zeigen, wie wir bei der Ermittlung des Pfahltragverhaltens künftig vorgehen wollen.

Zuerst einige allgemeine Bemerkungen:

Leider ist die Berechnung der Tragfähigkeit von Pfählen auf theoretischer Grundlage sehr problematisch. Die Pfahleinbringung verändert den Boden. Rammen verdichtet, verbessert den Baugrund, Bohren lockert auf, verschlechtert den Baugrund, und zwar je nach Pfahlart und Boden unterschiedlich. Sehen wir hier noch die Vielfalt der verschiedenen Pfahltypen an:

Bei offenen Rohr- und Kastenprofilen, I-Profilen, die in den Boden "schneiden", kann Pfropfenbildung nur eintreten, wenn die Profile etwa quadratisch sind. Aber bei großen Profilweiten bzw. hohen I-Profilen gibt es keine Pfropfenbildung, wie man weiß. Auf der anderen Seite haben wir die Verdrängungspfähle besonderer Intensität, wenn wir Pfahlfüße bei Rammortpfählen ausrammen. Insofern sind allein bei den Rammpfählen viele Unterschiede zu beachten.

Bei den Bohrpfählen haben wir eine Auflockerung, die besonders groß wird, wenn wir einen Fuß anschneiden. Das Fußanschneiden bringt immer eine zusätzliche Herabsetzung des Spitzendruckes. Wenn wir Schluff antreffen und mit einem Spülverfahren arbeiten, wird der Baugrund häufig erheblich beschädigt. Diese verschiedenen Herstellungsverfahren wären bei der Theorieentwicklung nun zu kombinieren mit einer fast unendlichen Vielzahl von Möglichkeiten des Baugrundaufbaus.

Bei insgesamt nur relativ schlechter Zunahme der Tragfähigkeit mit der Tiefe müssen reine Mantelreibungspfähle angeordnet werden. Bei einer wechselhaften Schichtung aus besseren und schlechteren Schichten erhebt sich die Frage, ob wir den Spitzendruck überhaupt ausnutzen

dürfen. Hier helfen theoretische Betrachtungen überhaupt nicht. Denn wenn an einer Stelle der Pfahl auf Spitzendruck trägt und daneben nicht, dann bleibt nur übrig, alle Pfähle nur auf Mantelreibung zu nutzen. Es sind diese vielfältigen Möglichkeiten, die bis heute verhindert haben, daß eine allgemein anerkannte Theorie als Grundlage der Pfahltragfähigkeitsermittlung zustande kam.

Nur empirisch begründete Verfahren zur Ermittlung des Tragverhaltens von Pfählen sind zulässig, d.h. solche, bei denen man die Grenzlast auf Probelastungsergebnisse zurückführen kann, die man unter ähnlichen örtlichen Verhältnissen gewonnen hat. Mit den Rammformeln allein läßt sich die zulässige Belastung nicht ermitteln.

Auf der Grundlage von vielen Probelastungen sind die Angaben in den einzelnen Pfahlnormen entstanden. Man geht allerdings davon aus, daß der Boden eine bestimmte Qualität haben muß, wenn man diese Tabellenwerte anwendet. Zudem wird vorausgesetzt, daß eine Reaktionslänge, eine Krafteintragungslänge in den sogenannten "ausreichend tragfähigen nichtbindigen Boden" oder in "annähernd halbfesten bindigen Boden" vorhanden ist. Die DIN 1054 schreibt dafür mindestens 3 m vor. Zwar gibt es viele Fälle, in denen man gefahrlos darunter bleiben kann, aber das wird man in der Regel mit Probelastungen nachweisen müssen.

In dem Bereich dieser Krafteintragungslänge muß man einen Sondierdruck von $\geq 10 \text{ MN/m}^2$ haben; auf diese Weise wird die Erfahrungsübertragung von einem Standort zum anderen auf kontrollierte Weise vollzogen.

Man darf im übrigen die Angaben der Tabellen der DIN 4026 und DIN 4014, Teil 1 (s. Bilder 8 und 9) um 25 % erhöhen, wenn man besonders guten Boden hat. Der besonders gute Boden ist dann in den verschiedenen Pfahlnormen definiert durch einen Sondierdruck $\geq 15 \text{ MN/m}^2$ bzw. I_c deutlich größer 1, nahe der Schrumpfgrenze.

Tabelle 1 Pfahlsplitzendruck in Abhängigkeit von den Setzungen in nichtbindigem Boden mittlerer Festigkeit
(Sondiersplitzendruck q_s , gleich 10 bis 15 MN/m²*)

Pfähle ohne Fußverbreiterung	
Setzung s cm	Pfahlsplitzendruck**) σ_s MN/m ² *)
1	0,5
2	0,6
3	1,1
15***)	3,4
Pfähle mit Fußverbreiterung	
1	0,35
2	0,65
3	0,9
15***)	2,4
*) 1 MN/m ² = 10 kp/cm ²	
**) Zwischenwerte sind linear einzuschalten	
***) bei der Grenzlasterlast Q_R angenommene Setzung	

Tabelle 2 Pfahlsplitzendruck in Abhängigkeit von den Setzungen in bindigem Boden annähernd halbfester Konsistenz (Konsistenzzahl $I_C \approx 1$)

Setzung s cm	Pfahlsplitzendruck**) σ_s MN/m ² *)
0,2 · s_R	0,5
0,3 · s_R	0,7
$s_R = 0,05 \cdot d_f$ ***)	1,2
*) 1 MN/m ² = 10 kp/cm ²	
**) Zwischenwerte sind linear einzuschalten	
***) s_R bei der Grenzlasterlast Q_R angenommene Setzung, d_f = Pfahlfußdurchmesser	

Anmerkung zu den Tabellen 1 und 2: Zur Abgrenzung zwischen bindigen und nichtbindigen Böden, siehe DIN 1054, Ausgabe November 1976, Abschnitt 2.1.1. und Beiblatt zu DIN 1054, Ausgabe November 1976, Erläuterungen zu Abschnitt 2.1.1.

Bild 5: Pfahlsplitzendruck in Abhängigkeit von den Setzungen
(DIN 4014, T. 2)

Tabelle 3. Mantelreibung in nichtbindigem Boden

Festigkeit des nichtbindigen Bodens	Sondierdruck *) q_s MN/m ² *)	Tiefe unter Gelände m	Mantelreibung τ_m MN/m ² *)
sehr gering	unter 5	—	0
gering	5 bis 10	0 bis 2 2 bis 5 über 5	0 0,03 0,05
mittel	10 bis 15	0 bis 2 2 bis 7,5 über 7,5	0 0,045 0,075
groß	über 15	0 bis 2 2 bis 10 über 10	0 0,06 0,1
*) Drucksonde nach DIN 4094 Teil 1			
Entsprechende Rammsondierwerte siehe Erläuterungen zu Abschnitt 7.1.2			
**) 1 MN/m ² = 10 kp/cm ²			

Tabelle 4. Mantelreibung in bindigem Boden

Festigkeit des bindigen Bodens, gekennzeichnet durch eine Scherfestigkeit c_u MN/m ² *)	Mantelreibung τ_m MN/m ² *)
0	0
0,025	0,025
0,1	0,04
0,2	0,05
*) 1 MN/m ² = 10 kp/cm ²	

Anmerkung: c_u -Werte unter 0,1 MN/m² (10 Mp/m²) können mit der Flügelsonde nach DIN 4096 (Vornorm) im Felde ermittelt werden. c_u -Werte über 0,1 MN/m² (10 Mp/m²) sind mit UU-Versuchen, siehe DIN 18 137 Teil 1 (Vornorm) zu ermitteln. Zwischenwerte der Mantelreibung dürfen für Zwischenwerte der Scherfestigkeit linear interpoliert werden.

Bild 6: Sondierdrücke und Mantelreibung (DIN 4014, T. 2)

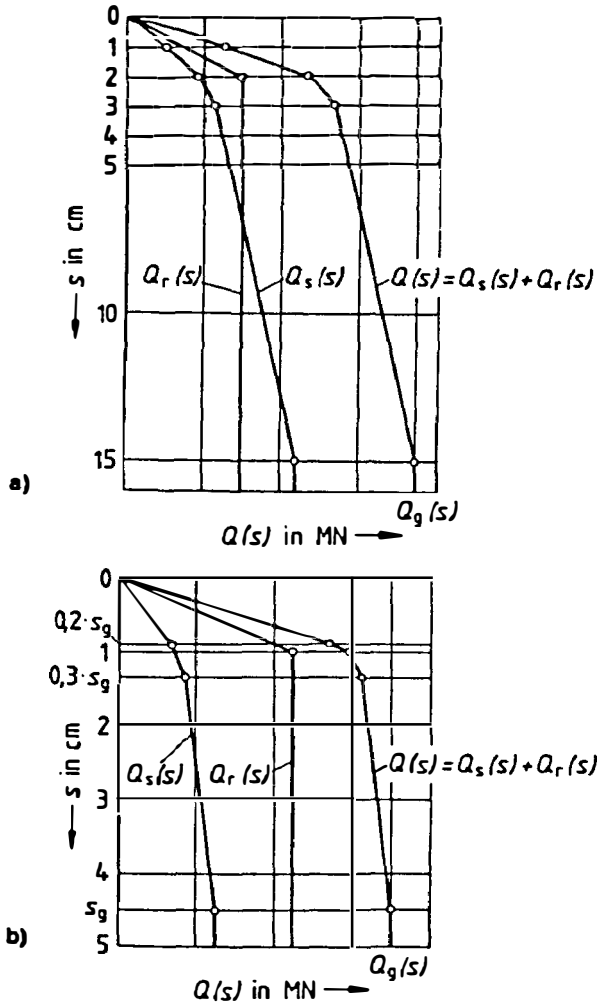


Bild 7: Konstruktion der Last-Setzungslinien (Schema)

- a) für nichtbindigen Boden unter Verwendung der Tabellen 1 und 3
- b) für bindigen Boden unter Verwendung der Tabellen 2 und 4 (aus DIN 4014, T. 2, Bild 2)

Die Werte, die wir in den Normen finden, wollen wir uns kurz ansehen. Heute wird die zulässige Druckbelastung für verschiedene Typen von Pfählen direkt angegeben (Bild 8 und 9).

Tabelle 2. Zulässige Druckbelastung von Rammpfählen aus Holz (Zwischenwerte sind geradlinig einzuschalten)

Einbindetiefe in den tragfähigen Boden m	Zulässige Belastung in kN ¹⁾				
	d _{FuB} in cm				
	15	20	25	30	35
3	100	150	200	300	400
4	150	200	300	400	500
5	—	300	400	500	600

¹⁾ 1 kN ≈ 0,1 Mp

Tabelle 3. Zulässige Druckbelastung von Ramm-
pfählen mit quadratischem Querschnitt ¹⁾
aus Stahlbeton und Spannbeton
(Zwischenwerte sind geradlinig einzuschalten)

Einbindetiefe in den tragfähigen Boden m	Zulässige Belastung in kN ¹⁾				
	Seitenlänge a ²⁾ in cm				
	20	25	30	35	40
3	200	250	350	450	550
4	250	350	450	600	700
5	—	400	550	700	850
6	—	—	650	800	1000

¹⁾ 1 kN ≈ 0,1 Mp

²⁾ Gilt auch für annähernd quadratische Querschnitte, wobei für a die mittlere Seitenlänge einzusetzen ist.

Tabelle 4. Zulässige Druckbelastung von Rammpfählen aus Stahl
(Zwischenwerte sind geradlinig einzuschalten)

Einbindetiefe in den tragfähigen Boden m	Stahlrägerpfähle ¹⁾		Zulässige Belastung in kN ¹⁾		
	Breite oder Höhe in cm		Stahlrohrpfähle ²⁾ Stahlkostenpfähle ²⁾		
	30	35	35 bzw. 30	40 bzw. 35	45 bzw. 40
3	—	—	350	450	550
4	—	—	450	600	700
5	450	550	550	700	850
6	550	650	650	800	1000
7	600	750	700	900	1100
8	700	850	800	1000	1200

¹⁾ 1 kN ≈ 0,1 Mp

²⁾ Breite I-Träger mit Höhe : Breite ≈ 1:1 z. B. IPB- oder PSp-Profil (vgl. „Stahl im Hochbau“, Verlag Stahlisen mbH Düsseldorf; „Betonkalender“, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München; Grundbau-Taschenbuch, Band 1, 2. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-München 1966, Abschnitt 2.6; „Feiner Kostenspendwand, Feiner Stahlpfähle“, Handbuch für Entwurf und Ausführung, 3. Auflage 1960).

³⁾ Die Tabellenwerte gelten für Pfähle mit geschlossener Spitze. Bei unten offenen Pfählen dürfen 90% der Tabellenwerte angesetzt werden, wenn sich mit Sicherheit innerhalb des Pfahles ein fester Bodenpropfen bildet.

⁴⁾ d = äußerer Durchmesser eines Stahlrohrpfahles bzw. mittlerer Durchmesser eines zusammengesetzten, radial-symmetrischen Pfahles.

a = mittlere Seitenlänge von annähernd quadratischen oder flächeninhaltsgleichen rechteckigen Kostenpfählen.

Bild 8: Zulässige Druckbelastung von Rammpfählen (aus DIN 4026)

Tabelle 2. Zulässige Belastung von Bohrpfählen
(Zwischenwerte sind geradlinig einzuschalten)

Bohrpfähle ohne Fuß	
Pfahldurchmesser d cm	zulässige Belastung kN ¹⁾
30	200
35	250
40	300
50	400

¹⁾ 1 kN ≈ 0,1 Mp

Bohrpfähle mit Fuß (Standpfähle)	
Fußdurchmesser cm	zulässige Belastung Pahl mit Fußverbreiterung kN ¹⁾
60	300
70	380
80	470
90	550
100	650

¹⁾ 1 kN ≈ 0,1 Mp

Bild 9: Zulässige Belastung von Bohrpfählen
(aus DIN 4014, Teil 1, Tab. 2)

Wir können also bei längeren Pfählen, als die DIN-Blätter voraussetzen, die zusätzliche Mantelreibung nicht ausnutzen. Daher ist es wünschenswert, wenn man Spitzendruck und Mantelreibung getrennt angibt, so daß man für längere Pfähle auch die größere Mantelreibungsfläche ausnutzen kann. Das ist also an den älteren Ausgaben der DIN-Blätter zu kritisieren. Wir möchten künftig davon abkommen. - Bei den Ramppfählen in der DIN 4026 ist es etwas besser, als bei den Bohrpfählen der DIN 4014, Teil 1. Sie finden dort Lastangaben für Holzpfähle, Stahlbetonpfähle und für Stahlpfähle mit offenen Profilen, sowie Rohr- und Kastenprofilen verschiedener Länge. Die dort angegebenen zulässigen Belastungen in Abhängigkeit von der Einbindetiefe der Pfähle sind trotzdem nicht befriedigend, denn wenn man länger einbindet als die DIN 4026 berücksichtigt, und das kommt ja nicht selten vor, dann würde man auch gerne die zusätzliche Mantelreibung ausnutzen.

Um das tun zu können wird in solchen Fällen gern zurückgegriffen auf die Tabelle von Schenck, der im Grundbautaschenbuch aus einer großen Zahl von Probelastungen an Ramppfählen Erfahrungsdaten für den Spitzendruck σ_{sf} und Mantelreibung τ_{mf} im Bruchzustand angegeben hat. Die Tabellenwerte gelten in Abhängigkeit von Pfahlart und -profil und der Einbindetiefe in eine Schicht und werden in Verbindung mit der Formel (6) verwendet (Bild 10).

Bodenart	Bereich unter OK, der tragfähigen Schicht ¹⁾ (m)	mittlere Mantelreibung (für abgewinkelten Umfang) τ_{mf} (kN/m ²)				Spitzendruck (umflossener Umfang des Pfahlfußes) σ_{sf} (kN/m ²)			
		Holz- pfähle	Stahl- beton- pfähle	Stahlrohr- pfähle Kasten- pfähle offen	I	Holz- pfähle	Stahl- beton- pfähle	Stahlrohr- pfähle J) Kasten- pfähle offen I)	I 2)
nichtbindige Böden	bis 5 5-10 > 10	20-45 40-65	20-45 40-65 60	20-35 35-55 50-75	20-30 30-50 40-75	2-3,5 3-7,5	2-5 3,5-6,5 4-8	1,5-4 3-6 3,5-7,5	1,5-3 2,5-5 3-6
bindige Böden mit I_c nach DIN 18 122	$I_c = 0,5-0,7$	5-20				-			
	$I_c = 0,75-1$	20-45				0-2			
Geschleibemergel halb(fest bis fest ²⁾)	bis 5 5-10 > 10		50-80 80-100	40-70 60-90 80-100	30-60 40-70 50-80		2-8 5-9 8-10	1,5-6 4-9 8-10	1,5-4 3-7,5 6-9

1) Für Kastenweiten oder Rohrdurchmesser ≤ 500 mm

2) Für Profilweiten < 350 mm; bei höheren Profilen Stege einschweißen

3) für Stahlkastenpfähle mit geschlossenem Fuß siehe Stahlbetonpfähle

4) für τ_{mf} ist das die Einbindetiefe t , für σ_{sf} die Rammtiefe in der tragfähigen Schicht (siehe DIN 4026)

5) Für norddeutschen Geschleibemergel kann i.d.R. die Konsistenzzahl I_c wegen zu hohem Überkorn-
anteils nicht mehr nach DIN 18 122 bestimmt werden und ist auf der Grundlage örtlicher Erfah-
rungen einzuschätzen.

Bild 10: Spitzendruck σ_{sf} und Mantelreibung τ_{mf} nach Erfahrungen aus Probelastungen für Ramppfähle (nach Schenck, Grundbautaschenbuch, Tabelle 2)

Wir wissen heute, daß Spitzendruck und Mantelreibung nur bis zu einer bestimmten Tiefe zunimmt, von einer bestimmten kritischen Tiefe an konstant bleibt. Ob das in den älteren DIN-Blättern berücksichtigt ist, würde auch der Nachprüfung bedürfen.

Eine andere Sache, die in den alten Normen nicht berücksichtigt wurde, ist, daß mit zunehmendem Durchmesser der zulässige Spitzendruck abnimmt, d.h. bei gleichem Spitzendruck werden die Setzungen mit zunehmendem Durchmesser größer. Die älteren Normen haben sich ja lediglich mit Durchmessern oder Profilweiten bis 0,5 m befaßt. Wir haben heute, besonders bei den Bohrpfählen, Durchmesser, die wesentlich größer sind, d.h. bei unseren neuen Normen müssen wir - soweit sie für kleine und große Durchmesser gelten sollen - die Durchmesserabhängigkeit des Spitzendruckes berücksichtigen.

Die folgende Formel (6a) wird zur Berechnung des Bruchzustandes (Index F) verwendet

$$\begin{aligned} Q_F &= Q_{sF} + Q_{rF} \\ &= \sigma_{sF} \cdot A_s + \tau_{mF} \cdot A_m \end{aligned} \quad (6a)$$

mit A_s = Pfahlfußfläche
 A_m = Pfahlmantelfläche
 σ_{sF} = Spitzendruck im Bruchzustand
 τ_{mF} = Mantelreibung im Bruchzustand

Die zulässige Belastung des Gebrauchszustandes erhält man dann mit η aus der Tabelle 8 der DIN 1054 (s.o.) zu

$$\text{zul. } Q = \frac{Q_F}{\eta} = \frac{Q_{sF}}{\eta} + \frac{Q_{rF}}{\eta} \quad (6b)$$

Bisher hat man in Formel (6b) auf die Pfahlfußkraft Q_{sF} und die Pfahlmantelkraft Q_{rF} die gleichen Sicherheitsbeiwerte η wie auf die gesamte Pfahlkraft Q_F angewendet. Das ist nun als ein kritischer Punkt erkannt worden und ich möchte als letztes einige Hinweise geben, wie wir damit verbundene Probleme im Rahmen der weiteren Normenarbeit behandeln wollen bzw. in der DIN 4014, Teil 2 bereits gelöst haben.

Bei Verwendung immer größerer Pfahldurchmesser ist man zu der Fragestellung gekommen, ob man nicht in Abweichung von Formel (6b) unterschiedliche Werte für die Sicherheit gegen Bruch am Fuß (η_s) und gegen Bruch am Mantel (η_r) verwenden muß.

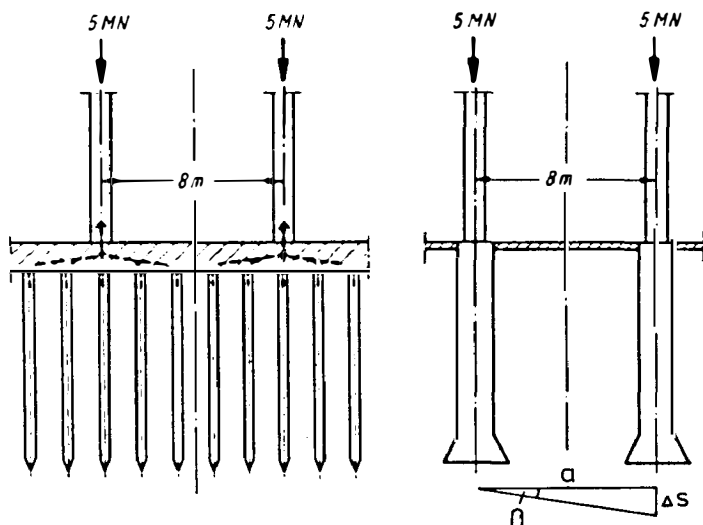


Bild 11: Vergleich Pfahlkopfplatte – Pfähle mit großem Durchmesser

Bild 11 verdeutlicht die Problematik. Früher wurden große Lasten oft über eine Pfahlkopfplatte in die Pfähle abgeleitet. Die Lasten wurden spazieren geführt. Mit der Entwicklung der großen Pfähle kann man diese Pfahlkopfplatte sparen und die Last direkt in den Baugrund ableiten. Die Winkelverzerrung, die im Bauwerk zulässig ist, ist durch den Winkel β dargestellt. Der Winkel β hängt zusammen mit den zulässigen Setzungsdifferenzen Δs und dem Pfahlabstand a . Die Setzungsdifferenz Δs , die mit einem bestimmten Winkel β verbunden werden darf, ist bei großem Abstand a zwischen den Pfählen natürlich viel größer als die Setzungsdifferenz bei den kleineren, in engerem Abstand stehenden Pfählen. In beiden Fällen gilt:

$$\Delta s = a \cdot \tan \beta \quad (7)$$

Diese Setzungsdifferenzen Δs lassen sich mit der Gesamtsetzung s nach den Formeln (4) in Verbindung bringen. Wir können also - und das ist die Konsequenz dieser Betrachtung - bei großen Pfählen mit großem Abstand viel größere Setzungen und Setzungsdifferenzen zulassen als bei den kleinen. Da gemäß Bild 2 die Arbeitslinien von Spitzendruck σ_s und Mantelreibung τ_m unterschiedlich verlaufen, erreicht τ_m den Bruchwert τ_{mF} bei Setzungen, bei denen σ_s bei weitem noch nicht ausgenutzt ist. Deshalb ist unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Arbeitslinien von Mantelreibung und Spitzendruck die Formel (6b) wie folgt zu schreiben:

$$\text{zul } Q = \frac{Q_F}{\eta} = \frac{Q_{sF}}{\eta_s} + \frac{Q_{rF}}{\eta_r} \quad (6c)$$

Wie schon früher in Verbindung mit den Formeln (2) und (3) angesprochen, muß man - um Großbohrpfähle wirtschaftlich einsetzen zu können - im Gebrauchszustand Setzungen von etwa 2 % des Pfahldurchmessers, d.h. bis über 4 cm zulassen. Da jedoch bei Setzungen von über 1 bis 2 cm i.a. bereits der Bruchwert der Mantelreibung τ_{mF} bzw. Q_{rF} in Formel (6b) erreicht wird, muß dort

$$\eta_r = 1 \text{ und } \eta_s > \eta \quad (8)$$

eingeführt werden, wenn die Einhaltung eines bestimmten η -Wertes z.B. nach Tabelle 8 der DIN 1054 (s.o.bzw. Formel 6 c) gefordert wird. η hängt dann von dem Verhältnis der Pfahlmantelkraft zu Pfahlfußkraft, d.h. von Q_{rF} / Q_{sF} und somit von der Pfahlgeometrie A_m / A_s jedes aktuellen Einzelfalles ab. Man müßte daher η_s als Funktion dieser Werte angeben, was Probleme aufwirft, die hier nicht im einzelnen erörtert werden können.

Um uns aus dem Dilemma zu retten, die Werte für die Sicherheit an Pfahlfuß in Abhängigkeit von η und A_m / A_s definieren zu müssen, sind wir in der DIN 4014, Teil 2 dann einen anderen Weg gegangen, den wir auch in der neuen DIN 4014 (für alle Bohrpfähle) beibehalten werden:

Wir geben den Pfahlspitzenndruck und die Mantelreibung in Abhängigkeit von den Setzungen an (siehe die Tabellen 1,2,3 und 4 sowie Bild 2, a und b, der DIN 4014, Teil 2 bzw. Bild 5, 6 und 7 dieses Beitrages).

Bei der Mantelreibung brauchen wir nur einen einzigen Wert, denn wir gehen davon aus, daß die Arbeitslinie der Mantelreibung einen bilinearen Verlauf hat. Wir brauchen also bei der Mantelreibung nur den Punkt der Grenzsetzung, bei welcher der Grenzwert der Mantelreibung erreicht wird. Bis zu diesem Punkt haben wir eine lineare Zunahme und dann bleibt die Reibung konstant. Diesen Wert der Grenzsetzung ist bei nichtbindigen Böden 2 cm, bei den bindigen Böden 1 cm. Beim Spitzendruck geben wir für die entsprechende Arbeitslinie die Abhängigkeit von den Setzungen bei 1 cm, 2 cm, 3 cm und 15 cm an. Wir können dann mit diesen Werten nach Bild 2 der DIN für jeden Einzelfall sozusagen eine künstliche Last - Setzungslinie ohne Probelastung ermitteln. Und wenn man diese Linie hat, dann braucht man wiederum nur den einen Wert η für die Gesamtlast, braucht also nicht die getrennten Werte η_r und η_s für die Sicherheit bei Spitzendruck und Mantelreibung. Wir können dann zu Q ausrechnen nach Formel (1) aus der Grenzlast, die wir definieren bei einer Setzung von 15 cm (bei Sand nach Bild 2a der DIN 4014, Teil 2).

In Zukunft werden wir stattdessen 10 % vom Durchmesser als Grenzsetzung in der neuen DIN 4014, die dann für alle Bohrpfähle und alle Böden gilt, definieren.

Im übrigen kann man mit Hilfe von Bild 2 der DIN 4014, Teil 2 noch nachsehen, ob die Verträglichkeit der mit zu Q nach Formel (1) verbundenen Setzungen mit dem Bauwerk in Ordnung ist. Nach den Formeln (4) kann man aus den zulässigen Setzungsdifferenzen eine zusätzliche Setzung errechnen und es kann nachgeschaut werden, ob die zulässige Belastung in Verbindung mit den zulässigen Setzungen in Ordnung ist. Man erfüllt auf diese Weise sowohl die Verträglichkeitsbedingungen als auch die Bedingung, hinreichend Abstand vom Bruch zu halten.

Das ist also die neue Entwicklung. Wir wollen das, was wir für Großbohrpfähle um 1970 angefangen und in der DIN 4014, Teil 2 realisiert haben, jetzt erweitern auf sämtliche Bohrpfähle und künftig auch auf Rammpfähle.

Schließlich soll nun die Verbindung zum Thema dieser Tagung durch folgende Diskussionsfrage hergestellt werden:

Nachdem sie gesehen haben, wie sorgfältig man Grenzlasten und Bruchlasten unterscheiden muß, wie man Grenzlasten nur in Verbindung mit Grenzsetzungen definieren kann, weil der echte Bruchzustand oft ohne Interesse ist, muß gefragt werden, wie die bei der Stoßprüfung ermittelte Pfahltragfähigkeit mit den Grenzsetzungen und den Grenzlasten unserer Formeln zusammenhängen. Diese Frage ist bis heute nicht ausreichend beantwortet worden.

Theoretische Grundlagen dynamischer Pfahltestverfahren

Dipl. – Ing. H. – G. Balthaus
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig

1. Einleitung

Dynamische Pfahltestverfahren sind Meßverfahren, die dynamische Vorgänge in Ramm- oder Ortbetonpfählen meßtechnisch erfassen und auf der Grundlage eines physikalisch-mathematischen Modells eine Auswertung im Hinblick auf die Tragfähigkeit oder die Unversehrtheit (Integrität) des untersuchten Pfahls ermöglichen.

Bei der Tragfähigkeitsprüfung wird der Pfahl durch einen Rammschlag dynamisch belastet, wobei der Pfahl große Längsverformungen ("High-strain"-Methode) und Verschiebungen erfährt. Der Rammschlag auf den Pfahlkopf löst den dynamischen Vorgang einer Wellenausbreitung im Pfahl aus. Am Pfahlmantel und an der Pfahlspitze werden dabei Bodenwiderstände geweckt, welche die Meßergebnisse beeinflussen.

Bei der Integritätsprüfung kann die dynamische Belastung am Pfahlkopf durch ein wenige Kilogramm schweres Fallgewicht oder einen Hammerschlag aufgebracht werden. Man spricht daher von einer "low-strain"-Messung.

Den bisher bekannten Pfahlprüfverfahren ist gemeinsam, daß sie sich die Grundgesetze der eindimensionalen Wellenausbreitung im Kontinuum zunutze machen. Auf diese theoretischen Grundlagen und die wesentlichsten darauf beruhenden Pfahltestverfahren soll im folgenden eingegangen werden.

2. Grundlagen des dynamischen Verhaltens von Pfählen

2.1 Allgemeines

Zur Rammung von Pfählen werden Freifall-, Dampf- und Dieselrymmgeräte eingesetzt. Allen Rammgeräten gemeinsam ist, daß eine durch die Erdanziehung oder zusätzlichen Dampf- oder Explosionsdruck beschleunigte Masse (Rambbär) auf die Pfahlhaube oder ein Schlagstück auftrifft. Gedämpft durch ein Rammfutter wird die kinetische Energie des Rambbären an den Pfahl übertragen. Mit dem Auftreffen des Rambbären ist ein mechanischer Spannungsanstieg im Pfahl verbunden, der sich als Stoßwellenfront vom Pfahlkopf aus abwärts bewegt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle wird durch das Pfahlmaterial und den Bodenwiderstand am Pfahlmantel bestimmt.

Während die Welle mit ihrem Spannungs- und Verformungsfeld im Pfahl hinabläuft, werden entlang dem Pfahlmantel Widerstände des Bodens geweckt. Diese Widerstände können von den drei Bewegungsgrößen Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung abhängen und daher zugleich von statischer und dynamischer Natur sein.

An der Pfahlspitze treten ebenfalls statische und dynamische Widerstände des Bodens auf, die bestimmen, wie die Welle an der Pfahlspitze reflektiert wird.

Im folgenden sollen die einzelnen Gesichtspunkte der Wellenausbreitung in Rammpfählen vorgestellt werden. Dazu ist es hilfreich, zunächst den mit den Grundlagen der eindimensionalen Wellentheorie beschreibbaren Vorgang der Wellenausbreitung im freien, nicht mit dem Boden verbundenen Pfahl zu betrachten (Abschnitt 2.2).

2.2 Die eindimensionale Wellengleichung am freien, elastischen Pfahl

2.2.1 Historischer Rückblick

Stöße zwischen schlanken, elastischen Körpern und die damit zusammenhängenden Wellenausbreitungsprobleme weckten bereits im vergangenen Jahrhundert das Interesse von Forschern (De Saint-Venant, 1867 und Neumann, 1885).

Ausführliche Darstellungen der Zusammenhänge der Wellenausbreitung in Stäben finden sich bei Timoshenko u. Goodier (1970) und Graff (1975). Hier können nur die wesentlichen Gesichtspunkte der Theorie vorgestellt werden.

2.2.2 Voraussetzungen und Annahmen

Für die folgenden Herleitungen sollen einige Annahmen und Konventionen gelten:

- Die Bewegungsgrößen Beschleunigung $a(x,t)$, Geschwindigkeit $v(x,t)$ und Verschiebung $u(x,t)$ werden nach unten positiv angenommen.
- Druckspannungen werden als positiv vereinbart.
- Der betrachtete Pfahl ist stabförmig, geradachsig, homogen, elastisch mit einem Elastizitätsmodul E und besitzt eine konstante Querschnittsfläche A .
- Die Spannungen $\sigma(x,t)$ sind konstant über dem Querschnitt.
- Die Querschnitte bleiben unter Belastung eben und parallel zueinander.
- Querschnittsänderungen des Pfahles bleiben ohne Einfluß auf die am Pfahlmantel wirkenden Kräfte.
- Trägheitskräfte sollen nur in Längsrichtung des Stabes wirksam werden.
- Eingeprägte Dehnungen, Verschiebungen und Geschwindigkeiten vor der Stoßbelastung sind nicht vorhanden.
- Die bei der Pfahlrammung auftretenden Beschleunigungen sind so groß, daß die Wirkung der Erdbeschleunigung vernachlässigt werden kann.

Die Forderung der Parallelität und Ebenheit der Querschnitte und Wellenfronten wird von genügend schlanken Pfählen erfüllt. Damit auch radiale

Trägheitswirkungen ohne Bedeutung auf die Wellenausbreitung bleiben, forderten Zukas et al. (1982) ein Verhältnis der Länge des Pfahles zu seinem Durchmesser von $l/d = 10$. Für Rammpfähle mit typischen Schlankheiten l/d von 20 bis 50 ist diese Bedingung erfüllt. Durch Rammfutter und Pfahlhaube wird eine gleichförmige Spannungsverteilung schon bei der Einleitung des Rammschlages in den Pfahlkopf erreicht. Treten durch möglicherweise doch vorhandene örtliche Spannungsspitzen gekrümmte Wellenfronten auf, so dürfen diese in Anlehnung an das Prinzip von St. Venant nach einem Ausbreitungsweg von etwa zwei Pfahldurchmessern als eben angesehen werden.

2.2.3 Die eindimensionale Wellengleichung

Unter den getroffenen Annahmen und Voraussetzungen kann für einen freien Pfahl mit konstantem Querschnitt aus dem dynamischen Kräftegleichgewicht eine homogene Differentialgleichung hergeleitet werden, welche die Wellenausbreitung im Pfahl beschreibt.

Bezeichnet u die Verschiebung, x die vom Pfahlkopf aus gemessene Ortskoordinate, E den Elastizitätsmodul und ρ die Dichte des Pfahlmaterials, so lautet diese als eindimensionale Wellengleichung bezeichnete Differentialgleichung (Timoshenko u. Goodier, 1970):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = - \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

Die in Gl. (1) eingeführte Größe

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der longitudinalen Stoßwelle im Stab (Timoshenko u. Goodier, 1970).

Die Wellengleichung (1) gilt nur für den freien Stab. Die Wirkung der Widerstände des Bodens am Pfahlmantel und an der Pfahlspitze wird unter 2.3 erläutert.

Aus dieser Darstellung wird auch deutlich, daß die Wellenausbreitung im Orts-Zeit-Diagramm (x-t-Diagramm) als Bewegung einer Störung entlang charakteristischer Linien verstanden werden kann, die gegenüber der Zeitachse um den positiven oder negativen Wert der Wellengeschwindigkeit geneigt sind.

Für den Vorgang der Pfahlrammung sind die Längskraft $F(x,t)$ im Pfahl und die Geschwindigkeit $v(x,t)$, mit der die Verschiebung $u(x,t)$ eines Pfahlpunktes stattfindet, von Bedeutung. Die Verschiebungsgeschwindigkeit darf nicht mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Stoßwelle verwechselt werden.

Aus Gl. (3) folgt:

$$v(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial t} = v_i + v_r = -c \frac{\partial f}{\partial x} + c \frac{\partial g}{\partial x} \quad (4)$$

und

$$F(x,t) = -EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = -EA \frac{\partial f}{\partial x} - EA \frac{\partial g}{\partial x} = F_i + F_r \quad (5)$$

Die Indizierungen in Gl. (4) und (5) haben folgende Bedeutung: Index i steht für einfallend (abwärts gerichtet, "inzident") und Index r für aufwärts gerichtet ("reflektiert"). Die Summation ab- und aufwärtsgerichteter Teilwellen der Geschwindigkeit und der Kraft ist möglich, da die Wellengleichung (1) linear ist und somit das Superpositionsgesetz gültig ist (Timoshenko u. Goodier, 1970).

Betrachtet man die jeweils zusammengehörigen Einzelanteile der Kraft und Geschwindigkeit in den Gl. (4) und (5), so ergibt sich:

$$v_i = -c \frac{\partial f}{\partial x} \quad \text{und} \quad F_i = -EA \frac{\partial f}{\partial x}$$

Zusammengefaßt gilt

$$F_i = \frac{EA}{c} \cdot v_i = Z \cdot v_i \quad (6)$$

sowie ebenso:

$$v_r = c \frac{\partial g}{\partial x} \quad \text{und} \quad F_r = -EA \frac{\partial g}{\partial x}$$

$$F_r = -\frac{EA}{c} \cdot v_r = -Z \cdot v_r \quad (7)$$

Der in den Gl. (6) und (7) errechnete Proportionalitätsfaktor

$$Z = \frac{EA}{c} = A \cdot \sqrt{E\rho} \quad (8)$$

wird als Impedanz des Querschnitts bezeichnet.

Durch Zusammenfassen der Gl. (6) und (7) gemäß Gl. (4) und (5) erhält man

$$F = Z (v_i - v_r) \quad \text{und} \quad v = \frac{1}{Z} (F_i - F_r) \quad (9)$$

und daraus wieder unter Berücksichtigung von Gl. (6) und (7)

$$F_i = \frac{F + Zv}{2} \quad \text{und} \quad F_r = \frac{F - Zv}{2} \quad (10)$$

Solange keine reflektierten Wellenanteile im Pfahl auftreten, kann aus Gl. (10) auf die Proportionalität von Kraft oder Spannung und Geschwindigkeit geschlossen werden (Timoshenko u. Goodier, 1970):

$$F = Zv \quad \text{oder} \quad \sigma = \frac{E}{c} \cdot v = \sqrt{E\rho} \cdot v \quad (11)$$

2.2.4 Einfluß von Querschnittsveränderungen

Änderungen der Querschnittsfläche und der Materialeigenschaften des Pfahles führen zu Impedanzwechselln (siehe Gl. 8). An einer Übergangsstelle zwischen Pfahlabschnitten unterschiedlicher Impedanz sind Übergangsbedingungen der Kraft und der Verschiebung zu erfüllen. Aus diesen Bedingungen lassen sich allgemeine Beziehungen für die Reflexion und Transmission von Spannungswellen an Impedanzwechselln ableiten.

Nach Gl. (9) lassen sich folgende Gleichungen formulieren:

$$F = F_{i1} + F_{r1} = F_{i2} + F_{r2} \quad (12)$$

$$v = (F_{i1} - F_{r1})/Z_1 = (F_{i2} - F_{r2})/Z_2 \quad (13)$$

Gl. (12) und (13) lassen sich als ein lineares Gleichungssystem für die unbekannten Kraftanteile F_{r1} und F_{i2} in der folgenden Form schreiben (Pain, 1976):

$$\begin{bmatrix} F_{r1} \\ F_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{i1} \\ F_{r2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Der erste Index der Koeffizienten a bezeichnet die Zielrichtung, der zweite die Ursprungsrichtung. Daher werden a_{11} und a_{22} als Reflexionsfaktoren und a_{12} und a_{21} als Transmissionsfaktoren bezeichnet. Sie ergeben sich aus den Gl. (12) bis (14) zu:

$$a_{11} = \frac{1 - z_1/z_2}{1 + z_1/z_2} \quad (15)$$

$$a_{12} = \frac{2 \cdot z_1/z_2}{1 + z_1/z_2} = 1 - a_{11} \quad (16)$$

$$a_{21} = -\frac{2}{1 + z_1/z_2} = 1 + a_{11} = 1 - a_{22} \quad (17)$$

$$a_{22} = \frac{z_1/z_2 - 1}{1 + z_1/z_2} = -a_{11} \quad (18)$$

In Bild 2 sind die Übergangsbedingungen und Laufrichtungen der einzelnen Wellenanteile dargestellt.

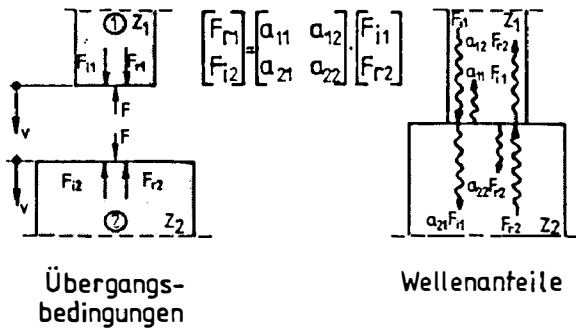


Bild 2: Übergangsbedingungen und Wellenanteile der Kraft F an einem Wechsel der Impedanz Z

Durch Einsetzen der Gl. (6) und (7) in Gl. (14) erhält man die folgende Übertragungsgleichung für die Geschwindigkeiten:

$$\begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{i1} \\ v_{r2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

in der gilt:

$$b_{11} = -a_{11} = a_{22} = \frac{z_1/z_2 - 1}{1 + z_1/z_2} \quad (20)$$

$$b_{12} = \frac{z_2}{z_1} a_{12} = a_{21} = \frac{2}{1 + z_1/z_2} \quad (21)$$

$$b_{21} = \frac{z_1}{z_2} a_{21} = a_{12} = \frac{2 \cdot z_1/z_2}{1 + z_1/z_2} \quad (22)$$

$$b_{22} = -a_{22} = a_{11} = \frac{1 - z_1/z_2}{1 + z_1/z_2} \quad (23)$$

Die Gl. (14) und (19) eignen sich auch zur Darstellung einiger Sonderfälle. Insbesondere gelten sie auch für die zwei Grenzbedingungen freies und vollkommen starres Pfahlende, wie im folgenden gezeigt wird.

Für das freie Pfahlende gilt $F_{r2} = 0$, $Z_2 = 0$ und $Z_1/Z_2 = \infty$. Die Gl. (14) und (19) können auf folgende Weise neu formuliert werden:

$$\begin{bmatrix} F_{r1} \\ F_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot F_{i1}$$

$$\begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \cdot v_{i1} \quad (24)$$

Aus Gl. (24) folgt, daß am freien Pfahlende die einfallende Kraft vollständig und mit Vorzeichenumkehr reflektiert wird. Die Geschwindigkeit in der Grenzfläche (v_{i2}) ist doppelt so groß wie der einfallende Anteil. Die vollständige Reflexion der Geschwindigkeit geht ohne Vorzeichenwechsel vonstatten.

Für ein starr gelagertes Pfahlende mit $F_{r2} = 0$, $Z_2 = \infty$ und $Z_1/Z_2 = 0$ folgt:

$$\begin{bmatrix} F_{r1} \\ F_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \cdot F_{i1}$$

$$\begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v_{i1}$$
(25)

Die Verhältnisse sind folglich genau der Situation am freien Ende entgegengesetzt. Die Kraft wird vorzeichengleich und vollständig mit einer Amplitudenverdoppelung in der Grenzfläche reflektiert. Die Geschwindigkeit kehrt ihr Vorzeichen um.

2.3 Wirkung des Bodens

2.3.1 Statische Wirkung

Wird ein im Boden einbindender Pfahl statisch belastet, so treten neben elastischen Stauchungen im Pfahl auch wiedergewinnbare und bleibende Relativverschiebungen zwischen dem Pfahl und dem umgebenden Boden auf. Relativverschiebungen u eines Punktes am Pfahlmantel oder an der Pfahlspitze gegenüber dem umgebenden Boden wecken Bodenwiderstände R ("Reaktion") an den betreffenden Stellen des Pfahles.

Formal ausgedrückt gilt:

$$R_{\text{stat}} = R_{\text{Mantel}} + R_{\text{Spitze}} = \text{fct} (u(x))$$
(26)

Die auftretenden Widerstände können von den Bodeneigenschaften, der Einbindetiefe, dem Spannungszustand im Boden, der Rauigkeit des Pfahlmantels, vom Pfahldurchmesser und von den Verschiebungen selbst abhängen.

Auch bei dynamischer Belastung während der Pfahlrammung erfährt ein Pfahl durch die Ausbreitung einer Welle belastungsabhängige (und zeitabhängige) Verschiebungen, die dem Widerstandsverhalten des Bodens am Pfahlmantel und an der Pfahlspitze gemäße Reaktionen wecken. Sie werden im dynamischen Belastungsfall als statischer Widerstandsanteil bezeichnet. Die zugehörigen Verschiebungen setzen sich aus einem wiedergewinnbaren, elastischen und einem bleibenden, plastischen Anteil zusammen.

2.3.2 Dynamische Wirkung

Eine durch den Rammschlag im Pfahl erzeugte Welle wird während ihrer Ausbreitung im Pfahl gedämpft.

Dämpfung tritt in einem rein elastischen Medium unendlicher Ausdehnung (elastischer Halbraum) durch Energieabstrahlung und bei Scher- und Verdichtungsvorgängen in Form dissipativer Dämpfung auf. Bild 3 veranschaulicht die im Pfahlmantel und am Pfahlfuß auftretenden Dämpfungsvorgänge.

Der Vorgang der Amplitudendämpfung einer sich im Pfahl ausbreitenden Welle kann auch durch die Weckung dynamischer Bodenwiderstände R_{dyn} erklärt werden.

Sie hängen definitionsgemäß nicht von der Verschiebung, sondern den Bewegungsgrößen Geschwindigkeit v und Beschleunigung a ab. Formal läßt sich für die zeitabhängige dynamische Bodenreaktion schreiben

$$R_{\text{dyn}}(t) = \text{fct}(v(x,t), a(x,t)) \quad (27)$$

Der Gesamtbodenwiderstand R_{ges} ergibt sich folglich als die Summe der jeweiligen Momentanwerte des statischen und des dynamischen Anteils:

$$R_{\text{ges}}(t) = R_{\text{stat}}(t) + R_{\text{dyn}}(t) \quad (28)$$

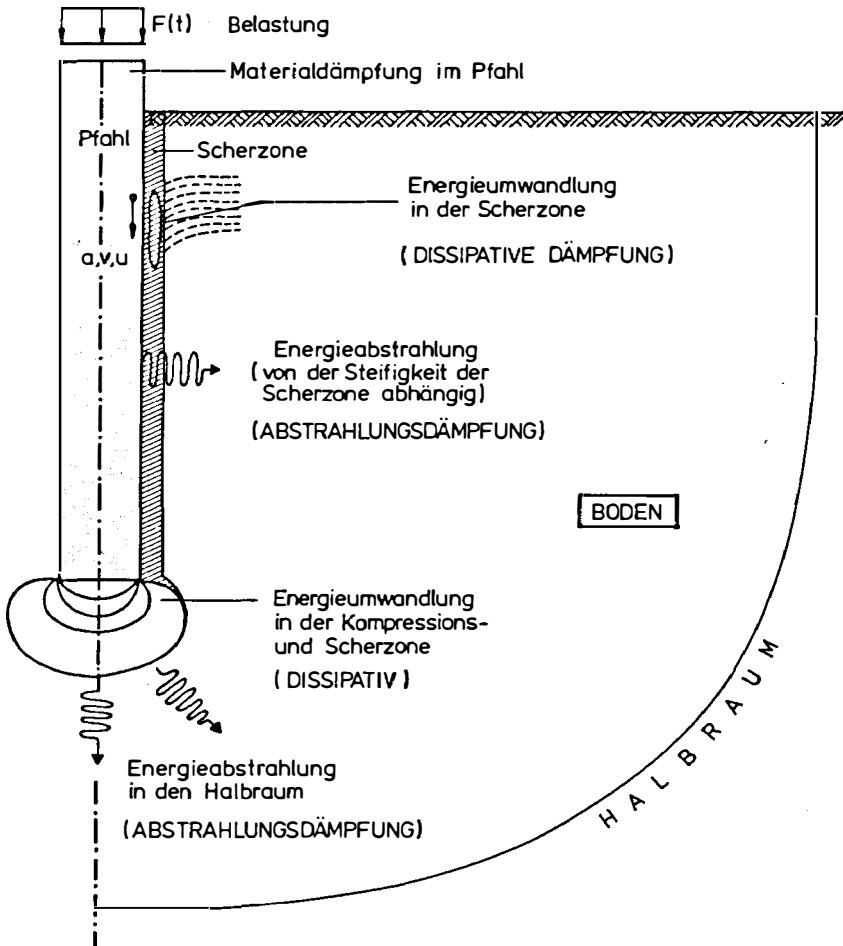


Bild 3: Schematische Darstellung der am Pfahl auftretenden Dämpfungsvorgänge

2.3.3 Rechnerische Modelle

Um pfahldynamische Meßergebnisse im Hinblick auf die Pfahltragfähigkeit auswerten zu können, müssen Annahmen über das Zusammenwirken von Pfahl und Boden entlang dem Pfahlmantel und an der Pfahlspitze getroffen werden. Es muß also die Abhängigkeit des Bodenwiderstandes von den Verschiebungs- und Bewegungsgrößen u , v und a mathematisch formuliert werden.

Dabei bedient man sich in der Regel einfacher physikalischer Modellvorstellungen, wie sie in Bild 4 zusammengefaßt dargestellt sind.

Der statische Bodenwiderstand wird durch ein bilinear elasto- plastisches Modell und der dynamische Widerstand durch geschwindigkeitsproportionale viskose Dämpfung beschrieben. Beschleunigungsabhängige dynamische Widerstände werden in der Regel nicht angesetzt. Zugkräfte am Pfahlfluß werden ausgeschlossen. Physikalisch kann man sich das beschriebene Widerstandsmodell als eine Parallelschaltung von Dämpferelementen und Feder-Reib-Elementen (Bild 4) vorstellen.

Der kontinuierlich verteilte Mantelwiderstand wird für Berechnungen diskretisiert, d.h. in einzelnen Punkten des Pfahles konzentriert zusammengefaßt. Wie sich ein diskretisierter Mantelwiderstand auf eine Wellenbewegung im Pfahl auswirkt, wird im folgenden gezeigt.

Die Wirkung eines einzelnen, am Pfahlmantel wirkenden Bodenwiderstandes R auf eine vorbeilaufende Welle läßt sich wie folgt beschreiben. Bezeichnet man mit 1 einen Schnitt oberhalb und mit 2 einen Schnitt unterhalb des Angriffspunktes des Bodenwiderstandes, so läßt sich mit Gl. (5) die Gleichgewichtsbedingung formulieren:

$$F_{i1} + F_{r1} - F_{i2} - F_{r2} - R \stackrel{!}{=} 0 \quad (29)$$

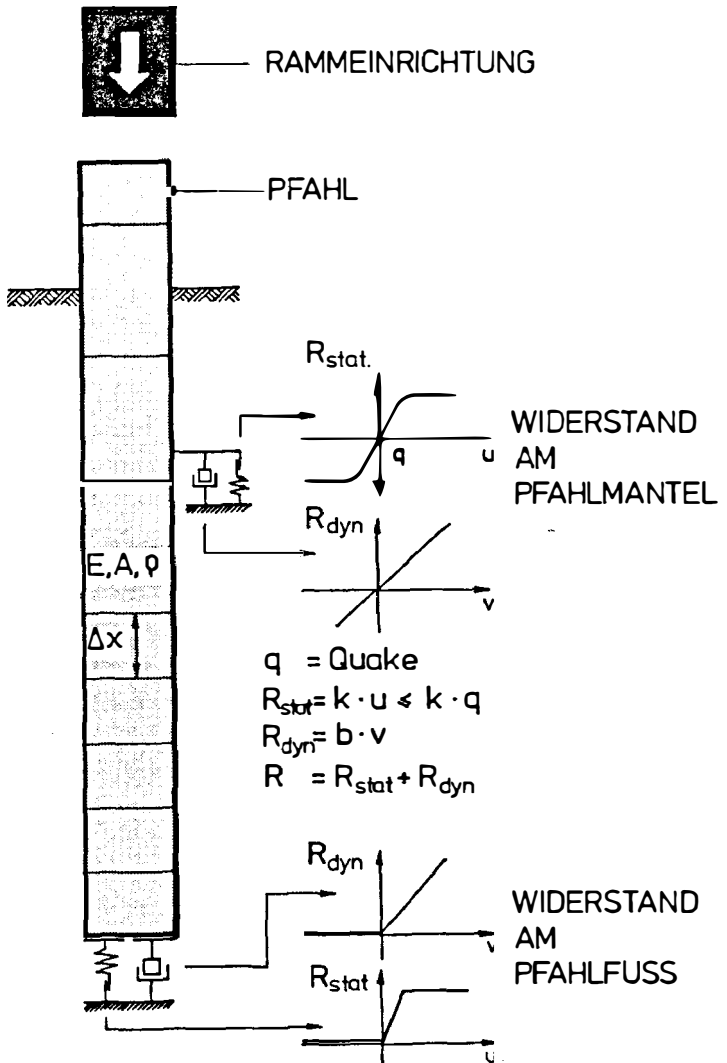


Bild 4: Mathematisch-physikalisches Modell des Bodenwiderstandes

Aus Gl. (9) folgt die Geschwindigkeit für den Pfahl mit konstanter Impedanz Z zu:

$$v = \frac{F_{i1} - F_{r1}}{Z} = \frac{F_{i2} - F_{r2}}{Z} \quad (30)$$

Daraus ergibt sich dann

$$\begin{aligned} F_{i1} &= Zv + F_{r1} \\ F_{i2} &= Zv + F_{r2} \end{aligned} \quad (31)$$

und Einsetzen von Gl. (31) in Gl. (30) liefert

$$F_{r1} = F_{r2} + \frac{R}{2} \quad (32)$$

und

$$F_{i2} = F_{i1} - \frac{R}{2} \quad (33)$$

Für die Geschwindigkeit des Angriffspunktes von F findet man aus Gl. (32) und (30):

$$v = \frac{F_{i1} - F_{r2} - R/2}{Z} \quad (34)$$

Anschaulich läßt sich das Ergebnis auf folgender Weise deuten:

Trifft eine im Pfahl aufwärts laufende Welle mit nach unten gerichteter Geschwindigkeit auf einen einzelnen Widerstand R am Pfahlmantel, so wird die Kraft um den Anteil $R/2$ vergrößert (Gl. 32). Für die abwärtslaufende Welle ergibt sich eine Verminderung der Kraft um $R/2$ (Gl. 33). Die Geschwindigkeit verringert sich um einen Anteil $R/2Z$ (Gl. 34).

Für den Sonderfall einer nur von oben einfallenden Welle ($F_{r2} = 0$) gilt:

$$F_{r1} = -\frac{R}{2} \quad (35)$$

$$F_{i2} = F_{i1} - \frac{R}{2} \quad (36)$$

$$v = \frac{F_{i1} - R/2}{Z} \quad (37)$$

3. Meßtechnische Verfahren zur Tragfähigkeitsbestimmung

3.1 Allgemeines

Da die genaue Vorausbestimmung des Tragverhaltens eines Rammpfahles eine nahezu unlösbare Aufgabe darstellt, liegt der Gedanke nahe, das Verhalten des Pfahles während der Rammung zu beobachten, meßtechnisch zu erfassen und aus den Beobachtungsergebnissen Rückschlüsse auf das dynamische Tragverhalten zu ziehen. Der Rammschlag auf den Pfahl wird dazu als eine "dynamische Probelastung" aufgefaßt. Ausgehend von der Annahme, daß in das dynamische Eindringverhalten die auf den Pfahl wirkenden statischen und dynamischen Bodenwiderstände am Pfahlmantel und an der Spitze eingehen, wird anschließend versucht, aus den Meßergebnissen während der Rammung den statischen und dynamischen Widerstandsanteil rechnerisch zu ermitteln und die statische Tragfähigkeit zu bestimmen.

Mit der raschen Entwicklung der Meßtechnik in den letzten zwei Jahrzehnten wurde es möglich, außer den bleibenden Setzungen pro Schlag auch Kraft- und Bewegungsgrößen während des Rammschlages als Funktion der Zeit aufzuzeichnen. Als besonders geeignet hat sich die Messung von Kraft und Beschleunigung in der Nähe des Pfahlkopfes erwiesen. Die Zeitverläufe dieser physikalischen Größen ergeben sich nicht allein aus den durch die Pfahlhaube und das Rammfutter gedämpften Einwirkungen des Rammbaren, sondern sie werden auch durch die geweckten Bodenwiderstände beeinflusst.

Legt man ein Rechenmodell für die Wellenausbreitung im Pfahl und Ansätze für die statischen und dynamischen Bodenwiderstände am Pfahlmantel und an der Spitze zugrunde, so kann aus den Meßergebnissen eine statische Tragfähigkeit des Rammpfahles errechnet werden. Solche kombinierten Meß- und Rechenverfahren haben gegenüber reinen Rechenverfahren und den Rammformeln den wesentlichen Vorteil, daß die tatsächlich in den Pfahl eingeleitete Rammenergie für die Auswertung des Eindringverhaltens und die Bestimmung der Tragfähigkeit herangezogen wird. Die kombinierten Verfahren sind daher für alle Rammverfahren einsetzbar und vermeiden die wenig vertrauenswürdige, rechnerische Simulation des Rammsystems.

Die Grundlagen der wichtigsten kombinierten Verfahren, des Case- und des CAPWAP-Verfahrens, werden im folgenden beschrieben. Die Anwendung dieser Methoden wird in weiteren Beiträgen zu dem vorliegenden Band behandelt.

Auf verwandte Verfahren und besondere Meßtechniken (TNO-Methode, Smoltczyk et al., 1978) kann aus Platzgründen nicht näher eingegangen werden.

3.2 Das Case-Verfahren

Ein einfaches, auf der Grundlage der eindimensionalen Wellengleichung (Gl.1) für schlanke Pfähle beruhendes Rechenverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen aus Messungen der Beschleunigungen und Kräfte am Pfahlkopf wurde 1975 von Coble et al. vorgestellt. Eine Diskussion und Bewertung des Verfahrens gaben außerdem Rausche et al. (1985). Auf die ausführliche Herleitung von Coble et al. wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Vielmehr soll das Verfahren auf anschauliche Weise abgeleitet werden. Dazu ist es hilfreich, die Darstellungen von Bild 5 zu betrachten.

Ein Pfahl der Länge L mit konstanter Impedanz Z und Wellengeschwindigkeit c werde zum Zeitpunkt $t = 0$ mit einer konstanten Last P beaufschlagt. Auf den Pfahl sollen zwei Bodenwiderstände einwirken: ein ideal-plastischer Mantelwiderstand R_i an der Stelle x_i vom Pfahlkopf aus

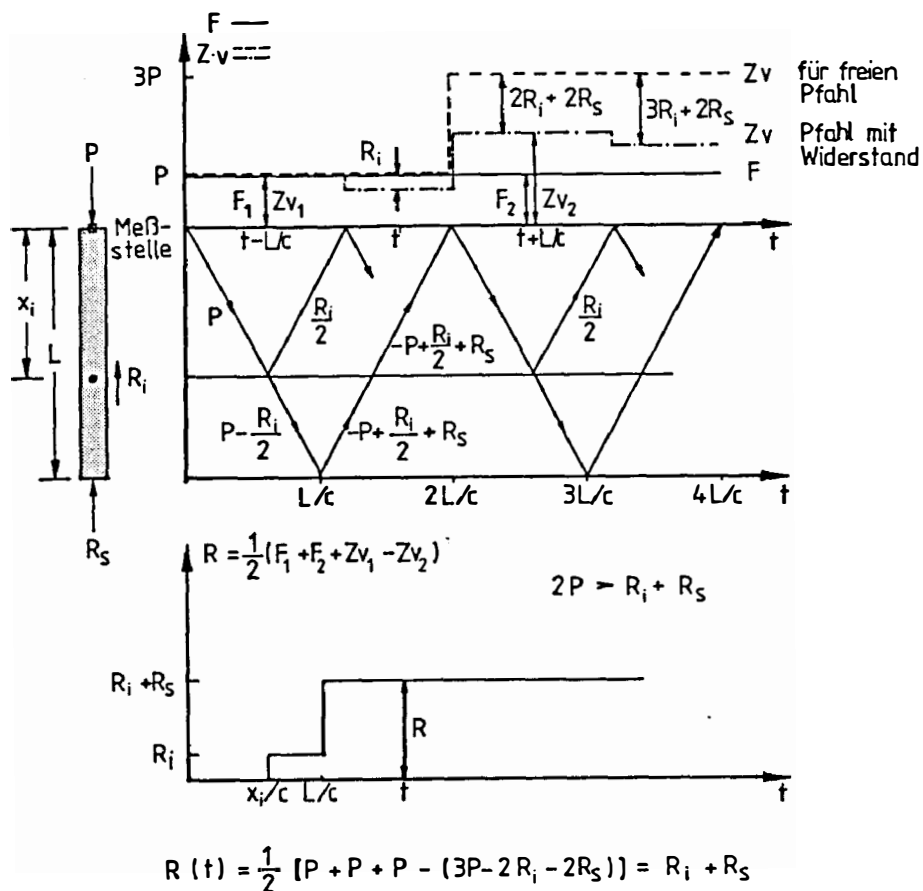


Bild 5: Verlauf von Kraft F , Geschwindigkeit v und mobilisiertem Widerstand R bei einem Pfahl mit Mantel- und Spitzenwiderstand unter konstanter Belastung P

gemessen und ein ideal- plastischer Spitzenwiderstand R_s . Die Last P sei größer als die Summe der beiden Widerstände. Trifft die im Pfahl nach unten laufende Wellenfront an der Stelle x_i auf den Mantelwiderstand R_i , so wird aus Gleichgewichtsgründen ein Anteil $R_i/2$ nach oben reflektiert und ein Anteil $P-R_i/2$ nach unten durchgelassen (Gl. 35 und 36).

Am Pfahlfuß gilt das Kräftegleichgewicht:

$$F_{si}(t) + F_{sr}(t) = R_s(t) \quad (38)$$

Darin ist $F_{si}(t)$ der um $R_i/2$ verminderte, am Pfahlkopf zur Zeit $t-L/c$ meßbare, einfallende Kraftanteil F_i .

Dann gilt:

$$F_{si}(t) = F_i(t-L/c) - \frac{R_i}{2} \quad (39)$$

$F_{sr}(t)$ bewegt sich ungestört zum Pfahlkopf und ist dort um $\Delta t = L/c$ später feststellbar. Der meßbare Anteil F_r am Pfahlkopf ist jedoch zu diesem Zeitpunkt bereits durch die zuvor eingetroffene Reflexion $R_i/2$ vom Mantelwiderstand vergrößert worden. Daher muß gelten:

$$F_{sr}(t) = F_r(t+L/c) - \frac{R_i}{2} \quad (40)$$

Setzt man Gl. (39) und (40) in Gl. (38) ein, so folgt:

$$R_s(t) + R_i = F_i(t-L/c) + F_r(t+L/c) \quad (41)$$

Drückt man F_i und F_r wie in Gl. (10) aus, so ergibt sich:

$$R(t) = R_s(t) + R_1 = \frac{1}{2} [F(t-L/c) + F(t+L/c) + Zv(t-L/c) - Zv(t+L/c)] \quad (42)$$

oder
$$R(t) = \frac{1}{2} [F_1 + F_2 + Zv_1 - Zv_2]$$

mit
$$t_2 = t_1 + \frac{2L}{c} \quad (43)$$

Gl. (42) ist die Grundgleichung des Case-Verfahrens (Goble et al., 1975). In der Herleitung fällt auf, daß der Mantelwiderstand R_i unabhängig von der Zeit betrachtet wurde. Tatsächlich tritt er zur Zeit $t = x_i/c$ zum ersten Mal auf, während der Spitzenwiderstand erst ab $t = L/c$ wirkt.

Die an verschiedenen Orten wirkenden Bodenwiderstände sind also auch nur zu verschiedenen Zeiten am Pfahlkopf meßbar. In der Herleitung wurde daher von einer Pfahlbelastung mit ausreichender Höhe und Dauer ausgegangen, die wesentliche Voraussetzung für das Case-Verfahren ist. Nur dann dürfen die an verschiedenen Orten wirkenden Widerstände wie in Gl. (42) addiert werden. Neben den am Pfahlkopf meßbaren Kraft- und Geschwindigkeitsverläufen und dem Wellenlaufdiagramm ist in Bild 5 auch die Auswertung von Gl. (42) gezeigt und an einem Beispiel erläutert.

Die Herleitung von Gl. (42) läßt sich auch auf eine Folge von verteilten Mantelwiderständen R_i ($1 \leq i \leq N$) ausdehnen, wenn zusätzlich zu den getroffenen Annahmen die gegenseitige Unabhängigkeit der einzelnen Widerstände vorausgesetzt wird. Wesentlich ist auch hier wieder die dauerhafte Wirkung aller Widerstände über einen ausreichend langen Zeitraum. In Gl. (42) wird R_i dann durch die Summe aller Mantelwiderstände ersetzt.

Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde in der Herleitung die Messung der Kräfte und Geschwindigkeiten am Pfahlkopf vorausgesetzt. Ohne Nachweis sei hier festgestellt, daß die Gedankengänge sich auf eine Meßstelle unterhalb des Pfahlkopfes übertragen lassen. Der Abstand dieser Meßstelle zum Pfahlfuß wird dann mit L bezeichnet. Gl. (42) gilt unverändert.

Die auch in der ursprünglichen Herleitung von Goble getroffene Annahme ideal-plastischer Bodenwiderstände ist nicht zwingend. Bedingung für die Gültigkeit der Herleitung ist, daß die aufgebrachte Last ausreichende Pfahlverschiebungen auslöst, die die Bodenwiderstände am Pfahlmantel und an der Spitze in einen plastischen Grenzzustand bringen.

Der Gesamtbodenwiderstand $R(t)$ in Gl. (42) wird als die Summe eines statischen und eines dynamischen Anteils aufgefaßt:

$$R(t) = R_{\text{stat}}(t) + R_{\text{dyn}}(t) \quad (44)$$

Ist man nun in der Lage, den dynamischen Widerstandsanteil R_{dyn} zu berechnen, so läßt sich Gl. (42) zur Berechnung der statischen Tragfähigkeit eines Rammpfahles einsetzen, wenn man während der Rammung die Zeitverläufe von Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf mißt und anschließend zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 gemäß Gl. (42) auswertet.

Zur Bestimmung des dynamischen Widerstandes müssen zwei weitere Annahmen getroffen werden. Der dynamische Widerstand wird an der Pfahlspitze konzentriert angenommen und als linear viskos, also geschwindigkeitsproportional aufgefaßt. Von Rausche et al. (1985) wurden diese Annahmen mit der Erfahrung aus zahlreichen Vergleichsberechnungen begründet.

Mit einer viskosen Dämpfungskonstanten J und der Pfahlfußgeschwindigkeit v_s folgt

$$R_{\text{dyn}} = J \cdot v_s = j_c \cdot Z \cdot v_s \quad (45)$$

Darin ist j_c der sogenannte Case-Dämpfungsfaktor.

Unter Berücksichtigung der aufwärtswandernden Wellenanteile aus der Wirkung der Mantelwiderstände läßt sich nach Rausche et al. (1985) die Geschwindigkeit für einen freien Pfahlfuß zu

$$v_s(t) = \frac{1}{2} F(t-L/c) + v(t-L/c) \quad (46)$$

errechnen.

Der Einfluß der am Widerstand R_i entstandenen, abwärts gerichteten Teilwelle auf die Fußgeschwindigkeit läßt sich wie folgt ausdrücken:

$$v_{s,i}(t) = - \frac{1}{2} R_i \quad (47)$$

Faßt man alle Geschwindigkeitsanteile nach Gl. (47) zusammen und erweitert Gl. (46) um diese Summe, so folgt

$$v_s(t+L/c) = v(t) + \frac{1}{2} [F(t) - R(t)] \quad (48)$$

Mit dieser Fußgeschwindigkeit läßt sich der dynamische Widerstand nach Gl. (45) errechnen und der statische Widerstand, der als statische Tragfähigkeit des Pfahles aufgefaßt wird, bestimmen:

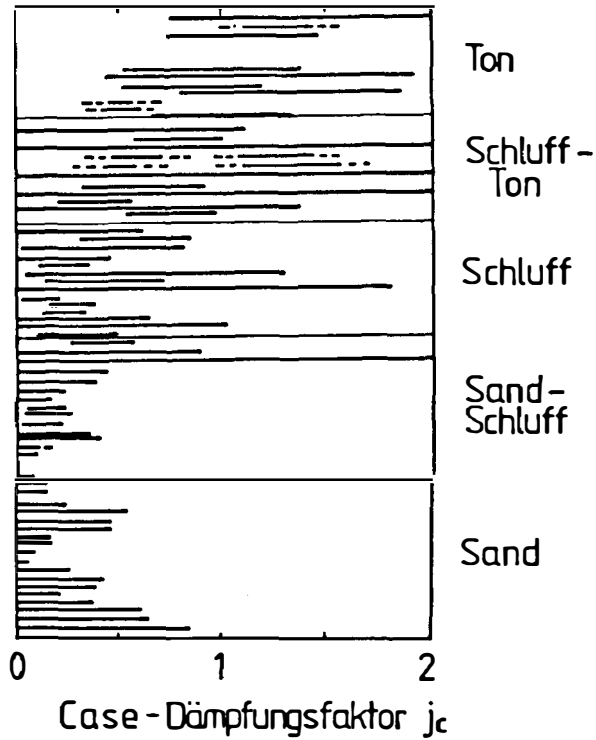
$$R_{stat}(t) = R(t) - R_{dyn}(t) \quad (49)$$

$$R_{stat}(t) = R(t) - j_c \cdot 2 \left[v(t) + \frac{1}{2} \{F(t) - R(t)\} \right]$$

In dieser Gleichung soll der Zeitpunkt t bei den Widerständen andeuten, daß sich für verschiedene Auswertzeitpunkte unterschiedliche Widerstände errechnen lassen. Als maßgeblicher statischer Widerstand wird der Maximalwert von $R_{stat}(t)$ im Meßzeitraum aufgefaßt.

Der Case-Dämpfungsfaktor j_c kann durch Vergleich der Ergebnisse von statischen Probelastungen und rambbegleitenden Messungen mit anschließender Case-Auswertung bestimmt werden. Diese Art der Festlegung des Dämpfungsfaktors entspricht einer Kalibrierung des Verfahrens mit Hilfe von statischen Vergleichsmessungen. Auf der Grundlage einer Vielzahl von solchen Kalibrierungen wurden von Goble et al. (1975) auf empirischem Wege Case-Dämpfungsfaktoren für verschiedene Böden gewonnen. Zur Bestimmung der statischen Grenztragfähigkeit wurde das Kriterium nach Davisson (siehe Peck et al., 1974) verwendet.

Empirisch ermittelte und empfohlene Case-Dämpfungsfaktoren sind in Bild 6 angegeben. Zu beachten sind die erheblichen Streubreiten selbst für Sand. Es wurden Werte zwischen 0 und 0,9 gefunden.



Bodenart	empfohlener Bereich für j_c
Sand	0,05 - 0,20
Sand und Schluff	0,15 - 0,30
Schluff	0,20 - 0,45
Schluff und Ton	0,40 - 0,70
Ton	0,60 - 1,10

Bild 6: Durch Kalibrierung an statischen Probelastungen gewonnene Case-Dämpfungsfaktoren j_c und empfohlene Werte für verschiedene Bodenarten (nach Rausche et al., 1985)

3.3 Das CAPWAP-Verfahren

Das sogenannte CAPWAP-Verfahren (Case Pile Wave Analysis Programm) wurde Anfang der 70er Jahre entwickelt und von Goble et al. (1975) vorgestellt.

Ähnlich wie das bereits erläuterte Case-Verfahren benutzt es am Pfahlkopf gemessene Zeitverläufe der Kraft und Geschwindigkeit und berechnet nach der eindimensionalen Wellentheorie auf der Grundlage geschätzter Kennwerte für den Bodenwiderstand das dynamische Verhalten des Pfahles unter einem Rammschlag.

Für die Wellenausbreitung im Pfahl wird in der Regel ein diskretes numerisches Modell zugrundegelegt. Für den Bodenwiderstand werden vereinfachende Annahmen getroffen. Der statische Widerstandsanteil wird meist durch ein bilinear elastoplastisches Modell und der dynamische Widerstand durch einen linear viskosen Ansatz dargestellt (vgl. Bild 4). Der Widerstand am Pfahlmantel wird nach Abschnitt 2.3.3 diskretisiert. Die Parameter für den Bodenwiderstand werden zunächst geschätzt oder aus Meß- oder Erfahrungswerten ermittelt.

Auf das so vereinfachte und diskretisierte Pfahl-Boden-System wird der am Pfahlkopf gemessene Geschwindigkeits-Zeitverlauf als äußere Belastung aufgebracht. Die Wellenausbreitung im Pfahl und die Einflüsse der Bodenwiderstände und Reflexionen werden rechnerisch nachvollzogen und der Kraft-Zeitverlauf am Pfahlkopf wird ermittelt. Er ist von den gewählten Bodenkennwerten abhängig und kann mit dem gemessenen Kraftverlauf verglichen werden. Stimmen die beiden Verläufe nicht miteinander überein, so werden die gewählten Bodeneigenschaften und ihre Verteilung iterativ solange angepaßt, bis eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielt worden ist. Nach Goble et al. (1975) sind die so ermittelbaren Bodenkennwerte für das statische und dynamische Verhalten des untersuchten Pfahles repräsentativ. Das CAPWAP-Verfahren ist schematisch in Bild 7 dargestellt.

Die statischen Bodenwiderstandswerte können als Grundlage für eine anschließende Berechnung der Last-Setzungslinie des Pfahles dienen.

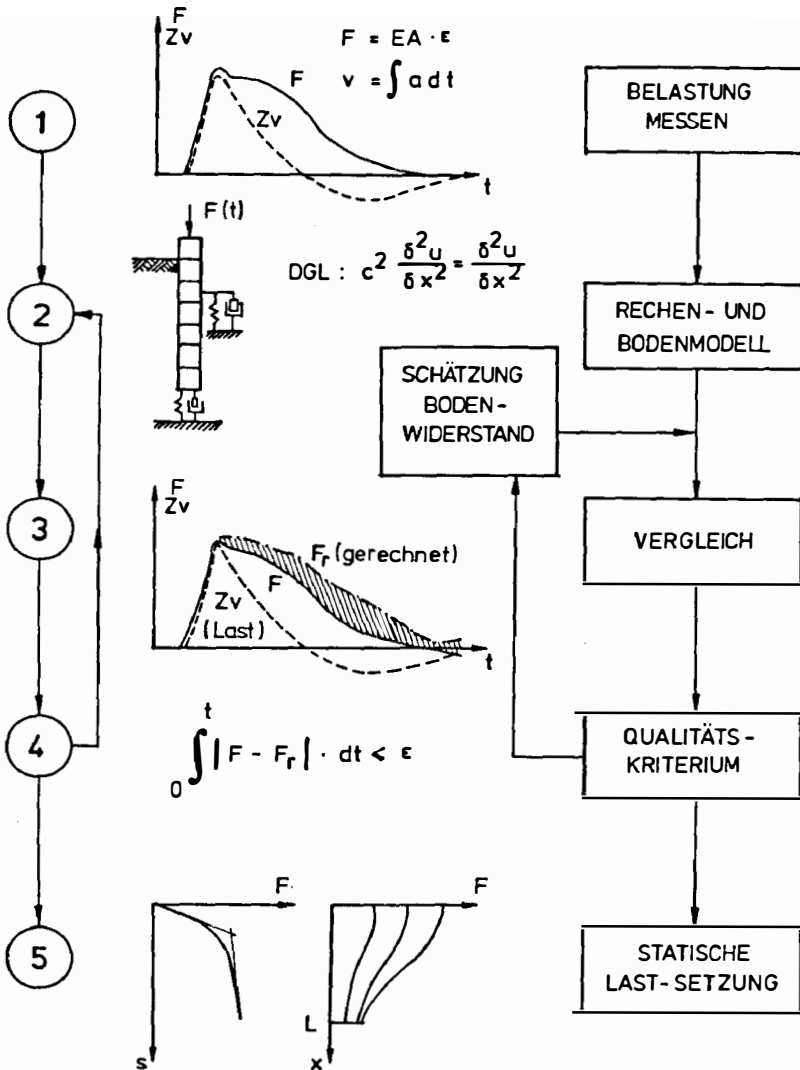


Bild 7: Ablauf des CAPWAP-Verfahrens

Der dynamische Berechnungsvorgang kann umgekehrt werden, indem die am Pfahlkopf gemessene Kraft als Belastung angesetzt wird und die Anpassung über einen Vergleich von gemessener und gerechneter Geschwindigkeit erfolgt ("WAPCAP").

4. Grundlagen der Integritätsprüfung

Für die Integritätsprüfung nach dem Low-Strain-Verfahren wird während eines leichten Prüfschlages auf den Pfahlkopf eine einkanalige Beschleunigungsmessung durchgeführt. Die Meßergebnisse werden analog oder numerisch zu einem Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf integriert und stehen in dieser Form zur Interpretation zur Verfügung.

Auf Einzelheiten des Meßverfahrens, die Auswertung von Meßergebnissen und die Anwendungsmöglichkeiten wird in einem weiteren Beitrag zum vorliegenden Band ausführlich eingegangen. Hier sollen nur in Kürze die theoretischen Grundlagen dargestellt werden.

Unter 2.2.4 wurden bereits die Reflexionsgesetze bei Querschnittsveränderungen und Impedanzwechseln hergeleitet (Gl. 14 bis 23).

An einem Punkt des Pfahles, an dem sich die Impedanz ändert, wird die einfallende Welle (v_{i1}) in einen transmittierten (v_{i2}) und einen reflektierten Anteil (v_{r1}) aufgespalten (Bild 8). Führt man einen Reflexionsfaktor

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (50)$$

($r = b_{11}$ nach Gl. 20) und einen Transmissionsfaktor

$$t = 1 + r \quad (51)$$

($t = b_{21}$ nach Gl. 22) ein, so lassen sich die Geschwindigkeiten des reflektierten und des durchgelassenen Wellenanteils aus Gl. (19) zu

$$\begin{aligned} \text{und} \quad v_{r1} &= r \cdot v_{i1} \\ v_{i2} &= t \cdot v_{i1} \end{aligned} \quad (52)$$

berechnen.

Bild 8 faßt die Gesetzmäßigkeiten zusammen und gibt einen Überblick über die Reflexionsverhältnisse an verschiedenen Querschnittsübergängen und am Pfahlfuß.

Durch Messung der Geschwindigkeit am Pfahlkopf können auf der Grundlage der beschriebenen Reflexionsgesetze die Länge des Pfahles und die Lage von Fehlstellen bestimmt werden.

Vernachlässigt man die im Pfahl und entlang des Pfahlmantels auftretenden Dämpfungserscheinungen, so lassen sich Rückschlüsse von dem am Pfahlkopf meßbaren Geschwindigkeitsamplituden auf die Größenordnung vorhandener Querschnittsveränderungen ziehen.

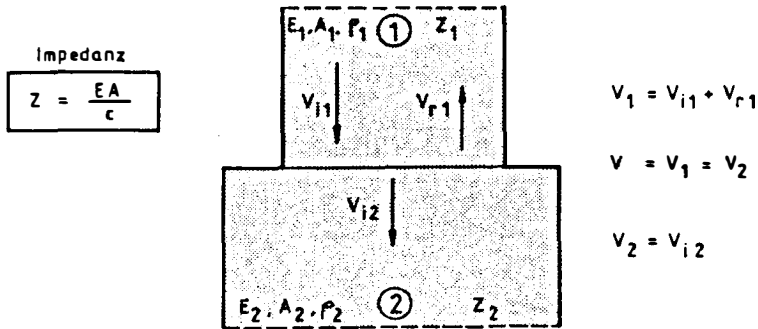
Dazu bestimmt man aus den gemessenen Geschwindigkeitsamplituden den Reflexionsfaktor r und nutzt die Beziehung

$$Z_2 = \frac{1-r}{1+r} Z_1 \quad (53)$$

zur Berechnung der Impedanz Z_2 unterhalb der Querschnittsveränderung.

Anhand eines Beispiels sollen die theoretischen Grundlagen der Integritätsprüfung und der Meßwertinterpretation veranschaulicht werden.

Gegeben sei ein 20 m langer, freier Pfahl, dessen obere 6 m (Bereich 1) einen halb so großen Querschnitt besitzen wie die restlichen 14 m (Bereich 2). Die Materialeigenschaften sind in beiden Bereichen gleich. Damit ist die Impedanz im Bereich 2 doppelt so groß wie im Bereich 1. Die beim Aufbringen einer dreiecksförmigen Stoßwelle im Pfahl ablaufenden Reflexions- und Transmissionsvorgänge sind im Bild 9 in einem Weg-Zeit-Diagramm veranschaulicht und mit dem unter den angenommenen Bedingungen entstehenden Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf am Pfahlkopf in zeitliche Beziehung gesetzt worden. Außerdem ist in dem Bild gezeigt worden, wie das Meßergebnis der Geschwindigkeiten für eine Bestimmung der Größe des Querschnittssprunges genutzt werden kann.



Reflexionsfaktor

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Transmissionsfaktor

$$t = 1 + r$$

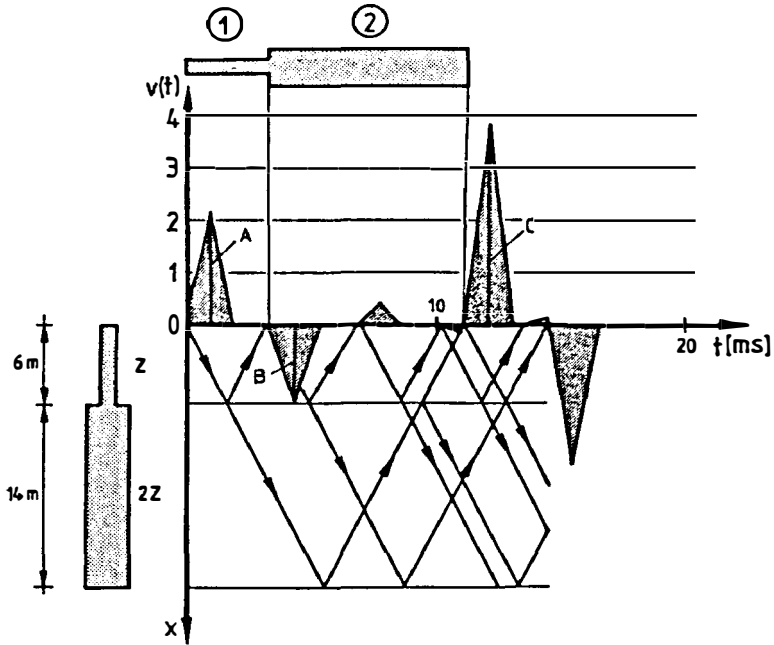
$$V_{r1} = r \cdot V_{i1}$$

$$V_{i2} = t \cdot V_{i1}$$

$$Z_2 = \frac{1-r}{1+r} Z_1$$

Impedanzen	Bemerkung	r	t	$\frac{1-r}{1+r}$
$Z_1 = Z_2$	keine Querschnittsveränderung, keine Reflexion	0	1	1
$Z_1 < Z_2$	Verdickung, Zunahme der Steifigkeit	$r < 0$	$t < 1$	> 1
$Z_1 > Z_2$	Verjüngung, Abnahme der Steifigkeit	$r > 0$	$t > 1$	< 1
$Z_2 = 0$	freier Pfahlfuß	1	0	0
$Z_2 = \infty$	starrer Pfahlfuß	-1	0	∞

Bild 8: Gesetzmäßigkeiten der Reflexion und Transmission an einem Impedanzwechsel



$$A \cong 2,2$$

$$r = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} = \frac{-z_1}{3 \cdot z_1} = -\frac{1}{3}$$

$$t = 1 + r = \frac{2}{3}$$

$$s = \frac{1 - r}{1 + r} = 2 = \frac{z_2}{z_1}$$

$$B \cong -2 \cdot r \cdot A = -1,5 = -0,67 \text{ A}$$

$$r' = -r = \frac{1}{3}$$

$$t' = 1 + r' = \frac{4}{3}$$

$$s' = \frac{1 - r'}{1 + r'} = \frac{1}{2}$$

$$C \cong 2 \cdot A \cdot t \cdot t' = 3,9 = 1,78 \text{ A}$$

Bild 9: Auswertung des Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufs für einen freien Pfahl mit einfachem Querschnittswechsel

Literatur

de Saint-Venant, B. (1867):

Mémoire sur le choc longitudinal de deux barres élastiques
J. de Mathématiques, 2. ser. XII, S. 237-376

Goble, G.G., Likins, G. u. Rausche, F. (1975):

Bearing capacity of piles from dynamic measurements, Final report, Case Western Reserve University, prepared for: Ohio Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Dept. of Civil Engineering

Graff, K.F. (1975):

Wave motion in elastic solids, Clarendon Press, Oxford

Neumann, F. (1885):

Vorlesungen über die Theorie der Elastizität, Kap. 20, gehalten 1857/58, Leipzig

Pain, H.J. (1976):

The physics of vibrations and waves, John Wiley & Sons, London

Peck, R.B., Hanson, W.E., u. Thornburn, T.H. (1974):

Foundation Engineering, 2nd Edition, John Wiley & Sons, London

Rausche, F., Goble, G.G. u. Likins, G.E. (1985):

Dynamic determination of pile capacity Proc. ASCE, JGED, Vol. 111, GT3, März, S. 367-383

Smoltczyk, U., van Koten, H. u. Hilmer, K. (1978)

Dynamische Untersuchung von Pfählen, Baumaschine und Bautechnik, 25, Nr. 2, Febr., S. 65-71

Timoshenko, S.P. u. Goodier, J.N. (1970)

Theory of elasticity, 3. Aufl., McGraw-Hill, New York

Zukas, J.A., Nicholas, T., Swift, H.F., Greszquk, L.B. u.

CURRAN, D.R. (1982): Impact dynamics, John Wiley & Sons, London

Einsatz von Wellengleichungsprogrammen zur Vorausbestimmung der Rammbarkeit und Tragfähigkeit von Pfählen

**Akad. Rat Dipl. — Ing. H. Meseck
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig**

1. Einleitung

Die statische Tragfähigkeit von Rammpfählen kann aus ihrem dynamischen Eindringverhalten abgeschätzt werden. Die hierfür i.a. verwendeten Rammformeln gehen zurück bis auf EYTELWAIN im Jahre 1820 (KRAPP 1906). Bis heute wurden mehr als fünfzig Rammformeln entwickelt, die das komplexe System von Rammbar, Pfahl und Boden mit mehr oder weniger pauschalen Ansätzen erfassen. Wegen der großen Vereinfachungen schwanken die zu berücksichtigenden Sicherheitsfaktoren zwischen $\eta = 1$ und $\eta = 6$ (KÜMMEL 1981). Aufgrund dieser Mängel können Rammformeln nicht zur Vorausbestimmung der absoluten Tragfähigkeit von Rammpfählen verwendet werden. Nur wenn die Rammformeln an einer statischen Probelastung geeicht werden, können sie zur Abschätzung der Tragfähigkeit von Rammpfählen auf einer Baustelle eingesetzt werden. Geeichte Rammformeln werden seit langem erfolgreich zur Baustellenüberwachung verwendet.

Eine wesentliche Weiterentwicklung wurde möglich, als SMITH im Jahre 1950 ein numerisches Rechenverfahren vorstellte, mit dessen Hilfe die

Differentialgleichung der sich in einem Stab fortpflanzenden Druckwelle auch bei komplizierten Randbedingungen gelöst werden konnte. Für die Anwendung seines Rechenverfahrens auf das Problem der Rammpfähle entwickelte SMITH ein diskretes Pfahlmodell (SMITH 1960). Dieses Modell erfaßt die komplexen Eigenschaften des Rammbären, des Pfahls und des Bodens. Ähnlich wie mit einer Rammformel erhält man auch mit diesem Verfahren eine Tragfähigkeitskurve.

Ausgehend von dem Smith'schen Pfahlmodell wurden vor allem in den USA verschiedene Computerprogramme zur Lösung der Wellengleichung aufgestellt. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich im wesentlichen durch die Beschreibung der für die Simulierung des Rammvorganges notwendigen Bär- und Pfahlparameter. Am bekanntesten sind heute das WEAP- und das TTI-Programm (LOWERY/HIRSCH/EDWARDS 1969, RAUSCHE 1970).

Das WEAP-Programm (Wave equation analysis of pile driving) ist seit 1981 auch am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig vorhanden. In diesem Beitrag soll über die Anwendungsmöglichkeiten und Erfahrungen mit diesem Rechenprogramm berichtet werden.

2. Das Modell von SMITH

Theoretische Grundlagen der Überlegungen von SMITH Ist die Differentialgleichung für die eindimensionale Wellenausbreitung von St. Venant. Erweitert man diese Differentialgleichung durch den Bodeneinfluß, so kann sie analytisch nicht mehr gelöst werden. Um diese Differentialgleichung auf ein lösbares System von Differenzengleichungen zurückzuführen, entwickelte SMITH ein diskretes Pfahlmodell (Bild 1).

Der kontinuierliche Pfahl wird dabei aufgelöst in Massenpunkte, die entsprechend der Steifigkeit des Pfahls durch Federn miteinander gekoppelt sind. Die inneren Dämpfungskräfte des Pfahls sind in der Regel vernachlässigbar klein, können aber mühelos berücksichtigt werden. Die Reaktion des Bodens wird durch parallel geschaltete Federn und Dämpfer

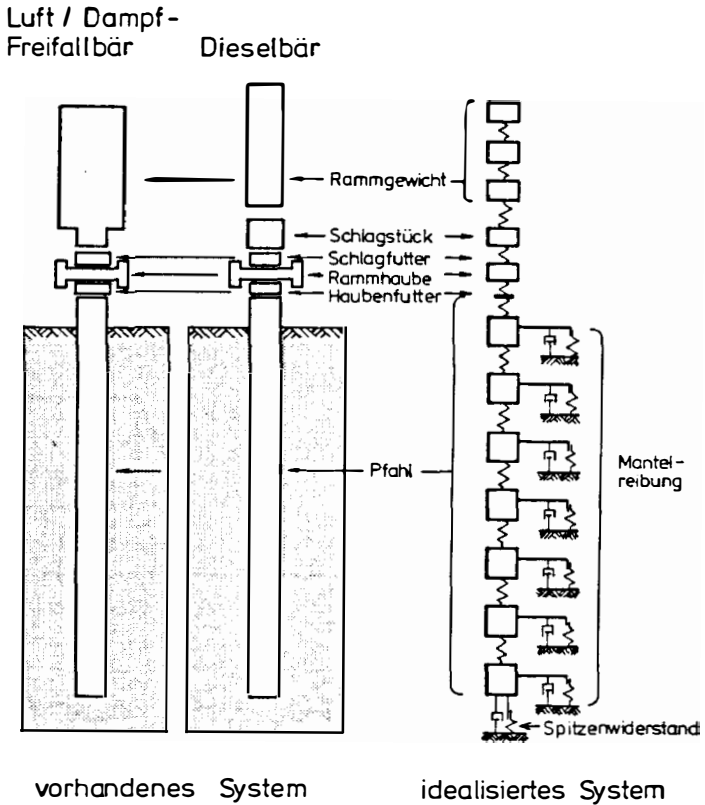


Bild 1: Diskretes Pfahlmodell von SMITH

erfaßt, die an den Massenpunkten angreifen (Bild 2). Über eine Grenztragfähigkeit der Federn hinaus kann keine weitere Kraft aufgenommen werden (bilineares Federgesetz). Die elastische Grenzverformung q wird als quake bezeichnet. Der lineare Dämpfer erzeugt eine der Pfahlelementsgeschwindigkeit proportionale Widerstandskraft.

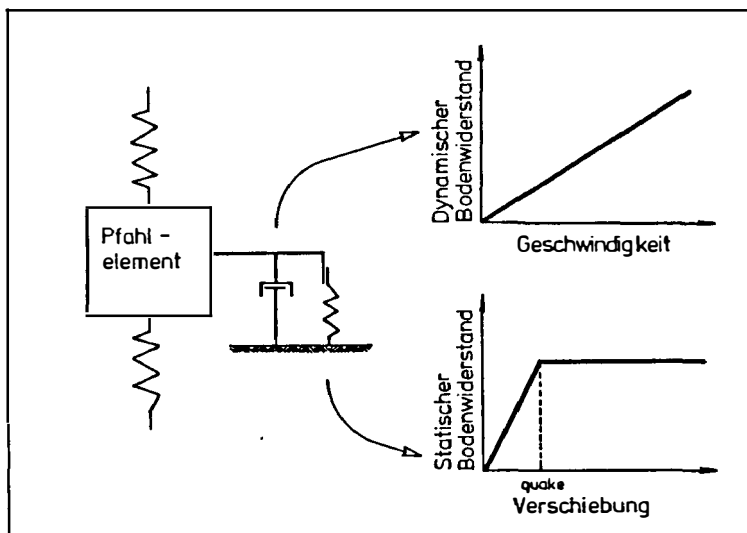


Bild 2: Bodenmodell

Das diskrete Pfahlmodell hat weiter den Vorteil, daß die Bestandteile der Rammausrüstung, wie z.B. Rammbar, Rammhaube oder -futter, in das Modell einbezogen werden können. Die elastischen und dämpfenden Eigenschaften der einzelnen Bestandteile der Rammausrüstung müssen dafür bekannt sein.

3. Das WEAP-Programm

In einem umfangreichen Forschungsvorhaben entwickelte das Texas Transportation Institute der Texas Universität 1969 ein Wellengleichungsprogramm mit umfangreichen Lösungen für Freifallbäre. Einige Jahre später wurde von GOBLE und RAUSCHE im Auftrag des U.S. Department of Transportation das WEAP-Programm entwickelt und 1976 veröffentlicht. Aufbauend auf dem TTI-Programm wurden die Modelle der Luft/Dampfhämmer weiterentwickelt und realistische Modelle für Dielelhämmer geschaffen.

Für die Entwicklung geeigneter Modelle wurden umfangreiche Messungen an Rammhären durchgeführt. Das WEAP-Programm enthält heute die Kennwerte von 127 verschiedenen Luft-, Dampf- und Dieselhären. Vertreten sind die wichtigsten Hären der Firmen Delmag, Kobe, Vulcan, Raymond und Menck.

Die physikalischen Eigenschaften verschiedener Rammhäuten sowie der Schlag- und Häutenfutter wurden ebenfalls untersucht und hierfür geeignete Modelle entwickelt.

Für die Durchführung von Berechnungen mit dem WEAP-Programm müssen im wesentlichen folgende Daten vorgegeben werden:

- Pfahlgeometrie
 - Länge
 - Querschnitt
 - Steifigkeit

- Rammausrüstung
 - Rammhär
 - Futter
 - Haube

- Boden
 - Dämpfung
 - quake
 - Anteil von Mantelreibung/Spitzendruck
 - Verteilung der Mantelreibung

Die praktische Berechnung läuft nun so ab, daß man für eine beliebige Tragfähigkeit des Pfahles Annahmen über die Verteilung der Bodenwiderstandskräfte und der Dämpfung trifft. Mit dem Modell des eingesetzten Rammhären wird nun ein Rammschlag simuliert. Von Zeitschritt zu Zeitschritt verfolgt man durch Lösung der Differenzgleichungen, wie sich die Spannungswelle im Pfahl ausbreitet. Die Computerrechnung liefert die bleibende Eindringung oder umgekehrt die erforderliche Schlagzahl in Abhängigkeit von der Pfahltragfähigkeit. Wiederholt man diese Rechnung mit anderen Grenztragfähigkeiten, kann aus allen Ergebnissen eine Tragfähigkeitskurve dargestellt werden (Bild 3).

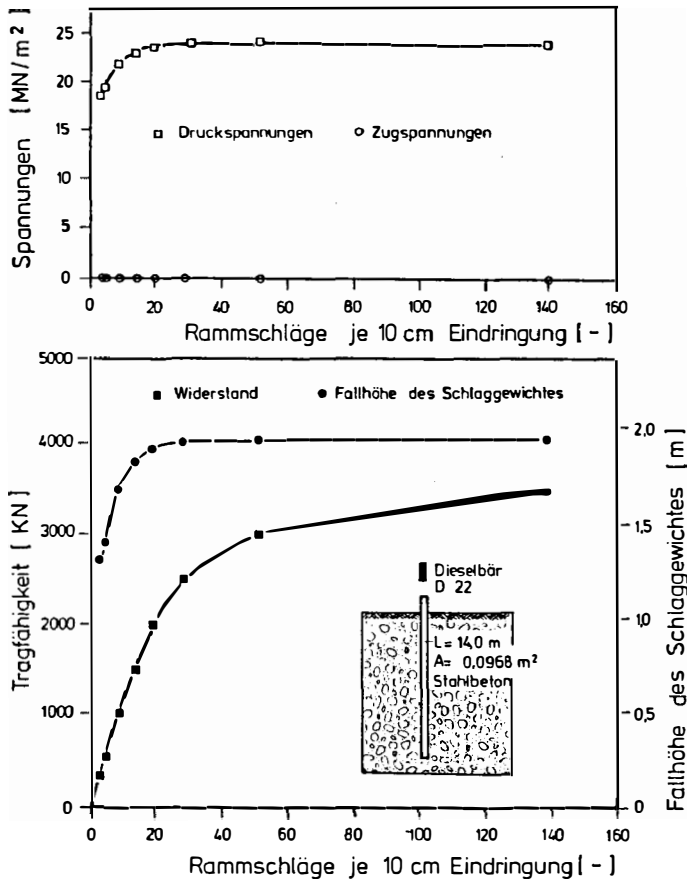


Bild 3: Beispiel für Ergebnisse nach dem WEAP-Programm

Hiermit können Rammkriterien für die Baustelle festgelegt werden. Als weiteres wichtiges Ergebnis kann vorab kontrolliert werden, ob die beim Rammen im Pfahl auftretenden Spannungen vom Material mit ausreichender Sicherheit ertragen werden können. Das WEAP-Programm ermöglicht im voraus die Untersuchung verschiedener Rammfähren. Es ermöglicht damit im voraus die Optimierung des Rammsystems für einen Baustelleneinsatz.

4. Parameterstudie

4.1 Allgemeines

Um erste Erfahrungen mit dem WEAP-Programm zu erhalten, wurde zunächst in einer Parameterstudie der Einfluß der Eingabedaten auf die errechneten Ergebnisse untersucht. Für diese Parameterstudie wurde das im Bild 4 dargestellte System vorgegeben. Es wurde immer nur der Eingabewert geändert, dessen Einfluß untersucht werden sollte.

4.2 Rammsystem

Zunächst wurde der Einfluß der Rammgröße und seiner Energie auf die Tragfähigkeitskurve untersucht. Als Parameter wurden die Delmag-Dieselschlägereien D 5, D 12, D 22, D 30 und D 36 gewählt. Die Nennenergie dieser Schlägereien liegt zwischen 12,5 kNm für den D 5 und 115 kNm für den D 36.

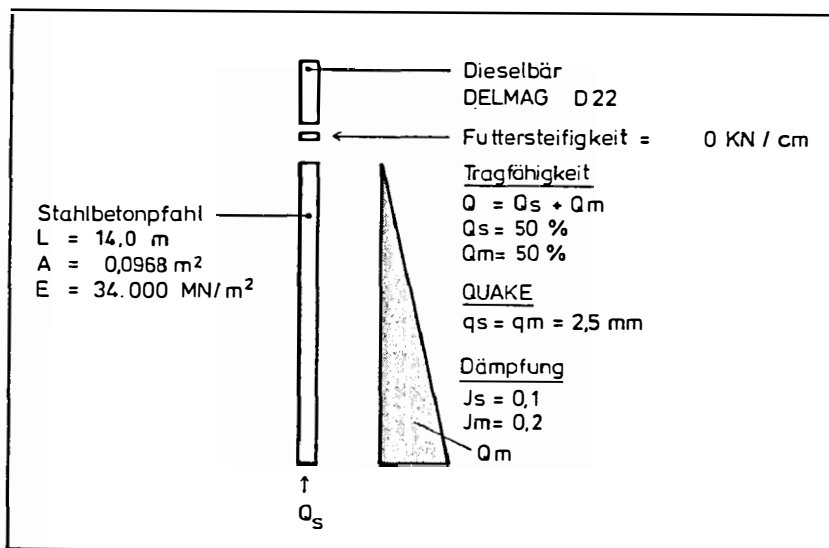


Bild 4: System für die Parameterstudie

Die Ergebnisse der Tragfähigkeitskurven sind im Bild 5 zusammengestellt. Mit wachsender Energie des Rambbären sinkt die für gleiche Tragfähigkeiten notwendige Schlagzahl. Andererseits muß der Bär eine ausreichend große Energie besitzen, um den Pfahl bis zu einer geforderten Tragfähigkeit einrammen zu können. Die hier nicht dargestellten Druck- und Zugspannungsverläufe zeigen, daß bei der Rammung mit kleinen Rambbären erhebliche Zugspannungen im Pfahlmaterial auftreten.

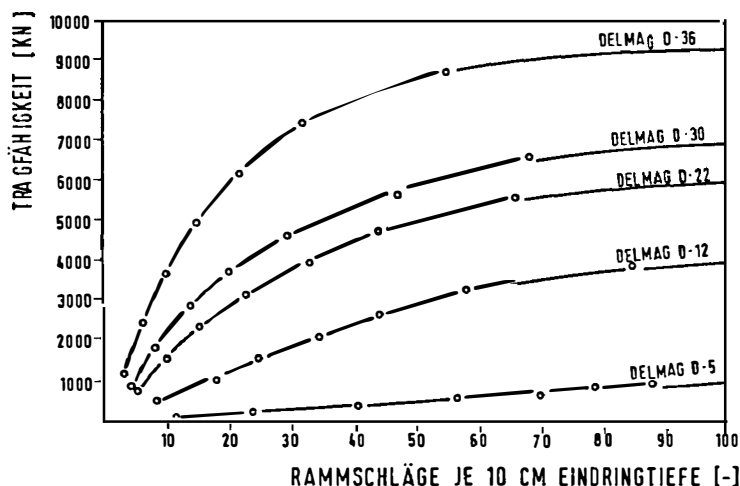


Bild 5: Tragfähigkeitskurven bei Rammung mit verschiedenen Dieselbären

In einer zweiten Berechnung wurden Rambbäre unterschiedlicher Bauart (Dieselbär, Dampfbär) und verschiedener Hersteller, aber mit annähernd gleicher Nennenergie verwendet. Die errechneten Tragfähigkeitskurven sind im Bild 6 zusammengestellt. Die Kurven für die beiden Dieselbären und für die vier Dampfbären stimmen jeweils gut überein. Ein deutlicher Unterschied besteht zwischen den beiden Bauarten im Tragfähigkeitsverhalten. Während die Dieselbären eine mehr gleichmäßige Zunahme der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von den Schlagzahlen zeigen, steigt bei Luft/Dampfbären nach einem anfänglich steilen Anstieg bei geringer Zunahme der Schlagzahl die Tragfähigkeit nur noch sehr gering an; die Schlagzahlen vergrößern sich jedoch extrem.

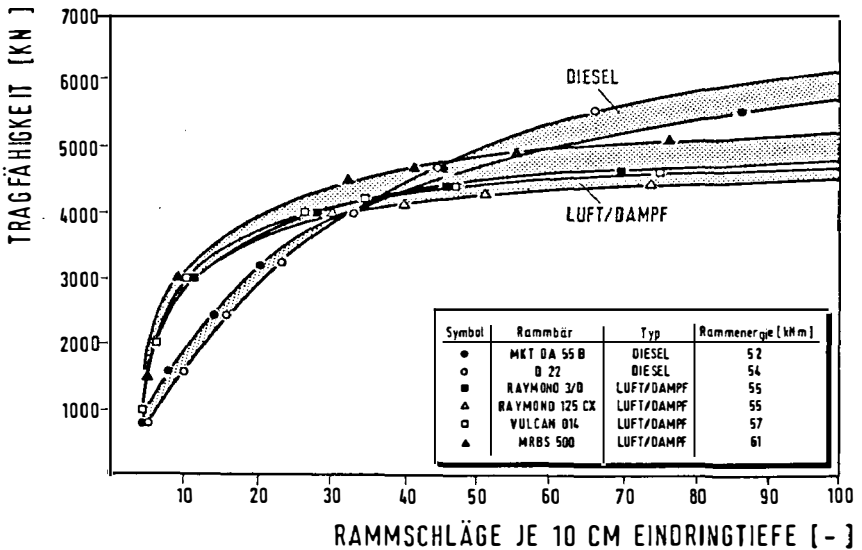


Bild 6: Tragfähigkeitskurven bei Rammung mit unterschiedlichen Bären mit annähernd gleicher Nennenergie

In weiteren Untersuchungen wurde der Einfluß der Steifigkeit des Rammfutters untersucht. Im WEAP-Programm wird die Futtersteifigkeit als das Produkt aus dem Elastizitätsmodul und der Querschnittsfläche des Futters, dividiert durch die Dicke, definiert. Erwartungsgemäß zeigte sich, daß durch harte Rammfutter steil ansteigende Kraftverläufe im Pfahl entstehen und hohe Materialspannungen auftreten. Weiche Rammfutter erzeugen flach verlaufende Kraft-Zeitkurven und geringe Materialspannungen. Zugspannungen können verhindert werden. Das Bild 7 zeigt den Einfluß der Futtersteifigkeit auf den zeitlichen Verlauf der Pfahlkopfkraft (Tragfähigkeit 1500 kN). Der Einfluß der Futtersteifigkeit auf die Tragfähigkeitskurven ist im Bild 8 dargestellt.

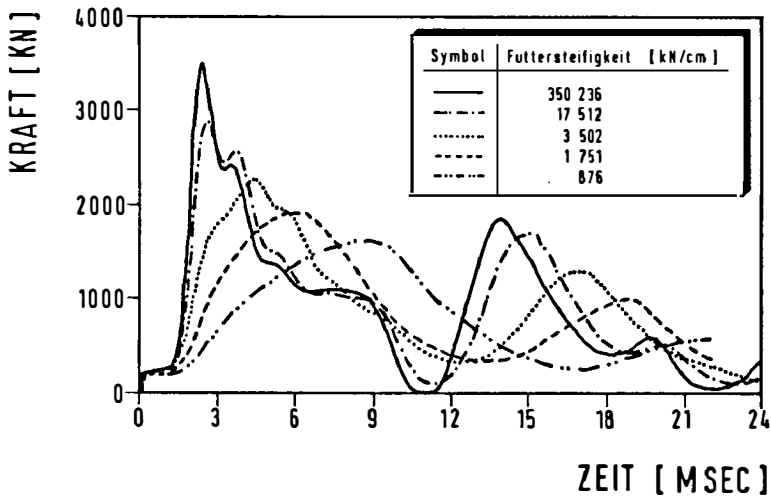


Bild 7: Zeitlicher Verlauf der Kraft am Pfahlkopf für verschiedene Futtersteifigkeiten.

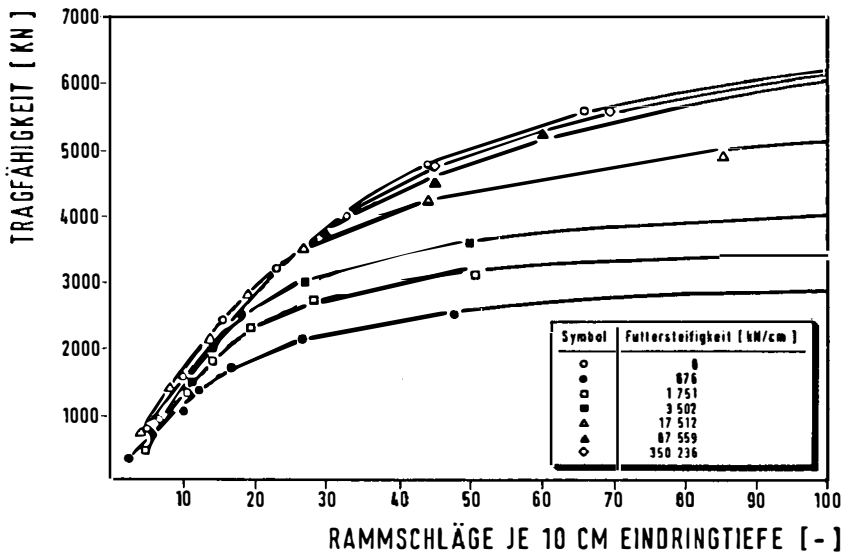


Bild 8: Tragfähigkeitskurven bei unterschiedlichen Futtersteifigkeiten

Die Bilder 7 und 8 verdeutlichen den außerordentlich großen Einfluß des Rammfutters auf die Pfahlrammung. Bei der Wahl des Rammfutters muß in jedem Einzelfall zwischen einer möglichst schnellen Rammung und einer möglichst schonenden Rammung des Pfahles abgewogen werden. Hier können WEAP-Berechnungen eine wertvolle Entscheidungshilfe sein, um ein möglichst optimales Rammsystem für eine Baustelle auszuwählen.

4.3 Elastische Grenzverformung - Quake

Die größte elastische Verformung des Bodens, der Quake, wird SMITH folgend im WEAP-Programm üblicherweise zu $q = 2,5$ mm angesetzt. Die Eingabe erfolgt getrennt für den Quake am Pfahlfuß und Pfahlmantel.

Neuere Untersuchungen bestätigen in allen rolligen Bodenarten die Grenzverformung von $q = 2,5$ mm. In einigen Schluffen und Tonen wurden dagegen Werte bis zu $q = 20$ mm gemessen.

Bild 9 zeigt den großen Einfluß des Quakes auf die Tragfähigkeitskurven. Das starke Ansteigen der Schlagzahlen mit größer werdendem Quake läßt sich anhand des Bodenmodells, das durch den Quake mitbeschrieben wird, erklären. Der Quake ist letztendlich die Größe, die der Pfahl bei einem Rammschlag in den Boden eindringen muß, um den maximalen Widerstand des Bodens zu erreichen. Eindringungen über den Quake hinaus führen zu keiner weiteren Erhöhung des Bodenwiderstandes, sondern nur zu plastischen Verformungen im Boden.

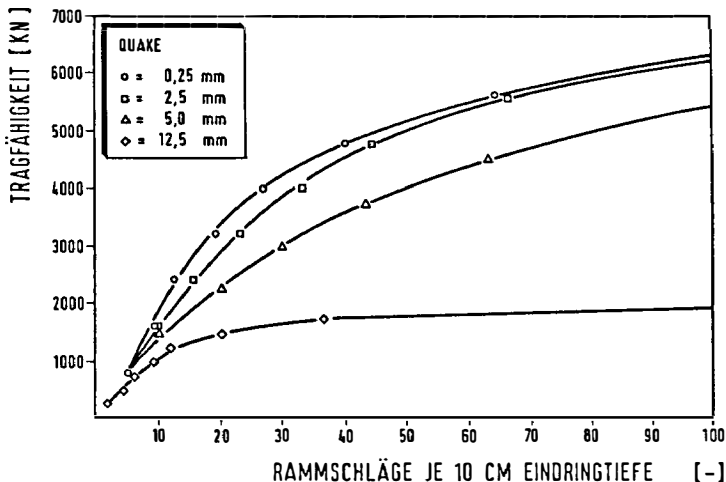


Bild 9: Tragfähigkeitskurven für unterschiedliche elastische Grenzverformungen (quake)

Das Bild 9 zeigt aber deutlich, daß der Einfluß des Quakes im Bereich der üblichen Größenordnung von $q = 2,5$ mm gering ist. Abweichungen von der tatsächlichen Grenzverformung des Bodens können in diesem Bereich für praktische Zwecke vernachlässigt werden.

4.4 Dämpfungsparameter

Die Differenz zwischen den dynamischen und dem statischen Eindringwiderstand eines Pfahles bezeichnet man als Dämpfung.

Diese geschwindigkeitsabhängige Dämpfung ist in den bindigen Bodenarten wesentlich größer als in den rolligen Bodenarten. Im Rahmen unserer WEAP-Berechnungen wurden ausschließlich dimensionslose CASE-Dämpfungsfaktoren verwendet. Erfahrungswerte für verschiedene Bodenarten sind im Bild 10 zusammengestellt.

Bodenart	CASE - Dämpfungsfaktor J [-]	
	Pfahlmantel	Pfahlfuß
Kies	0,1 - 0,2	0,1
Sand	0,2 - 0,4	0,1 - 0,2
Schluff	0,3 - 1,5	0,2 - 0,8
Ton	0,4 - 2,0	0,2 - 0,8

Bild 10: Erfahrungswerte für CASE-Dämpfungsfaktoren
(nach: GOBLE u. RAUSCHE 1976)

Um einen grundsätzlichen Überblick über den Einfluß der Dämpfung auf die Tragfähigkeitskurven zu erhalten, wurde zunächst je ein reiner Spitzendruck- und Mantelreibungspfahl untersucht. Die Dämpfungsfaktoren wurden von 0 bis 1,0 variiert. Die Ergebnisse für den Spitzendruckpfahl sind im Bild 11 und für den Mantelreibungspfahl im Bild 12 dargestellt.

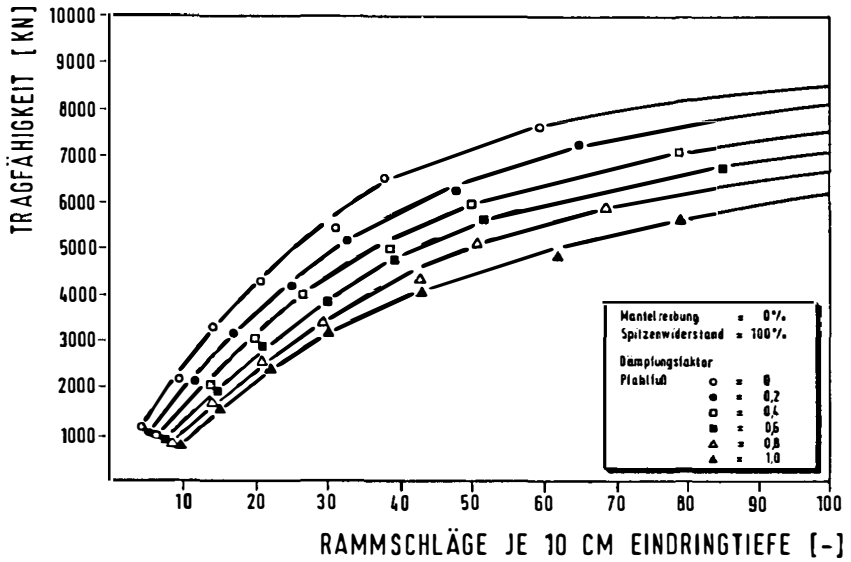


Bild 11: Tragfähigkeitskurven für einen Spitzenwiderstandspfehl

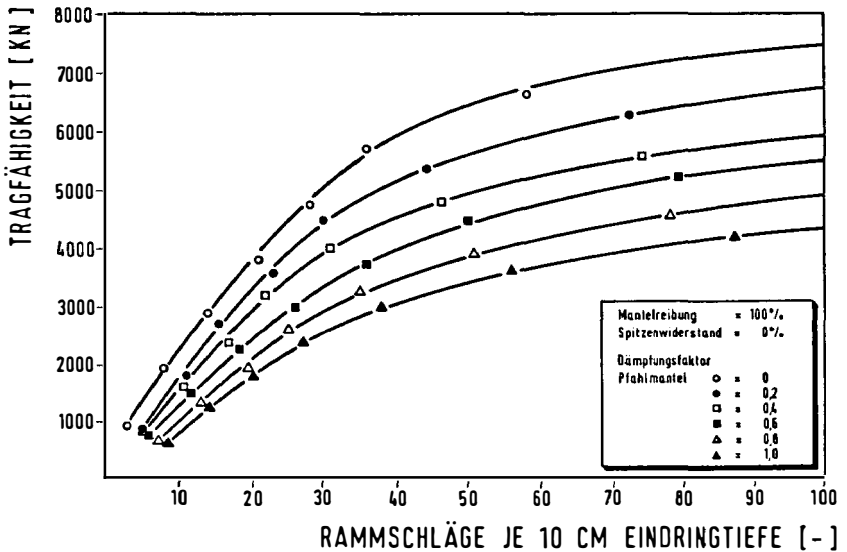


Bild 12: Tragfähigkeitskurven für einen Mantelreibungspfehl

In beiden Fällen wachsen die Schlagzahlen für alle Tragfähigkeiten mit der Dämpfungskonstanten an. Beim reinen Reibungspfahl, ohne Kraft und Dämpfung am Pfahlfuß, ist dieser Einfluß größer als bei dem reinen Spitzendruckpfahl.

Bei gleicher Tragfähigkeit werden für den Reibungspfahl mehr Rammschläge benötigt als für den Spitzendruckpfahl. Der Unterschied zwischen den Tragfähigkeitskurven der beiden Pfähle ist bei kleinen Dämpfungsfaktoren und niedrigen Schlagzahlen gering. Die Abweichungen nehmen mit steigenden Dämpfungsfaktoren und größeren Schlagzahlen zu.

4.5 Mantelreibungsverteilung

Das WEAP-Programm ermöglicht die Eingabe beliebiger Verteilungen der Mantelreibung über die Pfahllänge. Für einfache Fälle enthält das Programm bereits zehn verschiedene Verteilungen (Bild 13).

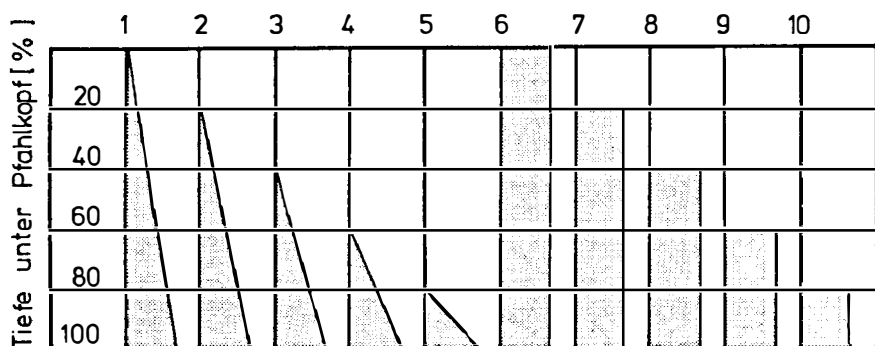


Bild 13: Standardverteilung der Mantelreibung

Der vorgegebene Mantelreibungsanteil an der Gesamttragfähigkeit wird jeweils auf die gewählte Reibungsfläche verteilt. In dem für diese Parameterstudie gewählten Beispiel beträgt die Mantelreibung 50 % der Gesamttragfähigkeit (s. 4.1). Bei gleicher Gesamttragfähigkeit erhält man

damit für die Verteilung 5 (nach Bild 13) eine größere spezifische Mantelreibung als für die Verteilung 1. Die gesamte Mantelreibung ist aber in beiden Fällen gleich.

Im Rahmen dieser Parameterstudie wurde zunächst der Einfluß der Mantelreibungsverteilung über die Pfahllänge untersucht. Für eine dreieckige Verteilung der Mantelreibung sind die Tragfähigkeitskurven im Bild 14 zusammengestellt. Danach hat die Verteilung der Mantelreibung kaum einen Einfluß auf die Tragfähigkeitskurven und damit auf die notwendigen Schlagzahlen. Dies ist verständlich, da in allen fünf untersuchten Verteilungen in der Summe stets derselbe Mantelreibungswiderstand überwunden werden muß.

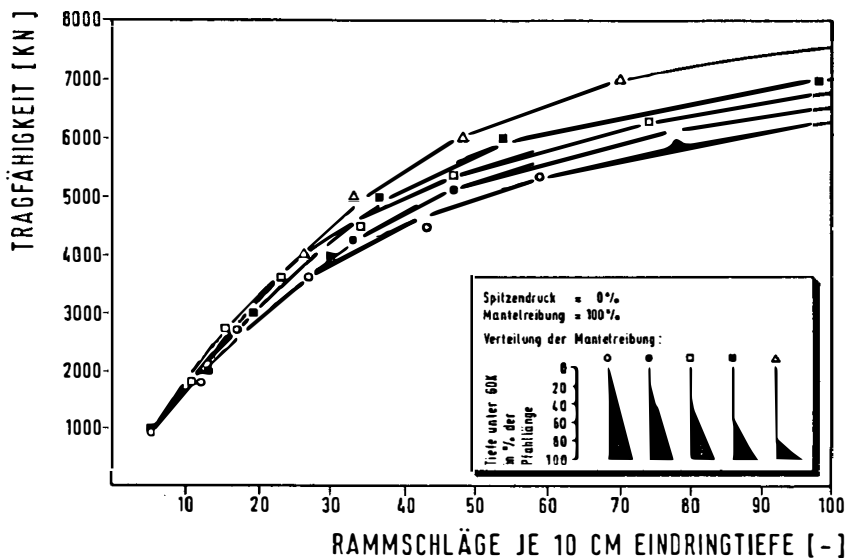


Bild 14: Tragfähigkeitskurven für verschiedene Mantelreibungsverteilungen.

Der Unterschied zeigt sich aber im zeitlichen Verlauf der hier nicht abgebildeten Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf.

Weitere Berechnungen zeigten, daß zwischen der Annahme einer dreieckigen und einer rechteckigen Mantelreibungsverteilung keine wesentlichen Unterschiede in den Ergebnissen auftreten.

4.6 Verhältnis Mantelreibung/Spitzendruck

Neben der qualitativen Mantelreibungsverteilung über die Pfahllänge muß der Anteil von Mantelreibung und Spitzendruck an der Gesamttragfähigkeit festgelegt werden.

Das Bild 15 zeigt die Tragfähigkeitskurven für verschiedene Anteile von Mantelreibung und Spitzendruck an der Gesamttragfähigkeit. Mit den für die Parameterstudie gewählten CASE-Dämpfungswerten von $J_{\text{Mantel}} = 0,3$ und $J_{\text{Fuß}} = 0,15$ und einem Mantelreibungsanteil von 60 % der Gesamttragfähigkeit treten nur geringe Unterschiede in den Tragfähigkeitskurven auf. Weitere Berechnungen haben gezeigt, daß nur bei sehr großen Dämpfungswerten wesentliche Abweichungen zwischen den Tragfähigkeitskurven auftreten.

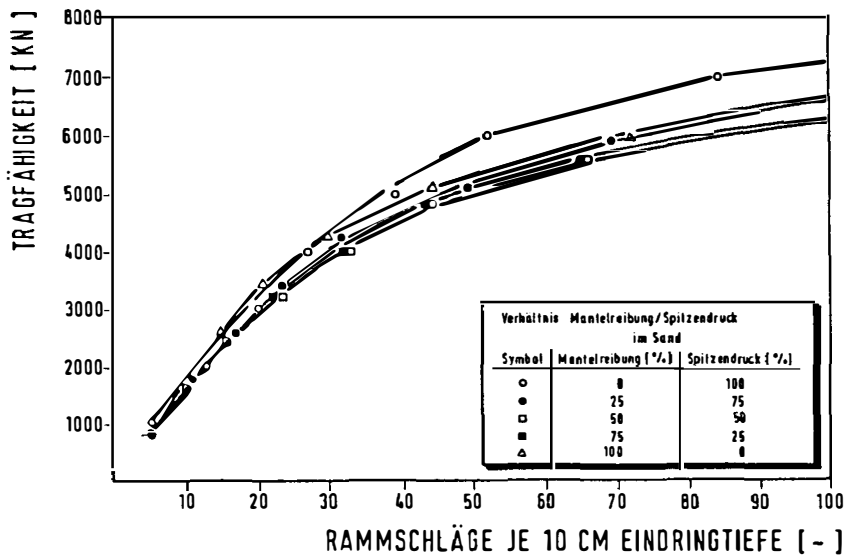


Bild 15: Tragfähigkeitskurven für verschiedene Verhältnisse von Mantelreibung und Spitzendruck

4.7 Kraftverlauf in den Pfahlelementen

Das WEAP-Programm ermöglicht für jedes Pfahlelement die Ausgabe des Kraft- und Geschwindigkeitsverlaufs über die Zeit. Für je einen reinen Spitzendruckpfahl und einen Mantelreibungspfahl sind die Kraftkurven einzelner Elemente im Bild 16 zusammengestellt. Sie wurden bei der WEAP-Berechnung für eine Gesamttragfähigkeit von 2.500 kN ermittelt.

Der Spitzendruckpfahl zeichnet sich dadurch aus, daß die Kräfte in den ersten sieben Pfahlelementen gleich groß bleiben. Da an diesen Elementen keine Mantelreibungskräfte und Dämpfungskräfte angreifen, wird die eingeleitete Stoßkraft nicht abgebaut. In den beiden letzten Elementen steigen die Pfahlkräfte an.

Die Kraft in einem Pfahlelement errechnet sich aus der Differenz der beiden Federkräfte, die oben und unten am Element angreifen. Auf das Element 10 wirken von der Unterseite nicht die Federn des Pfahles, sondern die Feder und der Kolbendämpfer des Bodenmodells. Sie stellen zusammen den Gesamtwiderstand des Bodens dar. Dieser Gesamtwiderstand wird durch die Eingabe festgelegt. Der statische Anteil der Feder kann durch eine Verschiebung des Elementes über den Quake hinaus nicht vergrößert werden (siehe Bodenmodell) und muß in der Kräftedifferenz am letzten Pfahlelement konstant bleiben.

Die eingeleitete Stoßkraft wird beim Mantelreibungspfahl in jedem Pfahlelement über die Bodenfedern und Dämpfungselemente abgebaut. Die Pfahlkräfte werden daher von Element zu Element kleiner.

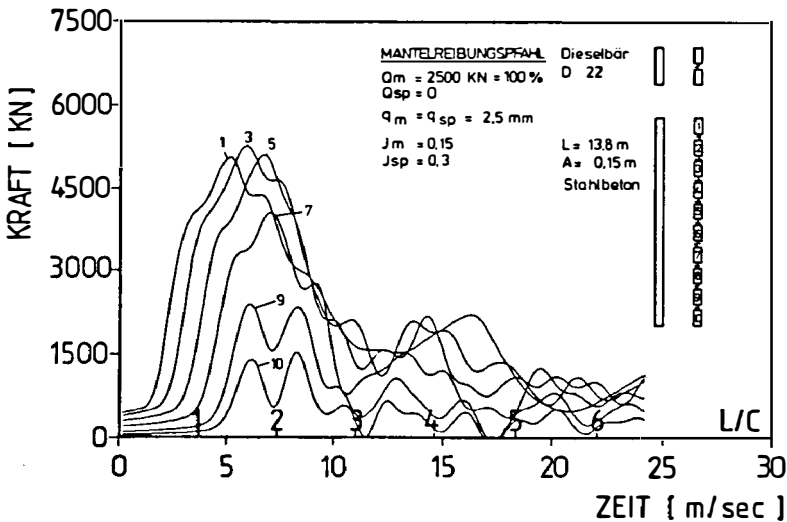
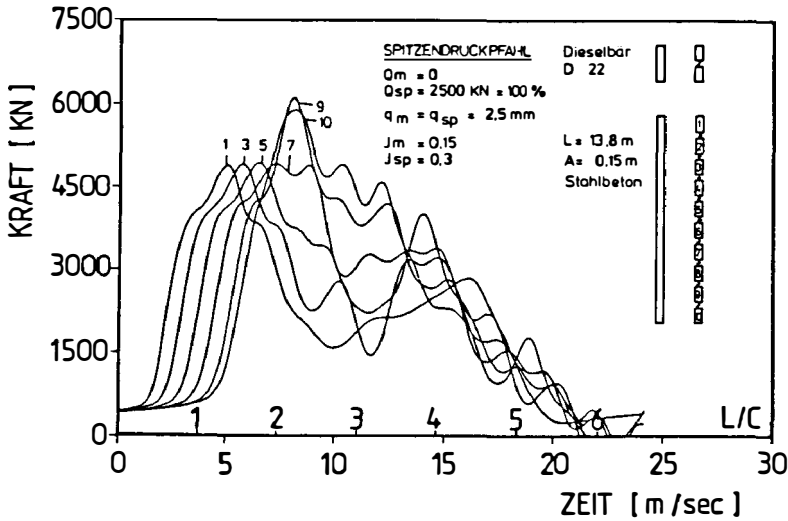


Bild 16: Zeitlicher Verlauf der Kräfte in einzelnen Pfahlelementen
 Oben : Spitzendruckpfahl
 Unten: Mantelreibungspfahl

4.8 Schlußfolgerungen aus der Parameterstudie

An einem einfachen Grundbeispiel wurde untersucht, welchen Einfluß die Variation der WEAP-Berechnung besitzt. Die Vergleiche der zusammengehörenden Schlagzahlen und Tragfähigkeiten innerhalb einer Parametervariation führen zu qualitativen Aussagen. Dabei muß immer auf das Grundbeispiel Bezug genommen werden. Ändert man eine zweite Eingabevoraussetzung, kann der Einfluß abgeschwächt oder verstärkt werden.

Die Ergebnisse der am Institut für Grundbau und Bodenmechanik durchgeführten Parameterstudie können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die Rambbärgröße beeinflusst die Berechnungen erheblich, was aufgrund der großen Unterschiede in der Rammenergie nicht anders zu erwarten war. WEAP eignet sich gut für eine Rambbärstudie.
- Die Futtersteifigkeit besitzt einen entscheidenden Einfluß auf Schlagzahl, Tragfähigkeit und Kraftverlauf im Pfahl. Bei der Wahl der Futtersteifigkeit muß berücksichtigt werden, daß sie sich durch einen längeren Rammvorgang ändert.
- Die elastische Grenzverformung, der Quake, beeinflusst im Bereich der üblichen Größenordnung von $q = 2,5 \text{ mm}$ die Ergebnisse wenig. Erfordern die anstehenden Bodenarten die Wahl sehr großer Werte für den Quake, ist der Einfluß erheblich.
- Den Dämpfungsparametern muß ein entscheidender Einfluß zugesprochen werden. Da die Wahl der Größe auf Erfahrung und Vergleichswerten beruht, ist hier besondere Sorgfalt empfohlen.
- Änderungen in der Mantelreibung bewirken keine großen Schwankungen in den Schlagzahlen und der Tragfähigkeit. Zu erkennen ist der Einfluß in den Kraft- und Geschwindigkeitsverläufen.
- Keine entscheidenden Einflüsse besitzen Variationen in Pfahllänge und Elastizitätsmodul des Pfahles.

5. Nachrechnung von Bauwerkspfählen

Um den Einsatz des WEAP-Programms für die Praxis zu überprüfen, wurden Berechnungen für Bauwerkspfähle von verschiedenen Baustellen durchgeführt. An allen Pfählen waren dynamische Pfahltests und statische Probelastungen durchgeführt worden. Darüberhinaus lagen uns die Rammprotokolle und die Baugrundgutachten vor. Bei den untersuchten Pfählen handelt es sich um Stahlbetonfertigungspfähle und Stahlpfähle mit Längen bis zu 26,0 m.

Die erforderlichen Eingabedaten für die Rammausrüstung, den Pfahl und den Boden lagen in allen Fällen mit ausreichender Genauigkeit vor. Zur Eingabe folgender Werte mußten Annahmen gemacht werden:

- Anteil von Mantelreibung und Spitzendruck
- Verteilung der Mantelreibung
- Dämpfungsfaktoren
- Steifigkeit des Rammfutters.

Mit dem WEAP-Programm wurde für alle Bauwerkspfähle eine Tragfähigkeitskrüve und die zugehörigen Kraft- und Geschwindigkeitskurven ermittelt. Die berechneten Kraftkurven können mit den in einem dynamischen Pfahltest gemessenen Kurven verglichen werden. Ein Beispiel für eine gute Übereinstimmung zeigt uns das Bild 17.

Die am Ende der Rammung ermittelte Schlagzahl (aus dem Rammprotokoll) wurde jeweils als Eingangsparameter für die Tragfähigkeitskurve verwendet und die zugehörige Tragfähigkeit abgelesen. Diese Tragfähigkeit kann mit dem Ergebnis der statischen Probelastung verglichen werden. Die Ergebnisse der bisher ausgewerteten Pfähle zeigt das Bild 18.

Dabei muß darauf hingewiesen werden, daß bisher nur Pfähle in einfachen Bodenverhältnissen untersucht wurden.

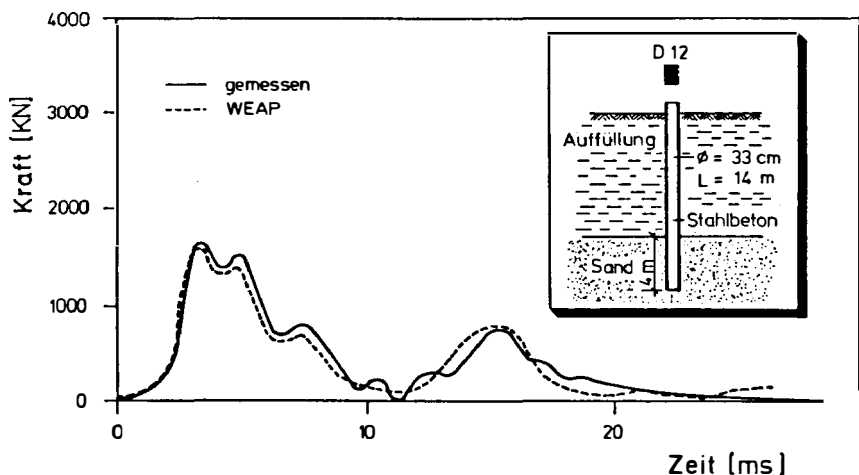


Bild 17: Vergleich der gemessenen und mit dem WEAP-Programm berechneten Kräfte am Pfahlkopf

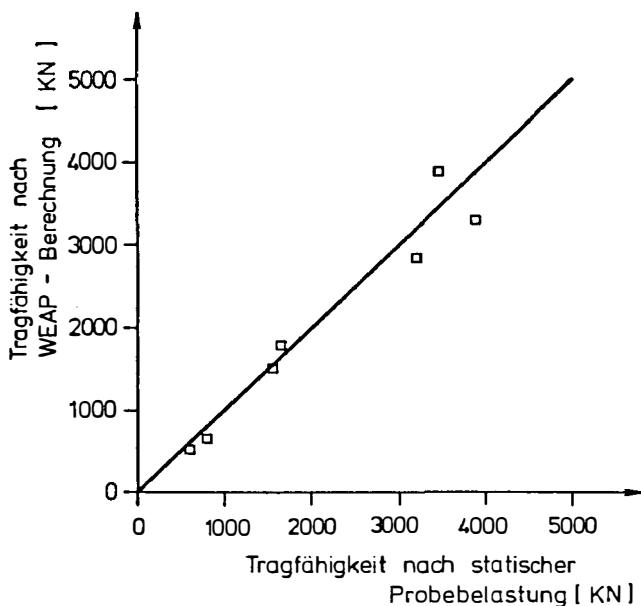


Bild 18: Vergleich der Pfahltragfähigkeit nach statischen Probelastungen und WEAP-Berechnungen

Die bisher mit dem WEAP-Programm durchgeführten Nachrechnungen von Bauwerkspfählen ergaben befriedigende Ergebnisse. Weitere Untersuchungen werden zur Zeit durchgeführt (Drever, 1985). Neben Pfählen in schwierigen Baugrundverhältnissen werden lange Pfähle und Stahlpfähle mit aufgeschweißten Flügeln untersucht.

SCHRIFTTUM

- Drever, M. : Untersuchungen zum Eindring- und Tragverhalten von Ramm- und Modellpfählen
Institut für Grundbau u. Bodenmechanik,
TU Braunschweig, 1985
- Goble, G.G.: Wave Equation Analysis of Pile Driving-
Rausche, F. WEAP Programm, 1976,
US Department of Transportation, FHWA,
Implementation Package 76-14.1
- Hejazi, A. : Application of Wave Equations to Pile
Driving Analyses
Louisiana Technical University, Februar 1983
- Krapf : Formel und Versuche über die Tragfähigkeit
eingerammter Pfähle, Fortschritte der
Ingenieur-Wissenschaften 1906,
2. Gruppe, Heft 12
- Kümmel, F. : Gründen mit schlagenden Rammen und Vibrations-
bären, Vortragsveranstaltung im Haus der
Technik am 17. Februar 1981,
Eigenverlag Haus der Technik e.V., 1981

- Lowery, L.L. : Use of the Wave Equation to Predict Soil
Edwards, L.C. Resistance on a Pile During Driving
Hirsch, T.C. Texas Transportation Institute,
Research Report 33-10, August 1968
- Meseck, H. : Anwendung eines Wellengleichungsprogramms zur
Ermittlung der Tragfähigkeit von Rammpfählen,
Mitteilung des Institutes für Grundbau u.
Bodenmechanik, TU Braunschweig,
Heft 13, 1984
- Rausche, F. : Soil Response from Dynamic Analysis
and Measurements on Piles, Ph. D. Thesis,
Case Western Reserve University,
Cleveland, Ohio, 1970
- Smith, E.A.L.: Pile Driving Impact, Prac. Ind. Comput.
Seminar, International Business
Machines Corp., New York, 1950
- Smith, E.A.L.: Pile Driving Analysis by the Wave
Equation, J. Soil Mech. Foundations
Div., ASCE, pap. 2574, SM 4, 1960

Meßtechnische Grundlagen dynamischer Pfahltestverfahren

**Dipl. – Ing. H. – G. Balthaus
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig**

1. Einleitung

Mit der bahnbrechenden Entwicklung der modernen Elektronik hat auch die pfahldynamische Meßtechnik in den letzten 20 Jahren ihren Aufschwung genommen und so die Entwicklung dynamischer Meßmethoden zur Tragfähigkeitsbestimmung von Pfählen erst möglich gemacht.

Die ersten Kraft- und Beschleunigungsmessungen an Ramppfählen wurden unter der Aufsicht der Michigan Highway Commission (1965) durchgeführt. 1964 begannen die Forschungsarbeiten am Case Institute of Technology in Cleveland/Ohio, die Ende der sechziger Jahre zur Entwicklung einer ersten leistungsfähigen Meßausrüstung für die Tragfähigkeitsbestimmung von Ramppfählen führten (Goble et al., 1970).

Einige Jahre später wurden in Europa eigene Entwicklungen zur Tragfähigkeits- und Integritätsuntersuchung von Pfählen vorgestellt (van Koten u. Middendorp, 1981).

Für eine leistungsfähige und zuverlässige dynamische Tragfähigkeitsbestimmung waren gegen mechanische Einwirkung und Umwelteinflüsse hoch widerstandsfähige Meßaufnehmer und Übertragungskabel notwendig, die heute zu einem hohen Standard für eine Vielzahl von Anwendungsfällen entwickelt sind.

Es soll hier nicht der Versuch unternommen werden, alle bekannten Meßverfahren und Möglichkeiten der Datenerfassung erschöpfend zu beschreiben. Vielmehr sollen die Grundelemente pfahldynamischer Meßeinrichtungen in ihrer Wirkungsweise und Leistungsfähigkeit vorgestellt

werden. Ein Überblick über die Vielzahl möglicher Meßverfahren wurde von Rausche (1984) gegeben.

Auf eine besondere Darstellung meßtechnischer Aspekte der Integritätsprüfung wird an dieser Stelle verzichtet, da in einem weiteren Beitrag darauf näher eingegangen wird.

2. Aufbau der Meßeinrichtung

Wie in einem vorausgehenden Beitrag dieses Bandes vom Verfasser bereits erläutert, ist für die dynamische Tragfähigkeitsbestimmung von Pfählen eine gleichzeitige Messung von Kraft- und Bewegungsgrößen am Pfahlkopf erforderlich.

In den letzten Jahren hat sich das Verfahren durchgesetzt, die Längskräfte im Pfahl durch eine Dehnungsmessung zu bestimmen und die Bewegungsgrößen aus einer Beschleunigungsmessung abzuleiten. Dazu werden paarweise an gegenüberliegenden Stellen des Pfahlkopfes mindestens zwei Pfahldurchmesser unterhalb des Pfahlkopfes mit Dehnungsmeßstreifen bestückte Dehnungsaufnehmer und piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer angebracht.

In Bild 1 ist der Aufbau einer vollständigen Meß- und Auswerteeinrichtung dargestellt. Die Meßsignale werden über ein geschirmtes und mechanisch geschütztes Kabel zur Meßstation übertragen. Nach ihrer Verstärkung werden die Meßsignale mit einem 4-Kanal-Magnetbandgerät aufgezeichnet. Über ein Mikrophon kann eine Sprachspur mit Informationen zur späteren Identifizierung einzelner Schläge belegt werden.

Vom Bandgerät gelangen die Meßsignale in einen sogenannten Transientenspeicher, der die Aufgabe der Analog-Digitalwandlung (A/D-Wandlung) und der Zwischenspeicherung der digitalen Meßdaten übernimmt. Auf einem Oszilloskop lassen sich die gemessenen Kraft- und Beschleunigungs-Zeit-Verläufe darstellen. Die im Transientenspeicher (oder Transientenrekorder, Digitales Speicheroszilloskop) digitalisierten und abgelegten Meßdaten können durch einen Steuerbefehl von einem Tischcomputer (Microcomputer oder Personal-Computer) aus gelesen und rechnerisch weiterverarbeitet werden. Ergebnisse, die z.B. nach der bereits vorgestellten Case- oder CAPWAP- Methode gewonnen wurden, stehen anschließend zur Ausgabe auf einem Drucker oder Plotter zur Verfügung.

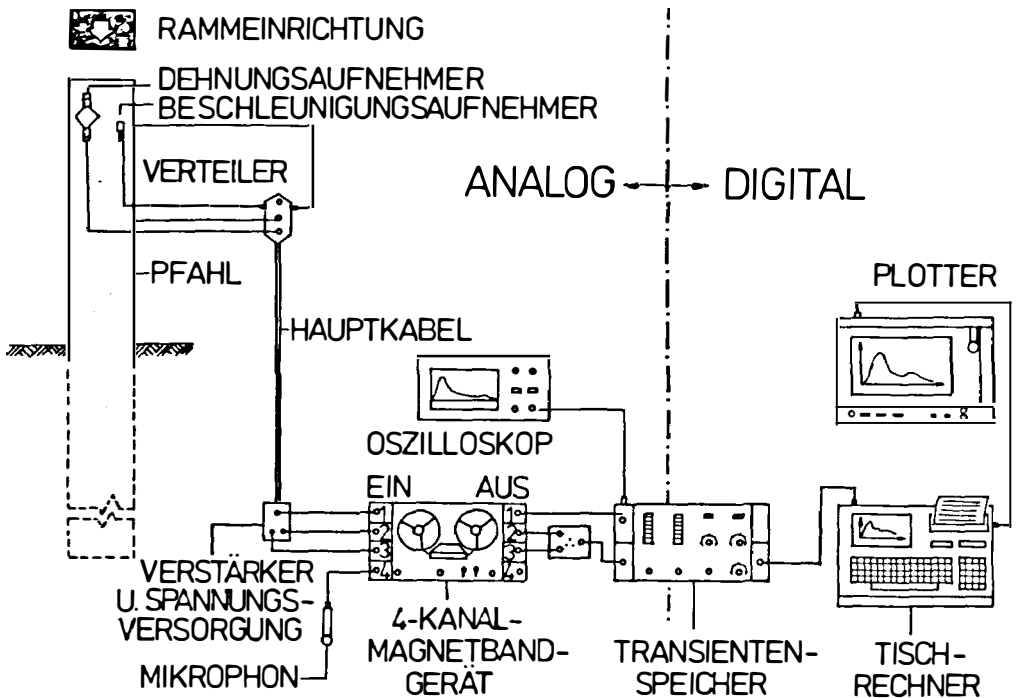


Bild 1: Aufbau einer Meß- und Auswerteeinrichtung für dynamische Tragfähigkeitsbestimmungen an Rammpfählen

Auf die einzelnen Komponenten der Meßeinrichtung und wesentlichen Aspekte der Datenübertragung und -behandlung wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Zuvor jedoch sei noch auf einen alternativen Aufbau der Meßeinrichtung aus Bild 1 hingewiesen. In Bild 2 ist eine Gerätekombination mit einem mikrochipbestückten "Pile Driving Analyser" dargestellt. In dieser Meßeinrichtung, die grundsätzlich die gleichen Funktionen wie die in Bild 1 dargestellte besitzt, übernimmt der Pile Driving Analyser die Aufgaben der Spannungsversorgung der Meßaufnehmer, der Signalverstärkung, der A/D-Wandlung und einfacher numerischer Datenverarbeitung, z.B. gemäß der Case-Methode. Der Pile Driving Analyser wurde detailliert von Likins (1984) beschrieben. Eine eingehende Darstellung soll daher hier unterbleiben.

Bemerkenswert ist, daß beide Meßeinrichtungen aus einem analogen, eigentlichen Meßsystem und einem digitalen System der Datenverarbeitung bestehen. In den Bildern 1 und 2 ist die Trennungslinie zwischen beiden Bereichen eingezeichnet. Auf den Begriff der Digitalisierung und ihre Vorteile wird im folgenden noch eingegangen.

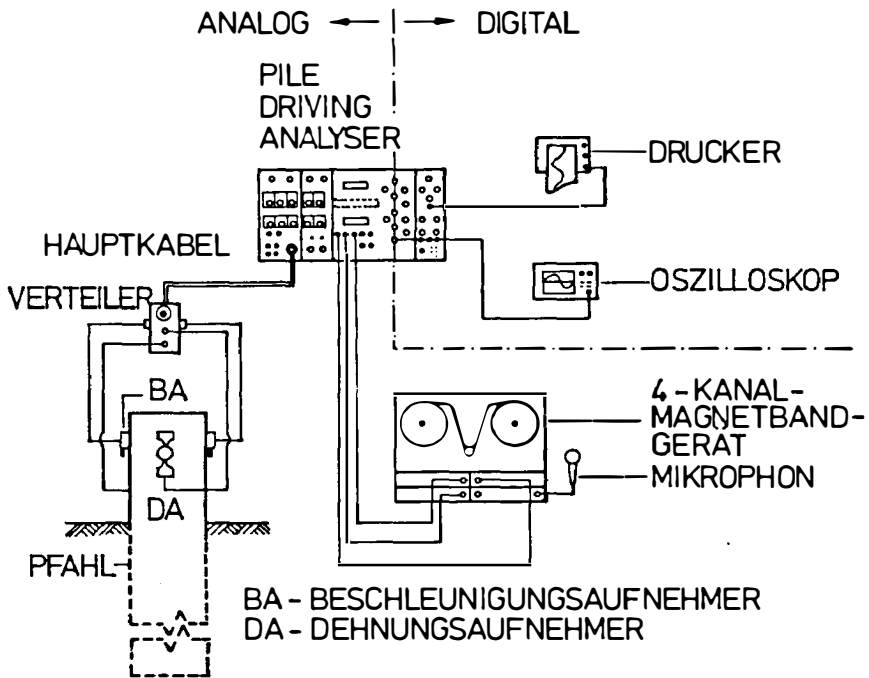


Bild 2: Dynamische Tragfähigkeitsbestimmung mit Pile Driving Analyser

3. Komponenten der Meßeinrichtung

3.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Darstellung kann nicht auf alle möglichen Meßeinrichtungen und damit verbundenen Teilaufgaben eingegangen werden. Statt dessen sollen die in der Bundesrepublik am weitesten verbreiteten Meßaufnehmer vorgestellt und die wesentlichen meßtechnischen Probleme erläutert werden. Zu einigen speziellen Meßbeispielen und Sonderanwendungen wird zum Schluß Stellung genommen.

3.2 Meßaufnehmer

3.2.1 Anbringung am Pfahl

Die mechanische Dauerbeanspruchung während der Pfahlrammung verlangt eine dauerhaft feste Verbindung zwischen den Meßaufnehmern und dem Pfahl. Nach dem Rammvorgang müssen die Aufnehmer abmontiert werden können, um für folgende Meßeinsätze bereitzustehen.

Bild 3 zeigt einen Beschleunigungs- und einen Dehnungsaufnehmer, die über Dübelschrauben mit einem Betonpfahl fest verschraubt sind. Es handelt sich um Aufnehmer der Firma Goble, Rausche & Associates, Inc. Cleveland/USA.

Diese lösbare Verbindung hat sich in der bisher 6jährigen Meßpraxis des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik bewährt. Bei Stahlpfählen kann das Gewinde direkt in das Pfahlmaterial geschnitten werden.

Um mögliche Biegeeffekte aus exzentrischer Pfahlrammung durch Mittelung ausgleichen zu können, werden die Aufnehmer in der Regel paarweise gegenüberliegend am Pfahl befestigt.

Die vier Meßstellen müssen in gleichem Abstand und mindestens zwei Pfahldurchmesser oder Seitenlängen vom Pfahlkopf entfernt angebracht werden. Die dynamische Tragfähigkeitsbestimmung von Pfählen beruht auf einer eindimensionalen Wellentheorie. Diese verlangt ebene Wellenfronten für die im Pfahl nach unten laufende Stoßwelle. Näherungsweise zwei Pfahldurchmesser vom Pfahlkopf entfernt dürfen eindimensionale Verhältnisse vorausgesetzt werden.

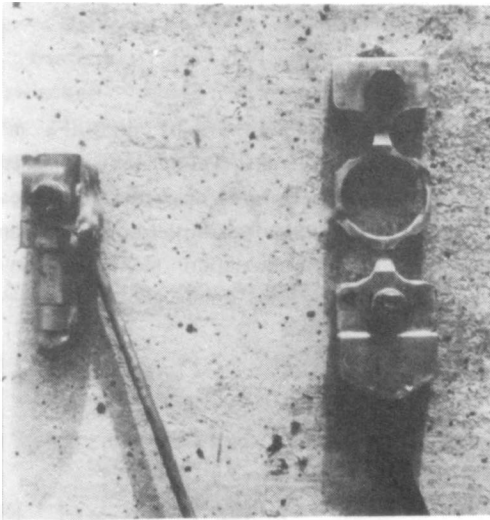


Bild 3: An einem Betonpfahl angeschraubte Dehnungs- und Beschleunigungsaufnehmer

3.2.2 Beschleunigungsaufnehmer

Zur Aufnahme des Bewegungsvorganges am Pfahlkopf hat sich die Beschleunigungsmessung als verlässlichste Methode durchgesetzt. Geschwindigkeitsaufnehmer für den maßgebenden Belastungs- und Frequenzbereich (0,2 Hz bis ca. 2500 Hz) stehen bisher nicht zur Verfügung, und eine Aufzeichnung des Zeitverlaufs der Verschiebung ist nur mit großem Aufwand möglich (Smoltczyk et al., 1976). Aus der gemessenen Beschleunigung lassen sich die Geschwindigkeit und Verschiebung durch analoge oder numerische Integration ableiten. Bei dieser Integration werden in der Beschleunigung enthaltene hochfrequente Störanteile herausgeglättet.

Wegen ihrer hohen Eigenfrequenz (20000 Hz bis 60000 Hz), ihrer Widerstandsfähigkeit bei mechanischer Beanspruchung (Meßbereich bis 5000 g = 50 km/s²) und der einfachen Signalverarbeitung haben sich piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer durchgesetzt.

Ihr Funktionsprinzip beruht auf dem piezoelektrischen Effekt gewisser Kristalle (z.B. Quarz) nach dem an einem solchen Kristall eine druckproportionale Spannung entsteht. In einem piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer ist eine Masse über eine Vorspannfeder mit Kristallscheiben verspannt (Bild 4). Bei Beschleunigung übt die Masse auf das Kristall einen beschleunigungsproportionalen Druck aus, der eine Spannung am Kristall auslöst. Diese beschleunigungsproportionale Spannung wird noch im piezoelektrischen Aufnehmer verstärkt und dann durch ein geschirmtes Kabel zur Meßstation geleitet. Durch Vorspannung der Masse wird es möglich, Beschleunigungen in beiden Richtungen aufzunehmen. Piezoelektrische Aufnehmer sind nicht in der Lage, konstante Beschleunigungen (z.B. die Erdbeschleunigung) zu messen; nur Beschleunigungsänderungen werden erfaßt.

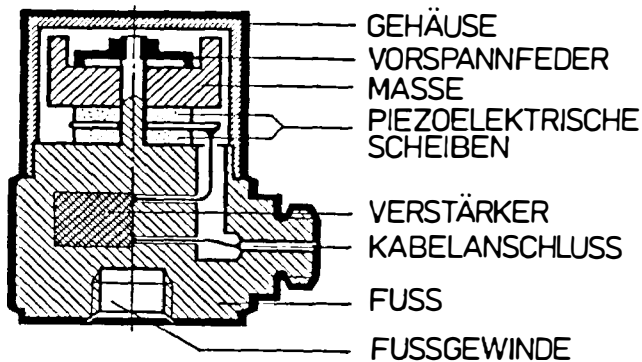


Bild 4: Prinzipskizze eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers

Zur Befestigung am Pfahl werden Beschleunigungsaufnehmer auf einem Plexiglas- oder Leichtmetallsockel angeschraubt (vgl. Bild 3). Zu beachten ist, daß dieser Sockel die Eigenfrequenz des Systems verändert. Er muß so bemessen sein, daß im maßgeblichen Frequenzbereich von 0,2 Hz bis etwa 2500 Hz keine Resonanzstellen liegen.

In Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Pfahltyp sind in Bild 5 die Anforderungen an den Frequenz- und den Meßbereich von Beschleunigungsaufnehmern zusammengefaßt.

Pfahltyp	min f	max f	Meßbereich max g
Stahlpfähle	0,2	2500	5000
Betonpfähle	0,2	2000	2000
	Hz	Hz	g

Bild 5: Anforderungen an den Frequenz- und Meßbereich von Beschleunigungsaufnehmern

3.2.3 Dehnungsaufnehmer zur Kraftmessung

Bei den heute üblichen Dehnungsaufnehmern (vgl. Bild 3) handelt es sich um mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) bestückte Leichtmetallaufnehmer, die das Ergebnis eines mehrjährigen Entwicklungsprozesses darstellen. Die grundsätzliche Entwicklungsarbeit wurde von Goble, Rausche & Associates, Inc. in Cleveland geleistet.

Für die Bestimmung der Längskraft F im Pfahl wird die Proportionalität von Dehnung ϵ und Kraft ausgenutzt. Der Proportionalitätsfaktor ist das Produkt aus Querschnittsfläche A und Elastizitätsmodul E des Pfahlmaterials:

$$F = EA \cdot \epsilon$$

Die Dehnungsaufnehmer werden an zwei Punkten fest mit dem Pfahl verschraubt. Zwischen den Befestigungspunkten befindet sich ein ringförmiges Mittelstück, an dessen Innenseite in der Mitte gegenüberliegend je ein DMS von etwa 3 mm Länge aufgeklebt ist (vgl. Bild 3). Gegen Witterungseinflüsse und mechanische Einwirkung sind die DMS durch einen Kunststoffüberzug geschützt.

Die Aufnehmer sind so konstruiert, daß eine Anbringung an Stahl- und Betonpfählen gleichermaßen schnell und sicher möglich ist. Über den gesamten zu erwartenden Dehnungsbereich von etwa 100 bis 1000 $\mu\text{m/m}$ (0,01 % bis 0,1 %) haben die Aufnehmer eine lineare Charakteristik.

Bei der DMS-Meßtechnik wird die vom Leiterquerschnitt abhängende Widerstandsänderung eines elektrischen Widerstandes unter mechanischer Beanspruchung ausgenutzt. Zwischen der auf den Ausgangswiderstand R bezogenen Widerstandsänderung und der Dehnung besteht die Beziehung

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon$$

Werden die DMS zu einer Wheatstone-Brücke zusammengeschaltet und mit einer Spannung U_E gespeist, so besteht zwischen Dehnung, Eingangs- und Ausgangsspannung die Proportionalität:

$$\frac{U_A}{U_E} \sim \epsilon$$

Bei dem in Bild 3 dargestellten Dehnungsaufnehmer sind zwei DMS zu einer sogenannten Halbbrücke zusammengeschaltet, die durch eine komplementäre, nicht dehnungsaktive Halbbrücke im Verstärker zur Temperaturkompensation ergänzt wird. Durch die Anordnung der DMS erfolgt außerdem eine automatische Biegemomentkompensation innerhalb des Aufnehmers.

3.2.4 Kalibrierung

Beschleunigungs- und Dehnungsaufnehmer werden vom Hersteller kalibriert und auf ihre Resonanzfrequenzen hin untersucht. Prüfzeugnisse, Kalibrierprotokolle und Angaben über die Eigenfrequenzen gehören daher zum Lieferumfang.

Durch fehlerhaften Einsatz oder übermäßige Beanspruchung können die Aufnehmer Linearitätsabweichungen oder Veränderungen der Kalibrierkonstanten erfahren. Um fehlerhafte Meßwertinterpretationen zu vermeiden, muß daher für den Benutzer eine Möglichkeit zur Überprüfung und eventuellen Nachkalibrierung bestehen.

Für jeden Rammschlag ergibt sich aus den wellenmechanischen Grundgesetzen im Anstiegsbereich zum ersten Peak der Belastung eine Proportionalität zwischen Kraft F und Geschwindigkeit v :

$$F = Z \cdot v = EA/c \cdot v$$

Darin ist Z die mechanische Impedanz des Pfahlquerschnitts und c die Wellengeschwindigkeit. Ist diese Bedingung im ersten Anstiegsbereich nicht erfüllt, so kann auf eine fehlerhafte Dehnungs- oder Beschleunigungsmessung geschlossen werden. Eine Nachkalibrierung sollte dann vom Hersteller oder mit einer benutzereigenen Kalibriereinrichtung vorgenommen werden.

Die Kalibrierung des Dehnungsaufnehmers kann auf verhältnismäßig einfachem Wege mit einem Rohrstück bekannter Längssteifigkeit erfolgen, indem der Aufnehmer an das Rohr angeschraubt und unter einer geeichten Prüfpresse kalibriert wird.

Für die Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern ist eine aufwendigere Technik erforderlich. Je nach den Genauigkeitsanforderungen sind verschiedene Meßanordnungen denkbar. Eine einfache Meßeinrichtung ist in Bild 6 dargestellt. Auf einem mit einem Schütteltisch ausgestatteten

Kalibrator ist der zu untersuchende Beschleunigungsaufnehmer befestigt. Der Kalibrator erzeugt eine Referenzbeschleunigung, und am Voltmeter kann die Kalibrierkonstante des Systems Beschleunigungsaufnehmer-Kabel-Verstärker abgelesen werden.

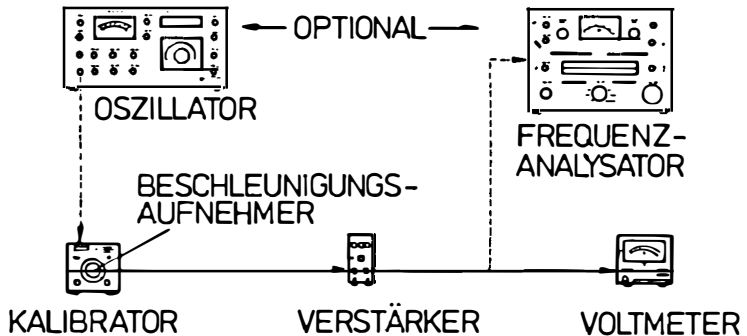


Bild 6: Einfache Kalibriereinrichtung für Beschleunigungsaufnehmer

3.3 Signalübertragung und Kabel

Solange die telemetrische Meßtechnik noch nicht genügend miniaturisierte Spannungsversorgungs- und Datenübertragungseinheiten zur Verfügung stellt, die am Pfahlkopf befestigt den Belastungen während des Rammens standhalten, müssen zur Meßsignalübertragung Kabel eingesetzt werden. Wie in den Bildern 1 und 2 dargestellt, werden die Kabel von den vier Aufnehmern am Pfahlkopf in einer Verbindungsbox zusammengefaßt und über ein vieladriges, geschirmtes und mechanisch geschütztes (u.U. zugfestes) Kabel zur Meßstation übertragen. Die Spannungsversorgung der Beschleunigungsaufnehmer und DMS erfolgt ebenfalls über dieses Kabel. Je Beschleunigungsaufnehmer werden zwei, je Dehnungsaufnehmer vier Adern beansprucht. Die Schirmung aller Kabel sollte vorzugsweise aus gewickelter Metallfolie bestehen. Alle Stecker müssen ebenfalls geschirmt und wasserdichtet sein.

Übertragungswege von 100 m können auf diese Weise erreicht werden. Bei Offshore-Projekten sind größere Strecken denkbar. In solchen Fällen müssen die Kapazitäten und Widerstände rechnerisch berücksichtigt werden. Hinweise darin finden sich in einschlägigen Handbüchern (z.B. Rohrbach, 1967).

3.4 Signalverarbeitung

3.4.1 Beschleunigungssignale

In der Pfahldynamik einsetzbare piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer sollten einen eingebauten Ladungsverstärker besitzen. Auf Spezialkabel kann dann verzichtet werden; die externe Spannungsversorgung (18 V - 24 V) kann mit Batterien erfolgen. Durch eine einfache Schaltung kann der Gleichspannungs-Nullwert (offset) ausgeschlossen werden.

Alle piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer besitzen eine geringfügige Nullpunktabweichung, d.h. den dynamischen Änderungen der Beschleunigungen überlagert sich ein kleiner, nahezu konstanter Beschleunigungsanteil. Dieser führt bei Integration zu einem linearen Fehler der Geschwindigkeit und parabolischen Abweichungen der Verschiebung mit der Zeit.

Da eine meßtechnische Ausschaltung des Fehlers auf der AufnahmeSeite bisher nicht gelungen ist, besteht nur die Möglichkeit einer nachträglichen rechnerischen Korrektur über die Bedingung, daß nach genügend langer Zeit die Geschwindigkeit des Pfahles auf Null abgefallen sein muß oder die durch doppelte Integration gewonnene Verschiebung mit der Setzung pro Rammschlag übereinstimmen muß.

3.4.2 Dehnungssignale

Für die Spannungsversorgung der DMS und die Verstärkung der Dehnungssignale sollten Gleichspannungsmeßverstärker eingesetzt werden. Sie bieten die Gewähr, daß auch Signalanteile mit hoher Frequenz (1200 Hz, Rausche, 1984) unverfälscht wiedergegeben werden.

Da Gleichspannungsverstärker eine Neigung zur Nullagenveränderung besitzen, sollte von Zeit zu Zeit oder zwischen den einzelnen Rammschlägen ein manueller oder automatischer Nullpunktausgleich erfolgen. Ein statischer Dehnungsanteil geht dabei verloren.

3.4.3 Filterung

Da auch Stör- und elektronische Rauschsignale, die sich den eigentlichen Meßsignalen überlagern, mitverstärkt werden, kann es notwendig werden, diese meist höherfrequenten Anteile meßtechnisch zu entfernen. Dies geschieht durch sogenannte Tiefpaßfilterung, bei der nur die Frequenzen unterhalb einer oberen Filterfrequenz übrigbleiben. Rausche (1984) nannte als absolute Untergrenze für die Tiefpaßfilterung 1500 Hz. Bei kurzen Pfählen oder Stahlpfählen sollte eine höhere Frequenz verwendet werden.

Bei der Entscheidung für eine Signalfilterung sollte beachtet und geprüft werden, inwieweit die Filterung zu einer Amplitudenreduzierung und Phasenverschiebung des Hauptanteils eines Signals führt.

3.5 Analoge Datenspeicherung

Die verstärkten Signale der Beschleunigungs- und Dehnungsaufnehmer werden in der Regel als kontinuierliches, dynamisches Rammprotokoll in analoger Form auf einem mindestens vierkanaligen Magnetbandgerät gespeichert. Die so gespeicherten Meßwerte stehen für spätere Auswertungen jederzeit zur Verfügung. Neuerdings sind auch Mehrkanal-Kassettengeräte technisch so ausgereift, daß sie für eine dauerhafte Datenspeicherung geeignet sind. Die Arbeitsweise geeigneter Magnetbandgeräte beruht auf dem Prinzip der Frequenzmodulation, bei der jedem Spannungsniveau eine bestimmte Aufzeichnungsfrequenz entspricht. Auf jeden Fall muß das Magnetbandgerät Frequenzen bis zu 2500 Hz erfassen können. Die kleinste zulässige Bandgeschwindigkeit hängt von der zu erwartenden Frequenzobergrenze in den Beschleunigungs-Zeitverläufen ab.

Bisher ist die Kapazität bei analoger Datenspeicherung noch deutlich größer als bei digitalen Speicherformen. Vermutlich werden in der Zukunft jedoch auf diesem Sektor noch erhebliche Fortschritte gemacht werden.

3.6 Analog-Digital-Wandlung

Wie in den Bildern 1 und 2 dargestellt, erfolgt die sogenannte Analog-Digital (A/D)-Wandlung in einem Pile Driving Analyser oder einem Transientenspeicher (Transientenrekorder). Bei dem Vorgang der A/D-Wandlung, der für die anschließende numerische Weiterverarbeitung von Meßwerten erforderlich ist, handelt es sich um die elektronische Umsetzung der kontinuierlichen Meßwert-Zeitverläufe (d.h. stetige Spannungs-Zeit-Verläufe) in diskrete Zahlenwerte, die digital (d.h. ziffernmäßig) für eine Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen.

Die A/D-Wandlung soll an einem einfachen Beispiel erläutert werden:

Beispiel: 8 bit-Digitalisierung (A/D-Wandlung)

bit 1	entspricht	2^0	=	1
bit 2	"	2^1	=	2
bit 3	"	2^2	=	4
bit 4	"	2^3	=	8
bit 5	"	2^4	=	16
bit 6	"	2^5	=	32
bit 7	"	2^6	=	64
bit 8	"	2^7	=	<u>128</u>
Summe				= 255

D.h., mit einer 8 bit-Darstellung wird der gesamte Meßbereich in 255 Teile geteilt; 128 entspricht der Nullage, 1 dem Minimum und 255 dem Maximum. Die erreichbare Genauigkeit beträgt etwa 0,4 %.

Eine 10 bit-Digitalisierung wäre $2^2 = 4$ mal genauer. Reichte z.B. der Meßbereich von -5 V bis + 5 V und läge eine Spannung von + 3 V an, so entspräche ihr ein digitaler Wert von $204 = 2^7 + 2^6 + 2^3 + 2^2$. Also wären die bits 8, 7, 4 und 3 im Innern des Transientenspeichers bei einer 8-bit Darstellung besetzt, während die restlichen unbesetzt blieben.

Dem Transientenspeicher kommen zwei Hauptaufgaben zu. Er hat zu einem definierbaren Moment Meßwerte über einen vorgebbaren Zeitbereich in digitaler Form zu erfassen und sie kanalweise in einem Speicher abzu-

legen. Über externe Steuerbefehle müssen diese digitalisierten Meßwerte anschließend abrufbar d.h. auf Linienschreibern oder x-y-Plottern darstellbar oder zu einem Tischcomputer übertragbar sein.

Die Aufzeichnung der Meßwerte in Transientenspeicher beginnt, wenn ein zuvor festgelegtes Spannungsniveau (Triggerlevel) in einem gewählten Meßkanal überschritten wird. Dabei ist auch die Speicherung der Vorgeschichte (Pretrigger) des Signals möglich (Bild 7). Neben der Kanalanzahl sind die Speicherlänge und die maximale Digitalisierungsfrequenz wesentliche Kenngrößen eines Transientenspeichers. Die Speicherlänge bestimmt die Anzahl der pro Kanal ablegbaren Meßwerte. Die Digitalisierungsfrequenz ist der Kehrwert des zeitlichen Abstandes der Einzelmeßwerte. Für dynamische Tragfähigkeitsprüfungen sollten mindestens zwei Kanäle mit 2000 Speicherplätzen ("2k-Speicher") und einer maximalen Digitalisierungsfrequenz von 1 MHz ($\min \Delta t = 1 \mu s$) zur Verfügung stehen.

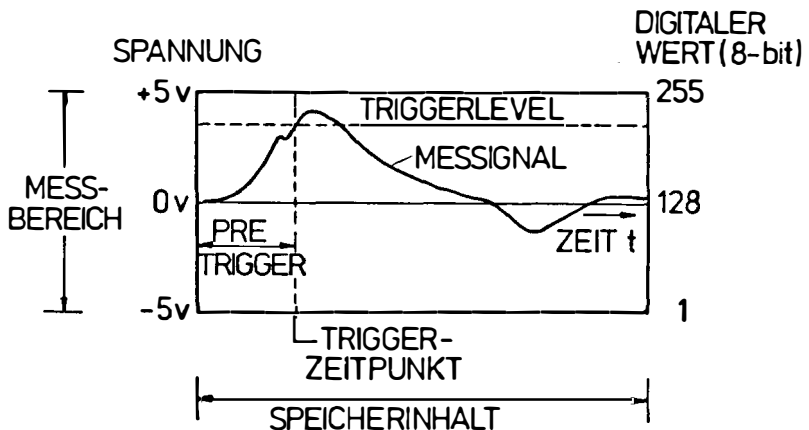


Bild 7: Arbeitsweise eines Transientenspeichers

3.7 Rechnerische Datenverarbeitung

Die im Speicher des Transientenrekorders vorliegenden Meßdaten stehen zur numerischen Weiterverarbeitung zur Verfügung. Durch entsprechende Software-Befehle können sie zu einem Tischrechner übertragen werden. Dort lassen sich dann auf numerischem Wege die Dehnungen in Kräfte umrechnen, die Beschleunigungs-Zeit-Kurven zur Geschwindigkeit und Verschiebung integrieren, Maxima und Minima bestimmen und Auswertungen der Pfahltragfähigkeit nach der Case- oder CAPWAP- Methode vornehmen. Die Case-Auswertung kann heute mit so großer Geschwindigkeit vorgenommen werden, daß die Entwicklung der Tragfähigkeit während der Pfahlrammung kontinuierlich beobachtet und aufgezeichnet werden kann. Mit dem Pile Driving Analyser ist eine Echtzeit-Auswertung für jeden Rammschlag möglich.

Mit Hilfe der rechnerischen Datenverarbeitung können weiterhin rammbegleitend die maximalen Druck- und Zugspannungen im Pfahl und die vom Rammsystem in den Pfahl eingeleitete Energie bestimmt werden. Bei unzulässigen Spannungen oder nicht ausreichender Effizienz des Rammsystems können also entsprechende Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Vom Tischcomputer aus wird auch der Ausdruck der wesentlichen Berechnungsergebnisse und die zeichnerische Darstellung der Meßkurven und des Tragfähigkeitsverlaufs auf einem Plotter gesteuert.

4. Störungseinflüsse

4.1 Meßtechnische Ursachen für Störungen

Bei dynamischen Pfahlmessungen können eine Reihe von Problemen auftauchen, die auf meßtechnische Einflüsse zurückzuführen sind.

Bei der Speisung der Meßgeräte durch die Baustellenstromversorgung oder einen Kleingenerator können Spannungsschwankungen zu Meßproblemen führen. Ihnen begegnet man zweckmäßigerweise mit einem Spannungskonstanthalter, der den Meßgeräten vorgeschaltet wird.

In der Umgebung von Baumaschinen, elektrischen Anlagen und Kabeln entstehen oft starke Felder, die bei unvollständiger oder zu schwacher Schirmung der Meßkabel und Steckverbindungen zu erheblichen Störungen der Messungen führen können.

Bei der Erdung des Meßsystems müssen Doppelerdungen vermieden werden.

Dehnungs- und Beschleunigungsaufnehmer müssen in trockener Umgebung gelagert werden. Auch feuchtegeschützte Aufnehmer sollten nicht über längere Zeit feuchter Witterung ausgesetzt werden, da andernfalls grobe Meßfehler möglich werden.

4.2 Mechanische Einflüsse

An erster Stelle ist hier das gelegentliche Losrütteln von Aufnehmern während der Pfahlrammung zu nennen. Es zeigt sich in den Meßkurven durch eine Dämpfung der Ausschläge und das Auftreten zusätzlicher Schwingungsanteile. Ist die Lockerung der Aufnehmer auf eine beginnende Zerstörung des Pfahlmaterials zurückzuführen, so sollten die Geber umgesetzt oder die Messung abgebrochen werden.

Erhält der Pfahlkopf durch exzentrische Schläge auch Querschwingungsanteile, so besteht für die Beschleunigungsaufnehmer eine erhöhte Beschädigungsgefahr, da sie bei Querbeschleunigungen empfindlich und fehlerhaft reagieren. Bei Stahlpfählen können unter Umständen auch Eigenschwingungen des Flansches oder der Stege die Meßergebnisse beeinflussen und die Beschleunigungsaufnehmer beschädigen.

Fehlerhafte Meßwertinterpretationen sind schließlich bei Auftreten von Pfahlbrüchen möglich, doch zeichnen sich diese deutlich in den Kraft- und Geschwindigkeitsverläufen ab und können so während der Rammung erkannt werden.

5. Genauigkeitsanforderungen

Für die dynamische Tragfähigkeitsprüfung von Pfählen kann eine Genauigkeitsanforderung von 5 % an die gesamte Meßkette für die Kraft- und Geschwindigkeitsbestimmung als ausreichend angesehen werden. Durch eine Kalibrierung der gesamten Meßkette aus Aufnehmer, Verstärker, Kabel, Transientenrekorder und Auswerteeinheit kann die Einhaltung der geforderten Genauigkeit geprüft werden. Eine wichtige Überprüfung auf der Baustelle ist der Nachweis der Proportionalität von Kraft und Geschwindigkeit im ersten Belastungsanstieg.

Die bei der Zeitauflösung notwendige Genauigkeit (Abtastintervall) kann mit modernen Transientenspeichern leicht erreicht werden.

Für Tragfähigkeitsbestimmungen reicht eine Digitalisierungsgenauigkeit von 8 bit (0,4 %) (vgl. 3.6) aus.

6. Meßtechnische Sonderfälle

Eine Reihe von Sonderfällen bei der dynamischen Tragfähigkeitsbestimmung von Pfählen spielen für Praxis und Forschung eine Rolle.

Zum einen ist die Messung von Kräften und Beschleunigungen an beliebigen Stellen von Stahl- und Ortbetonpfählen zu nennen. An Stahlrammpfählen wurden von Conrad/Meseck (1983) mit aufgeklebten Dehnungsstreifen Kräfte gemessen. Die Klebestellen und Kabel wurden durch angeschweißte U-Profile und Epoxidharz geschützt. Von Balhaus/Fruchte- nicht (1983) wurde die Ausstattung eines Modellpfahles mit DMS und Beschleunigungsaufnehmern beschrieben. Krause/Brieke (1985) beschrieben die Anbringung von Dehnungs- und Beschleunigungsaufnehmern an den Bewehrungskörben von Ortbetonpfählen. Das Bild 8 zeigt ein Beispiel.

Bei der dynamischen Prüfung von Großbohrpfählen mit einem krangeführten Fallgewicht werden nicht immer zentrische Rammschläge geführt. Wegen des großen Pfahldurchmessers sollten anstelle der sonst üblichen Aufnehmerpaare mindestens jeweils drei Beschleunigungs- und Dehnungsaufnehmer angebracht werden, um eine ebene Spannungsfläche im Meßquerschnitt bestimmen zu können.

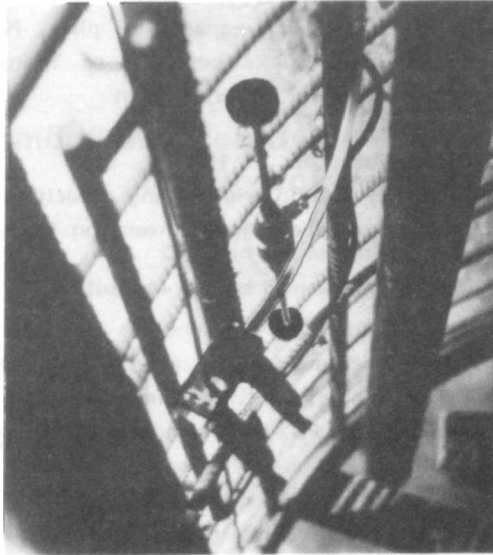


Bild 8: Anbringung von Dehnungsaufnehmern und einem epoxidharzvergossenen Beschleunigungsaufnehmer am Bewehrungskorb eines Großbohrpfahles (Krause/Brieke, 1985)

Literatur

Balthaus, H. u. Früchtenicht, H. (1983)

Modellversuche zur Ermittlung der statischen Tragfähigkeit von Pfählen aus dynamischen Messungen, Symp. Meßtechnik im Erd- und Grundbau, DGEG, München, November, S. 127-134

Conrad, P. u. Meseck, H. (1983)

Statische Probelastungen und dynamische Pfahltests an Stahlrammpfählen, Symp. Meßtechnik im Erd- und Grundbau, DGEG, München, November, S. 197-206

Goble, C.G., Rausche, F. u. Moses, F. (1970)

Dynamic studies on the bearing capacity of piles, Phase III, Project Report submitted to the Ohio Department of Transportation, Case Western University, Cleveland, Ohio, August

Koten, H., van u. Middendorp, P., (1981)

Equipment for integrity testing and bearing capacity of piles, Bredenberg, H., Application of Stress-Wave Theory on Piles, A.A. Balkema, S. 69-76, Rotterdam

Krause, T. u. Brieke, W. (1985)

unveröffentlichter Forschungsbericht an das Bundesministerium für Forschung und Technologie, Inst. für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig und Fa. Ph. Holzmann AG, Düsseldorf, März

Likins, G.E. (1984)

Field measurements and the Pile Driving Analyser, 2. Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, Mai, S. 298-305

Michigan State Highway Commission (1965)

A performance investigation of pile driving hammers and piles, Lansing, Michigan, März

Rausche, F. (1984)

Instrumentation, Measurements, Evaluation; Vorlesung anlässlich der 2. Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, Mai

Rohrbach, C. (1967):

Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen, VDI-Verlag, Düsseldorf

Smolczyk, U., van Koten, H., u. Hilmer, H. (1978)

Dynamische Untersuchung von Pfählen, Baumaschine und Bautechnik, 25, Nr. 2, S. 65-71.

Einsatzmöglichkeiten dynamischer Pfahltests bei Bohrpfählen

Dipl.-Ing. J. M. Seitz
Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft
Mannheim

1. Einleitung

Dynamische Pfahlprüfungen dienen dazu, das Tragverhalten unter vertikaler Belastung zu erfassen. Dabei interessieren besonders die Lastsetzungskurven, sowie die zu erwartende Traglast des Pfahls. Weiter möchte man wissen, welcher Lastanteil über Mantelreibung und welcher über den Spitzenwiderstand abgetragen wird. Aus dieser Zielsetzung ist ersichtlich, daß das Verhalten des Baugrundes den entscheidenden Einfluß hat. Daher sollte man versuchen, mit Hilfe einer großen Stoßbelastung die Grenztragkraft des Bodens zu aktivieren. Die Lasten erzeugen Dehnungen im Pfahl, die neben den Beschleunigungen gemessen werden, um eine Bestimmung der Bodenwiderstandskräfte zu erlauben. Neben geschlossenen Lösungen, die oft unzutreffende Vereinbarungen enthalten, werden beim CAPWAP-Verfahren bei der Auswertung die gemessenen Größen mit den Ergebnissen von einem Rechenmodell verglichen. In dieses werden Kennwerte wie z.B. maximale Mantelreibung, Spitzenwiderstand und Baugrunddämpfung eingeführt, die man von den für die Entwurfsbearbeitung erforderlichen Voruntersuchungen kennt. Falls die Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechengrößen unzurei-

chend ist, werden die freien Parameter des Baugrundes entsprechend verändert, bis eine befriedigende Übereinstimmung erzielt wird. Der iterative Berechnungsgang kann schwierig sein, wenn keine bleibende Eindringung des Pfahles während des Bruches erzeugt wird, oder wenn das Pfahlmaterial bzw. der Pfahlquerschnitt unbekannt variabel sind.

Mit den durch den dynamischen Versuch und den durch die Berechnung bestimmten Baugrundwerten kann anhand einer statischen Berechnung die Errechnung der Last-Setzungskurve sowie die Traglast ermittelt werden.

Eine sorgfältige Baugrunduntersuchung verbessert den Vertrauensbereich der Ergebnisse der dynamischen Probelastung und ist daher unerlässlich. Die Vorteile der dynamischen Prüfmethode gegenüber anderen Möglichkeiten, wie z.B. der statischen Probelastung, sind ihre Handhabung und ihre schnelle Durchführung. Sie ergänzt oder ersetzt die erprobte, aber teure und langwierige statische Probelastung sowie die herkömmlichen Berechnungen.

Die Grundlagen des Verfahrens wurden in einem umfangreichen Forschungsprojekt bei der Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft geschaffen. Die Vergleiche zu statischen Prüfungen verdeutlichen die Anwendbarkeit dieser wirtschaftlichen Prüfmethode.

2. Theoretische Grundlagen

Bei Tragfähigkeitsprüfungen von Pfählen müssen Lasten aufgebracht werden, die mindestens so groß wie die spätere Nutzlast sind. Durch ein fallendes Gewicht kann eine Last dieser Größenordnung verhältnismäßig einfach aufgebracht werden. Diese Kraft wirkt jedoch nur kurzzeitig (einige Millisekunden). Sie befindet sich im Gleichgewicht mit der beschleunigungsabhängigen Trägheitskraft, der geschwindigkeitsabhängigen Dämpfungskraft und der setzungsabhängigen, statischen Bodenwiderstandskraft, die gesucht wird. Die Ermittlung des Tragverhaltens, bzw. der Tragfähigkeit aus einer Stoßbelastung ist also möglich, wenn der Zusammenhang zwischen der Bewegung des Pfahles und den Kräften bekannt ist.

Für die Auswertungen werden die Verfahren CASE und CAPWAP herangezogen (s. Literatur).

Eine zahlenmäßige Auswertung mit dem CASE-Modell erfordert folgende Annahmen und Voraussetzungen:

1. starrplastisches Bodenverhalten
2. keine Entlastung
3. gleiche Querschnitte über die Pfahllänge
4. bekannte Dämpfung für den betreffenden Pfahltyp und Boden

Die Einschränkung des CASE-Verfahrens gelten bei dem sog. CAPWAP-Verfahren nicht (Case Pile Wave Equation Analysis Programm). Grundlage dieses Verfahrens ist die numerische Wellengleichung nach E.A.L. SMITH. Das System Pfahl-Baugrund wird hierbei durch diskrete Massen dargestellt, die durch Federn verbunden sind (Bild 1). Die Federn, die die Massen untereinander verbinden, haben eine Steifigkeit, die der Pfahlsteifigkeit in diesem Abschnitt entspricht ($k = EA/l$). Die zugehörigen Dämpfungselemente können die Werkstoffdämpfung des Pfahlmaterials erfassen. Die Federn, die die Massen mit dem festen Lager verbinden, repräsentieren den an jedem Element angreifenden Bodenwiderstand. Die Schub-Gleitungs-Charakteristik des Pfahlelements im Baugrund wird durch eine elastisch-plastische Feder angenähert (Bild 1). Im elastischen Bereich gilt für die Federsteifigkeit:

$$k_t = R_o / u_o$$

Überschreitet die Relativ-Verschiebung Pfahl-Boden den Wert u_o ("Quake"), so bleibt die Mantelreibung konstant. Für den Spitzenwiderstand wird ein entsprechendes elastisch-plastisches Gesetz angenommen, wobei allerdings keine negativen Werte zugelassen sind (keine Zugkraftübertragung) (Bild 2). Die elastische Entlastung kann nach dem Entlastungsmodul erfolgen, um spezielle Bodeneigenschaften zu erfassen.

Die zugehörigen Dämpfungselemente berücksichtigen die Abstrahlungsdämpfung. Bodenschichtung kann durch eine Variante der Konstanten erfaßt werden. Sind alle Parameter bekannt, insbesondere die Grenzverformung u_o ("Quake"), der Anteil am Bodenwiderstand R_o und die Dämpfungskonstante J für jedes Element, so kann die dynamische Reaktion des Pfahls auf eine gegebene Erregung (Stoßbelastung oder Anfangsgeschwindigkeit) berechnet werden.

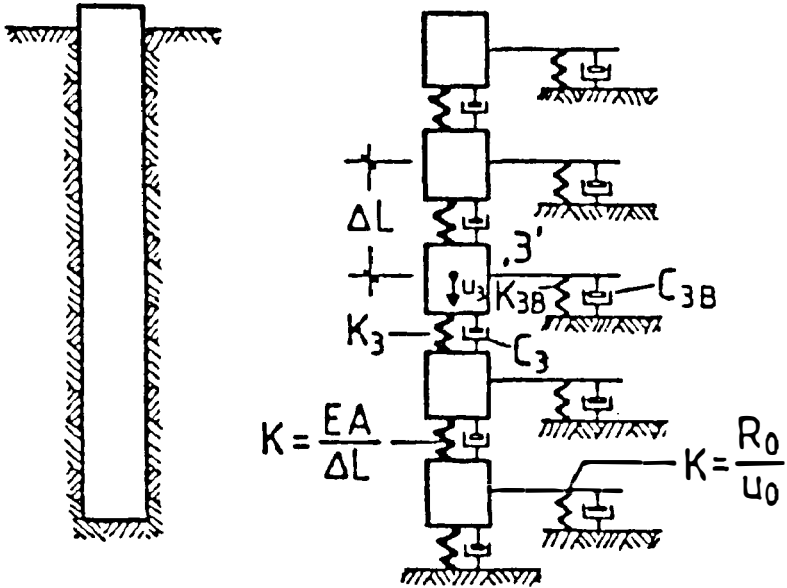


Bild 1: Modellbildung für CAPWAP-Berechnung

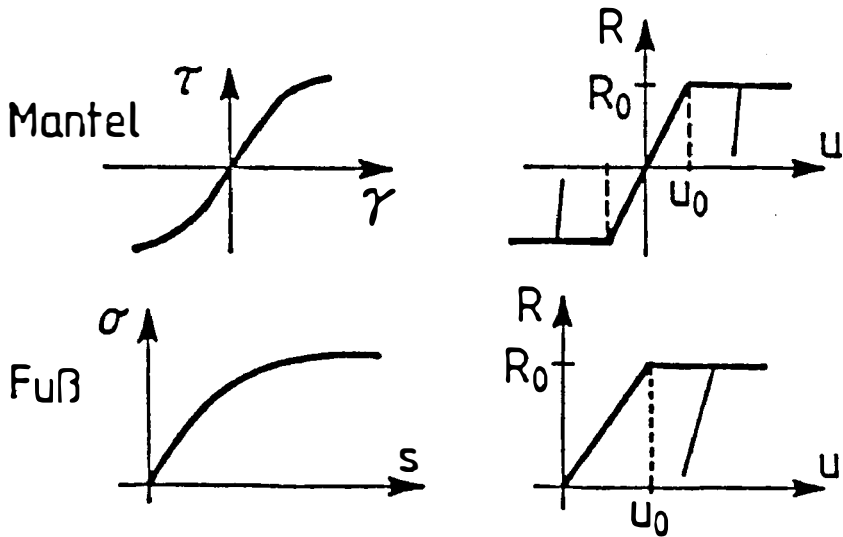


Bild 2: Spannungs-Verformungs-Beziehung für den Boden

Die Berechnung sieht wie folgt aus:

- Messung der Kraft $F(t)$ und Beschleunigung $a(t)$
- Integration von $a(t)$ zur Geschwindigkeit $v(t)$
- Berechnung $F_{cal} = F_{cal}(v(t), \text{Bodenwiderstandskräfte } w_i)$
- Verbesserung der Bodenwiderstandskräfte w_i
- 1. Iteration + weitere Iterationen

Die Berechnung wird soweit vorangetrieben, bis eine Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der gerechneten Kurve vorliegt. Für die Beurteilung wird dazu ein Fehlerintegral errechnet.

Das Ergebnis ist eine Aussage über die Pfahlbewegung, die Bodenwiderstandskräfte und die Pfahlkopfkraft.

Wegen der nichtlinearen und unstetigen Bodenkennlinie kann die Konvergenz des Verfahrens nicht analytisch bewiesen werden.

Die Anwendung von Strategien zur Verbesserung und Beschleunigung des Iterationsverfahrens wurde und wird diskutiert (KLINGMÜLLER).

Nachdem die CAPWAP-Berechnung durchgeführt ist, steht das Pfahl-Boden-Modell für die statische Berechnung einer Lastsetzungs-Kurve zur Verfügung. Dieser Berechnungsgang ist mit dem statischen Belastungsversuch vergleichbar und wird daher oft als ein "simulierter statischer Belastungsversuch" bezeichnet.

Die Berechnung erfolgt durch die inkrementelle Belastung des Pfahls am Kopf. Für die statische Berechnung wird das gleiche Pfahlmodell wie bei der CAPWAP Berechnung verwendet.

Für sämtliche CAPWAP-Ergebnisse werden Grenzbetrachtungen mit unterschiedlichen Verteilungen der Mantelreibung und des Spitzendruckes sowie der statischen Widerstandskräfte Q_g , CAPWAP vorgenommen. Damit wird ein minimaler Fehlerwert bei der Anpassung zwischen der gemessenen und gerechneten Kurve erreicht.

Gegenüber dem CASE-Verfahren ist das CAPWAP-Verfahren in der Lage, die Dämpfungsanteile am Bodenwiderstand genauer zu erfassen und das statische Tragverhalten auch für die Fälle sicher zu beschreiben, in

denen keine Erfahrung bezüglich des Dämpfungseinflusses besteht. Weiterhin kann die Lastabtragung über die Pfahllänge ermittelt werden. Mit den Werten für den Bodenwiderstand in verschiedenen Ebenen kann auch eine theoretische Lastsetzungskurve berechnet werden.

Schwierigkeiten sind zu erwarten, wenn die Pfahleigenschaften aufgrund der Herstellungsart und der Bodenverhältnisse nicht exakt vorgegeben sind, weil sich dadurch die Anzahl der zu bestimmenden Parameter wesentlich erhöht.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Meß- und Versuchsgeräte

Die dynamischen Versuche werden mit der bei Bilfinger + Berger entwickelten Versuchseinrichtung durchgeführt (Bild 3). Diese besteht aus den Teilen:

- 0,8-10 to Fallgewicht aus Stahl
- mechanische Ausklinkvorrichtung
- Schlaghaube mit Filz- und Holzplatten
- Lastverteilungsplatte
- Führungs- und Schutzrohr

Bei der dynamischen Tragfähigkeitsprüfung an den Pfählen werden Messungen der Beschleunigung $a(t)$, der Kräfte $F(t)$ – über die Dehnungen $\epsilon(t)$ – und der bleibenden Pfahlverformungen s_{bl} während bzw. nach jedem Stoß vorgenommen. Die Setzungsmessungen werden mit einem Nivelliergerät durchgeführt.

Die Kalibrierung der Meßgeräte und -wertaufnehmer erfolgt jeweils vor den Versuchen. Ausführlich sind die u.a. Geräte an anderer Stelle beschrieben:

- Beschleunigungsaufnehmer
- Dehnungsaufnehmer
- Signalverstärker, - aufnahmegeräte
- Oszilloskop
- Rechenanlage zur Weiterverarbeitung

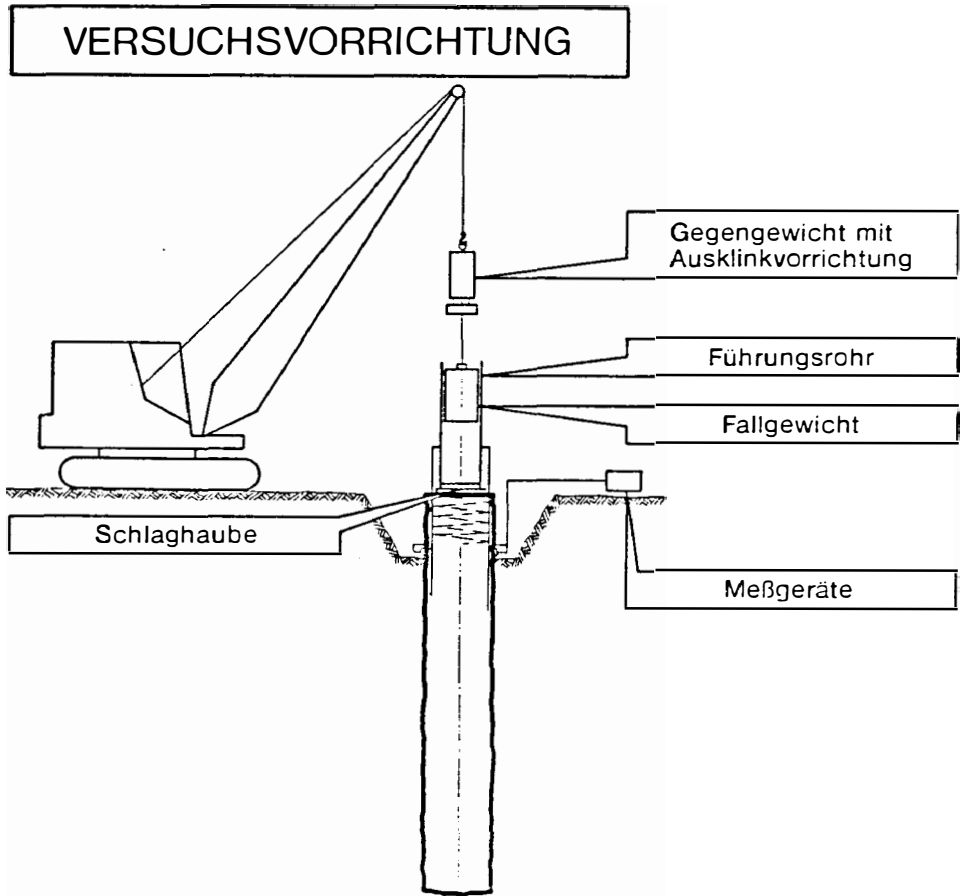


Bild 3: Versuchseinrichtung

3.2 Durchführung

Die Beschleunigungs- und Dehnungsaufnehmer werden für die Messung in einem Abstand von max. $1-1,5 \times D$ vom Pfahlkopf auf den lastabtragenden Beton am Pfahlschaft paarweise und gegenüberliegend an-

gedübelt. Diese Tiefenlage ergibt sich aus der Forderung, daß ab ca. $1,0 \times$ Pfahldurchmesser unterhalb der Stoßeinleitung die Druckwelle als ebene Front den Querschnitt durchwandert.

Das Fallgewicht wird für die Prüfung mit einem Bagger o.ä. auf die erforderliche Fallhöhe angehoben und durch Feststellbremse der Seiltrommel bzw. der Ausklinkvorrichtung fallen gelassen. Für die Versuche werden unterschiedliche Fallhöhen eingesetzt.

Für den Pfahl sind keine Zusatzmaßnahmen erforderlich. Da der Stoß meist als Teilflächenbelastung anzusehen ist, ist zur Abdeckung der Spaltzugkräfte aus der Stoßdruckkraft in der Regel eine Verstärkung der Wendelbewehrung vorzunehmen. Das Aufbringen einer Ausgleichsschicht auf den Pfahlkopf ist empfehlenswert.

Der Bruchzustand kann bei Bohrpfählen mit größeren Durchmessern unter statischer Belastung nicht genau definiert werden und setzt je nach den Bodenverhältnissen sehr große Verschiebungen voraus. Für die Gebrauchslast ist in den meisten Fällen die zulässige Setzung ausschlaggebend. Es ist daher nicht unbedingt erforderlich, einen Bruchzustand zu erreichen. Das gilt auch für die dynamischen Stoßprüfungen.

Für die Durchführung der Stoßbelastungen sind eine geeignete Stoßhaube und das Fallgewicht festzulegen - "harter und weicher Stoß". Bei den Versuchen sind

- Versuchszeitpunkt,
- Fallhöhe,
- Stoßfolge,
- Anzahl der Stöße und
- Setzungen

zu protokollieren. Für die Auswertungen sind Baugrundaufschlüsse, das Baugrundgutachten, das Protokoll der Pfahlherstellung sowie der Prüfbericht für den Pfahlbeton zu beachten.

Die Anzahl und Reihenfolge der Stoßversuche ergibt sich aus der Forderung:

- a) das dynamische Verhalten systematisch zu erfassen
- b) die Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten und
- c) eine möglichst hohe statische Widerstandskraft ohne Beschädigung des Pfahles zu wecken.

Mit den dynamischen Versuchen wird neben der Größe und Verteilung von Mantelreibung und Spitzendruck auch die Lastsetzungslinie bestimmt.

4. Messung und Auswertung

Für die Auswertung sind die Messungen der Beschleunigungen $a(t)$ und der Kraft $F(t)$ - über die Dehnungen - am Pfahlkopf erforderlich.

Die Beschleunigungsmessung erfolgt über piezoelektrische Aufnehmer und die Dehnungsmessung über resistive Dehnungsaufnehmer. Für die Umrechnung der Dehnungen in Kräfte wird der Elastizitätsmodul angenommen, der durch eine horizontale Durchschallung, Rückprallhammer (DIN 1048), Integritätsprüfung oder aus Betonproben ermittelt wurde.

Die Funktion der Verstärkung, Filterung und Weitergabe der Meßsignale erfolgen über analoge und digitale Meßgeräte, wie z.B. den Pile Driving Analyser - PDA - oder ein Speicheroszilloskop mit Zusatzgeräten. Durch eingebaute Prozessoren können die Meßwerte der Dehnungen in Kräfte umgerechnet und die Beschleunigungen zur Geschwindigkeit integriert werden. Nach Feststellung von Maximalwerten kann aus der Kraft und der mit der Impedanz $I = EA/c$ multiplizierten Geschwindigkeit sofort der dynamische Widerstand nach dem CASE-Verfahren ausgegeben werden, bei Vorgabe von Dämpfungswerten auch eine statische Tragfähigkeit.

Zur Reproduktion und Speicherung der Daten wird neben einem magnetischen Bandgerät das o.a. Oszilloskop eingesetzt, das auch zum Überwachen des Stoßvorganges vor Ort dient.

Zur Weiterverarbeitung werden die Zeitverläufe der Meßkurven abgerufen und in einem Computer digital gespeichert. Die Digitalisierungsrate ist

dem Frequenzgehalt der Signale anzupassen. Eine Abtastrate von 8000 Punkten pro Sekunde ist in der Regel ausreichend. Für die weiteren Auswertungen stehen eine Reihe von Programmen zur Verfügung.

Die Kalibrierung der Aufnehmer erfolgt über neu entwickelte statische und dynamische Kalibrierstände, wobei die gesamte Meßkette vom Aufnehmerort bis zum Signalzwischenspeicher durchgeprüft wird.

Im einzelnen seien folgende Berechnungsprogramme genannt:

PROCES Digitalisieren der Zeitverläufe, Ausgabe der maximalen Werte der Beschleunigung, Geschwindigkeit, Pfahlkopfkraft und Zeichnen der Kurven auf dem Plotter, Berechnung der CASE-Tragfähigkeit für verschiedene Dämpfungswerte, Berechnung der Zugspannungen und des Integritätswertes.

HAMPRO Bestimmung der Zug- und Druckwellen

CAPWAP Berechnung nach dem CAPWAP- oder WAPCAP-Verfahren, Ausgabe aller Zustandsgrößen und Ermittlung der theoretischen, statischen Lastsetzungskurve

DYP4/DYP6 Simulationsprogramme zur Stoßwellenausbreitung

Bei der Berechnung nach dem CASE-Verfahren werden in der Regel alle Stöße ausgewertet, bei der CAPWAP-Berechnung jeweils der Stoß mit der größten Widerstandskraft und ausgeprägter F- und v-Kurve.

Anhand der Abweichung des Zeitverlaufs der Geschwindigkeit $v(t)$ von der Kraft $F(t)$ läßt sich eine erste qualitative Aussage über die wesentliche Art der Lastabtragung - Spitzendruck bzw. Mantelreibung - des Pfahles treffen.

4.1 CASE

Zu Beginn der Versuche an Bohrpfählen waren Fragen zu beantworten, welches Verhalten unter einem Stoß zu erwarten ist. Neben den Stoßenergien zur Erzeugung ausreichender dynamischer und bleibender Setzungen ging es auch um die aus der Rammtechnik bekannten Rammwiderstände Q_{dyn} .

Die Ermittlung der effektiven im Pfahl verbliebenen Stoßenergie im Meßquerschnitt erfolgt aus den Meßwertreihen $F(t)$ und $v(t)$ nach

$$w_{\text{eff}} = \int F(t) \cdot v(t) dt$$

Die Angabe der potentiellen Energie w_{pot} ist aufgrund der auftretenden Verluste im Belastungssystem und am Pfahlkopf, die bis zu 90 % der potentiellen Fallenergie betragen können, nicht für Vergleiche geeignet. Für Einzelstöße wird daher w_{eff} den bleibenden Pfahlsetzungen - errechnet aus der doppelten Integration der gemessenen Beschleunigung, bzw. aus Vergleichsuntersuchungen mit einem Feinnivellement - gegenübergestellt.

Damit lassen sich die Pfähle in ihrem Widerstandsverhalten zu anderen statisch und dynamisch untersuchten Großbohrpfählen bereits zuordnen (SEITZ/KLINGMÜLLER).

Bei Rammpfählen ist es in der Praxis zulässig, Rammformeln für die Beurteilung der dynamischen Tragfähigkeit einzusetzen, wobei diese dann an einer statischen Probelastung geeicht werden. Die Auswertung der dynamischen Rammwiderstände bei den Bohrpfählen erfolgt aus den Kurven $F(t)$ und $v(t)$

$$Q_{\text{dyn}} = (1/2) (F_1 + F_2) + (EA/2c) (v_1 - v_2)$$

Danach ergibt sich, daß mit zunehmender bleibender Setzung pro Stoß die dynamische Pfahlwiderstandskraft anwächst. Beispiele siehe Bild 4 und 5.

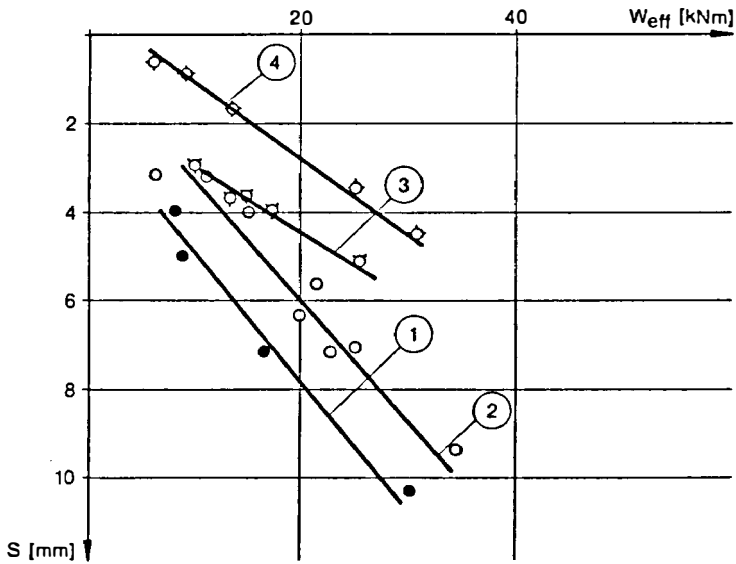


Bild 4: Effektive Stoßenergie und bleibende Pfahlsetzung für vier Pfähle nach SEITZ/KLINGMÜLLER

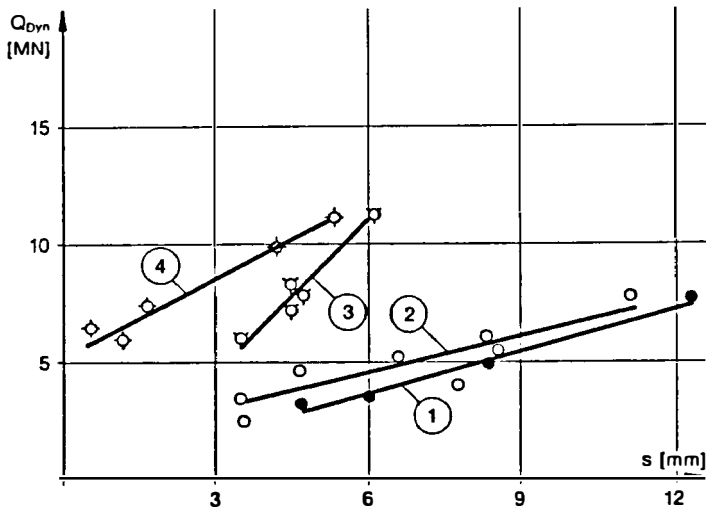


Bild 5: Dynamische Pfahlwiderstandskraft und bleibende Setzung zu Bild 4

Der Grund liegt in einem Anwachsen der Steifigkeit des Systems Bohrpfehl-Boden. Daher ist es empfehlenswert, den 1. bzw. 2. Stoß einer Belastung für die Auswertung auszuwählen.

Bei den Untersuchungen wird auf die Angabe eines Dämpfungsbeiwertes J sowie die Berechnung der Mantelreibung nach dem CASE-Verfahren verzichtet, da diesem Berechnungsmodell Vereinfachungen zugrundeliegen, die für Bohrpfähle im allgemeinen nicht zutreffend sind. Sie werden lediglich zu einer qualitativen Beurteilung herangezogen.

4.2 CAPWAP

Die Auswertung mit dem CAPWAP-Verfahren ist sehr viel aufwendiger als mit dem CASE-Verfahren (s.a. Kapitel 2).

Die iterative Anpassung der berechneten an die gemessene Kurve kann zahlreiche Schritte der Modellverbesserung erfordern. Dies kann je nach Hardwarekonfiguration und Erfahrung des Bearbeiters im Einzelfall mehrere Tage dauern.

Abgesehen davon, daß das Ergebnis mehr Informationen über die Lastabtragung bietet, stützt es sich nicht nur auf Empirie, sondern vor allem auf eine im Rahmen der Mechanik und Bodendynamik vermittelbare Theorie.

Die Auswertung nach dem CAPWAP-Verfahren liefert als Ergebnis:

- den durch die Stoßbelastung aktivierten statischen Bodenwiderstand
- die Lastsetzungskurve für Pfahlkopf und Pfahlfuß
- die Verteilung der Mantelreibung
- den Verlauf der Stoßwelle im dynamischen Versuch

Aus dem Verlauf der Stoßwelle ergibt sich unter anderem die Größe und der Ort der maximalen Zugspannung.

In Bild 6 ist eine CAPWAP-Auswertung ausführlich dargestellt.

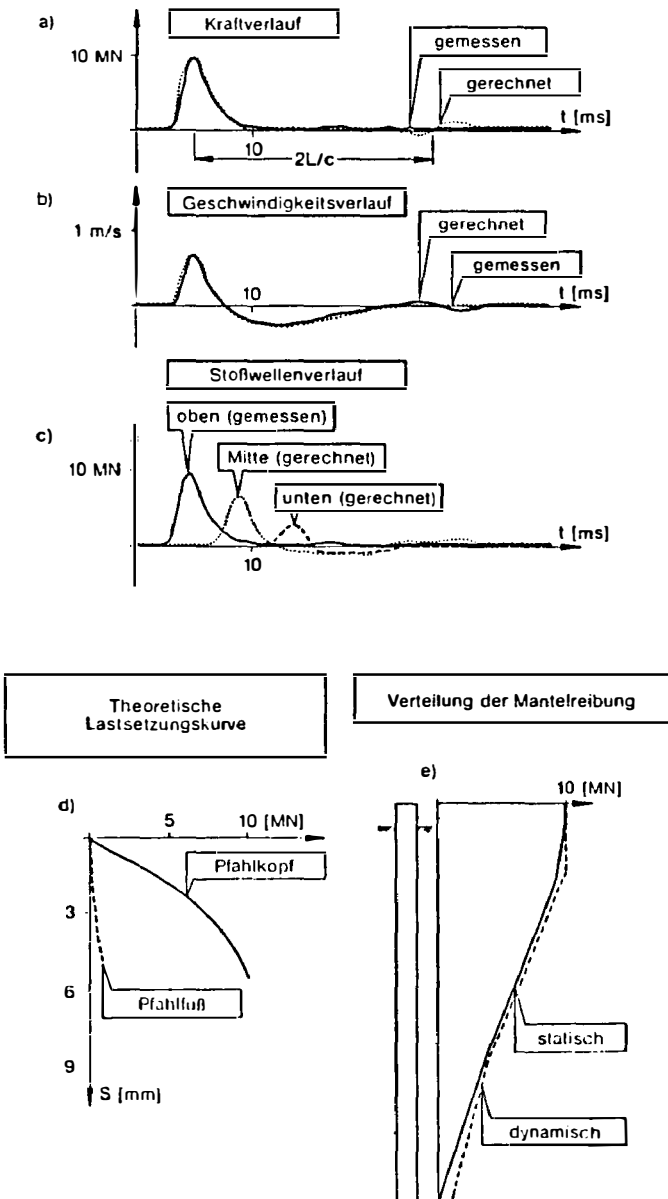


Bild 6: CAPWAP-Berechnung

Dieses Ergebnis zeigt, daß das System Pfahl-Boden durch das Modell genügend genau beschrieben wird. Die Ergebnisse sind im wesentlichen konsistent mit den Ergebnissen statischer Versuche.

Daß das CAPWAP-Verfahren auch für schwierige Pfähle einsetzbar ist, zeigt das Beispiel der im Rahmen eines Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche an Pfahl-Stützen-Systemen.

Wie im statischen, so ist es auch im dynamischen Versuch schwierig, bzw. in vielen Fällen unmöglich, die Bruchlast zu erreichen. Besonders bei Großbohrpfählen tritt ein ausgeprägter Bruch häufig nicht auf, so daß es zahlreiche unterschiedliche Ansätze für die Definition einer Bruchlast bzw. einer Grenzlaster gibt.

Gemäß dem Vorschlag bei SEITZ/KLINGMÜLLER erscheint es zunächst zweckmäßig, die aus den dynamischen Versuchen errechneten Steifigkeiten den aus den statischen Versuchen gegenüberzustellen (Bild 7).

Nachfolgend werden Beispiele für die Anwendung dynamischer Pfahltests vorgestellt.

5. Beispiele

5.1 Statische und dynamische Vergleichsuntersuchungen bei Großbohrpfählen

Umfangreiche Versuchsergebnisse von statischen und dynamischen Versuchen wurden zur Baugrundtagung 1984 vorgestellt (SEITZ/KLINGMÜLLER). Hierbei wurden Pfähle mit Durchmesser von 0,7-1,5 m und Längen von 4,1-30,2 m untersucht. Die Pfähle waren in der Regel vorher statisch belastet und standen in bindigen und rolligen Bodenarten. Bei den gemessenen Maximalsetzungen kann davon ausgegangen werden, daß der überwiegende Anteil der aktivierten Widerstandskräfte aus der Mantelreibung resultierte. Zwischen der effektiven Stoßenergie und der bleibenden Pfahlsetzung ergab sich eine nahezu lineare Beziehung, wie dieses auch bei der dynamischen Pfahlwiderstandskraft Q_{DYN} und der bleibenden Setzung festgestellt wurde.

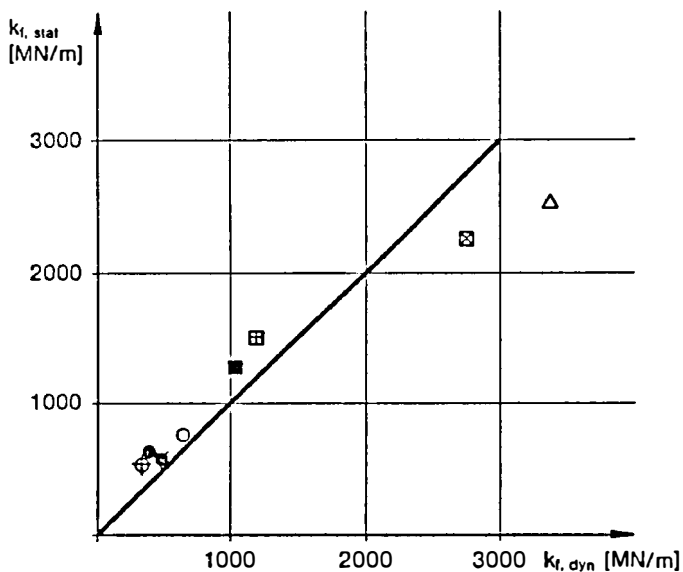


Bild 7: Vergleich der Steifigkeiten aus statischen und dynamischen Versuchen

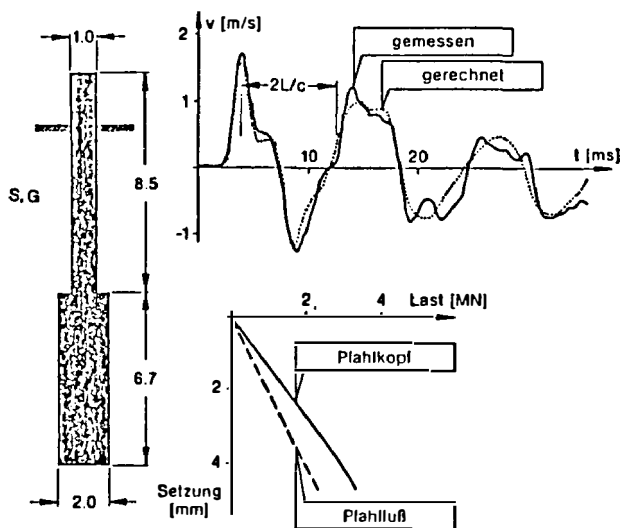


Bild 8: CAPWAP-Berechnung für ein Stütze-Pfahl-System

Bei der Verteilung der Mantelreibung über die Pfahllänge, die nach CAPWAP ermittelt wurde, zeigte sich eine zu den Ergebnissen statischer Versuche konsistente Verteilung.

Ein wichtiges Beurteilungskriterium für die Anwendbarkeit des dynamischen Verfahrens ist die Gegenüberstellung der Steifigkeit der letzten statischen Wiederbelastung zu dem Ergebnis der dynamischen Probelastung. Bei dem Vergleich sind die Abweichungen weder nach Größe noch nach dem Vorzeichen einheitlich.

Eine Tendenz in den Abweichungen kann erst nach Vorliegen von einer statistisch relevanten Anzahl von Versuchen festgelegt werden. Dann ist auch die Möglichkeit der Interpretation unter Zuhilfenahme bodendynamischer Kenntnisse gegeben.

Die bei den Versuchen aktivierten Spitzenwerte der Mantelreibung bestätigen, daß im Gebrauchslastbereich ein nicht zu unterschätzender Teil der Last durch Mantelreibung abgetragen wird.

Neben Untersuchungen an Bohrpfählen mit konstantem Querschnitt wurde – auch als Beispiel für den erweiterten Anwendungsbereich des CAPWAP-Verfahrens gegenüber CASE – ein abgestuftes Stütze-Pfahl-System untersucht (Bild 8).

Diese Art von Bauwerkspfählen wurde im Rahmen des BMFT-Forschungsvorhabens am Hauptbahnhof Düsseldorf geprüft. Die erhebliche Querschnittsvergrößerung beim Übergang von der Stütze zum Pfahl führt dazu, daß bei dem gezeigten Stoßversuch nur ein geringer Teil des Bodenwiderstandes aktiviert werden konnte. Die Spannungszunahme an der Querschnittserweiterung beschränkte die zulässigen Fallhöhen bzw. Stoßenergien.

Mit diesen vom BMFT teilweise geförderten Versuchen an Großbohrpfählen wurden die Grundlagen für dynamische Versuche an Großbohrpfählen geschaffen.

5.2 Mantel- und fußverpreßte Großbohrpfähle

Im Rahmen eines Großversuches der Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft wurden an 5 Bohrpfählen von 120 cm $\varnothing$ verschiedene Methoden zur Verringerung der Pfahlsetzungen bzw. zur Erhöhung der Pfahltragkraft erprobt. Die Pfähle wurden nach den statischen und dynamischen Versuchen freigelegt, um u.a. eine optische Prüfung vornehmen zu können (KRUBASIK). Die dynamische Belastung erfolgte mit einem 5 t-Fallgewicht; die potentielle Stoßenergie betrug einheitlich 20,5 tm. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

CASE

Bei einem Dämpfungsbeiwert für die vorhandenen Sande und Kiese von $J = 0,1$ ergaben sich statische Widerstandskräfte von 10,1-17,4 MN. Der Vergleich der effektiven Stoßenergie - ca. 20-30 % der potentiellen - zu dem dynamischen und statischen Widerstand und zu den bleibenden Setzungen zeigt eine Linearität (s.a. Kap. 5.1). Die CASE-Auswertung dient dazu, bei Versuchen an ähnlichen Pfählen bei der Messung auf der Baustelle eine erste Abschätzung der Traglast vornehmen zu können. Die eingeleiteten Kräfte reichen nicht aus, um die Grenzmantelreibung zu wecken. Die Setzungen erreichten Werte bis zu 4 mm/Stoß. Die Mantelreibung nach CASE liegt in allen Fällen unter den Werten aus den statischen Versuchen. Bei gleicher Stoßenergie werden die Setzungen bei nachfolgenden Stößen kleiner, während sich die spezifische Mantelreibung vergrößert.

CAPWAP

Die CAPWAP-Untersuchungen lieferten

- Pfahlfußsetzungen (Bild 9)
- Mantelreibung (Bild 10)
- Lastsetzungen (Bild 11).

Die Pfahlfußsetzungen wurden den statischen Ergebnissen gegenübergestellt. Hierbei ergibt sich eine hinreichend genaue Übereinstimmung. Neben den fünf mantel- und fußverpreßten Pfählen wurde ein Vergleichspfahl ohne und mit Injektion untersucht. Die Mantelreibung bleibt unter den Werten der statischen Versuche; weitere Einzelheiten dazu siehe bei KRUBASIK.

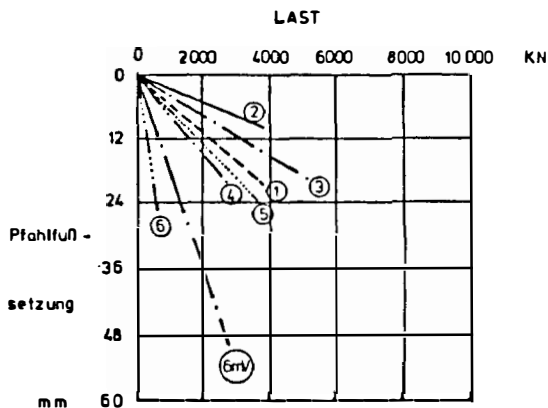


Bild 9: Pfahlfußsetzungen

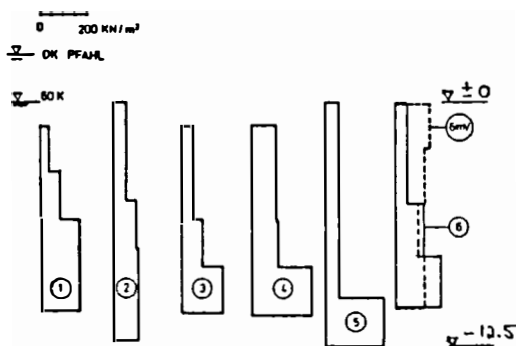


Bild 10: Mantelreibung

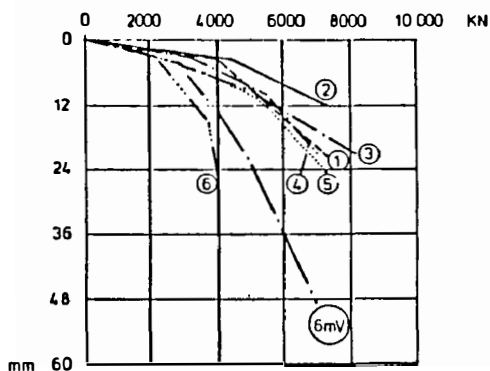


Bild 11: Lastsetzungen

Die Lastsetzungen liegen im Erfahrungsbereich bisheriger Versuche. Bei der Auswertung der Systemsteifigkeit ergab sich, daß zwei wesentliche Lastbereiche zu unterscheiden sind: 0-4000 kN und 4000 kN bis zur Grenzlaster nach CAPWAP.

Mit diesen Untersuchungen kann bei vergleichbaren Baugrundverhältnissen und Pfählen auf statische Prüfungen weitestgehend verzichtet werden. Die Pfahlfußsetzungen, -kopfssetzungen und die Mantelreibung lassen sich über die Größe statischer Werte hinaus nachweisen und weisen dabei ausreichende Sicherheiten aus.

5.3 Probebelastungen an Ortbetonrammpfählen

Für das Gründungsvorhaben der Schwarzenbach-Talbrücke im Bereich der Neubaustrecke der DB Hannover - Würzburg wurden statische und dynamische Probebelastungen an Ortbetonrammpfählen durchgeführt (OTTO/SEITZ). Im wesentlichen liegen die Pfähle im Lößlehm. Die dynamischen Versuche erfolgten mit einem Fallgewicht von 3,83 t; die Auswertung nach CASE und CAPWAP (Bild 12 und 13).

Die Berechnungen nach CASE wurden für verschiedene Dämpfungsfaktoren bis $J = 0,4$ durchgeführt. Die Ergebnisse führten zu Werten, die z.T. erheblich über den angesetzten Grenzlaster liegen.

Aussagekräftiger waren die Berechnungen nach CAPWAP. Eine Gegenüberstellung zeigt, daß die Ergebnisse der dynamischen Belastung recht gut mit denen der statischen übereinstimmen. Die Mantelreibung aus dem CAPWAP-Verfahren kann bei diesen Pfählen nach (OTTO/SEITZ) als abgesichert gelten (Bild 14).

Die Streubereiche zwischen den statischen und dynamischen Versuchsergebnissen - Last-Setzungslinie und Steifigkeiten - sind gering (Bild 15). Eine statistische Absicherung für die vorliegenden Ergebnisse reicht jedoch nicht aus.

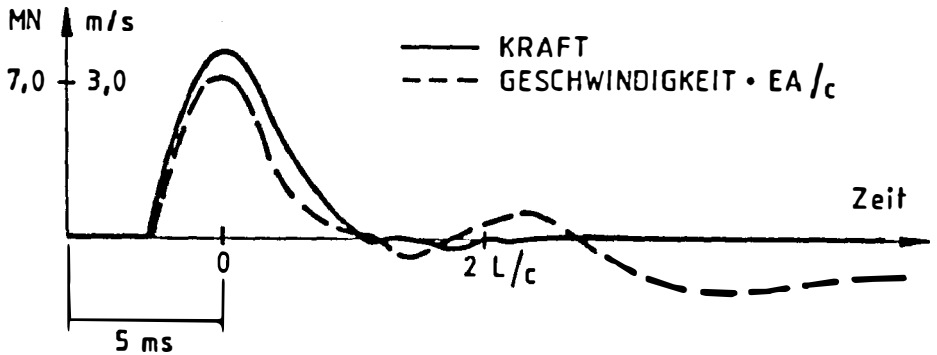


Bild 12: Meßergebnis der Stoßprüfung

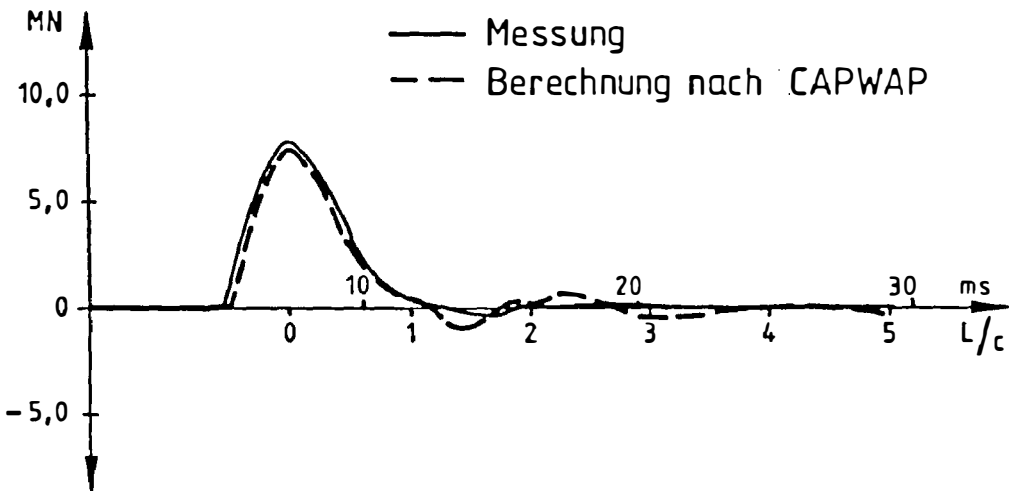


Bild 13: CAPWAP-Berechnung

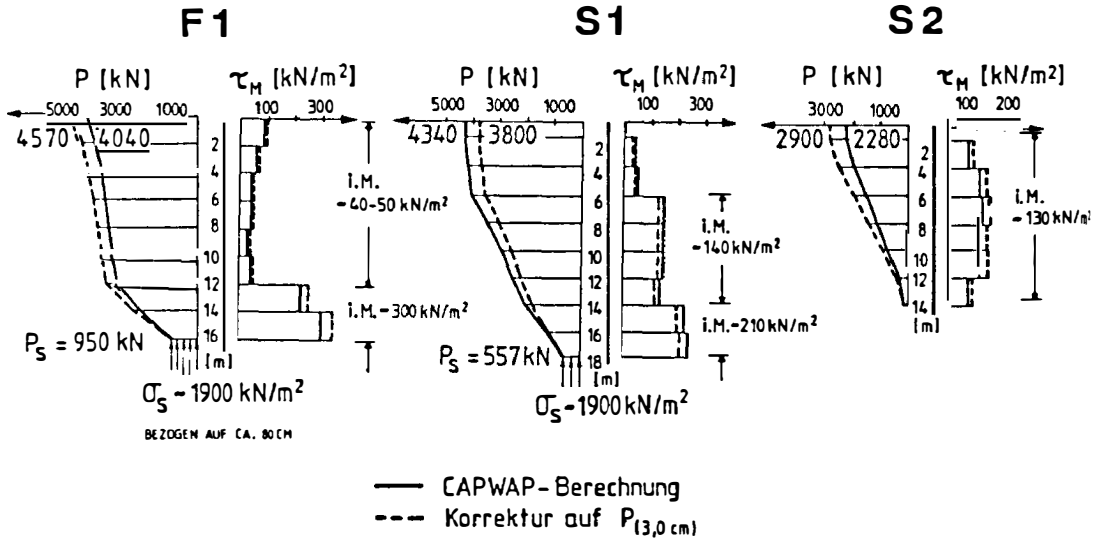


Bild 14: Tiefenabhängigkeit der Pfahlkraft und Mantelreibung nach CAPWAP

Pfahl	S 1	S 2	F 1
Steifigkeit (kN/cm) aus			
- dynamischer Versuch	3909	2841	3850
- Entlastung statischer Versuch	3595	3605	3728
Dynamische Tragfähigkeit			
- Case ($J = 0,4$) (kN)	5260	4030	4150
nach Capwap (kN)	4340	2280	4040
s Capwap (mm)	12	8,3	10,5
P Statisch, bei $s = 30$ mm	3800	2900	4570
$P_{\text{Capwap}} / P_{\text{Statisch}}$	1,14	0,79	0,88

Bild 15: Statische und dynamische Vergleichswerte

5.4 B+B-Einstabpfähle

Das dynamische Verfahren findet auch bei den Kleinbohrpfählen Verwendung.

An einer Eisenbahnbrücke, die auf Holzpfehlen gegründet war, wurden bei Erweiterungsarbeiten B+B-Einstabpfähle mit einem 800 kg-Gewicht dynamisch untersucht. Von 36 dieser Pfehle ($l = 5,0$ m) wurden 4 mit dynamischen Tests untersucht, um eine Aussage über die statische Tragfähigkeit und die zu erwartenden Setzungen unter der Gebrauchslast von $\max Q = 250$ kN zu erhalten. Die Fallhöhe betrug 2,50 m, wobei das Gewicht in einem Rohr (Pfehlneigung 5°) geführt wurde (Bild 16).

Mit dem CASE-Dämpfungsbeiwert von $J = 0,1$ (kiesiger Sand) ergaben sich statische Widerstandskräfte von $Q = 1,0\text{--}1,2$ MN bei bleibenden Verschiebungen von $s = 2\text{--}8$ mm.

Unter den Prüflasten von $Q = 0,75$ MN - $0,8$ MN errechneten sich nach CAPWAP wahrscheinliche Setzungen von $s = 27\text{--}31$ mm (Bild 17). Unter den Gebrauchslasten waren Setzungen von $s = 5\text{--}7$ mm zu erwarten.

Die Wiederholung der Stoßbelastung auf die Prüfpfehle zeigte, daß die zeitabhängigen Meßwerte Kraft und Beschleunigung mit ausreichender Zuverlässigkeit reproduzierbar waren.

Die Anteile der Mantelreibungskräfte ergaben sich zu 73-94 % der Prüflast. Ein Vergleich der Mantelreibungskräfte mit den aus den Grenzmantelreibungswerten der Tabelle 3 der DIN 4128 errechneten Kräften auf die wahrscheinliche Krafteinleitungsstrecke zeigte eine gute Übereinstimmung. Eine mindestens dreifache Sicherheit der geprüften Pfehle gegenüber der Gebrauchslast konnte durch die dynamische Belastung nachgewiesen werden (HENZE).

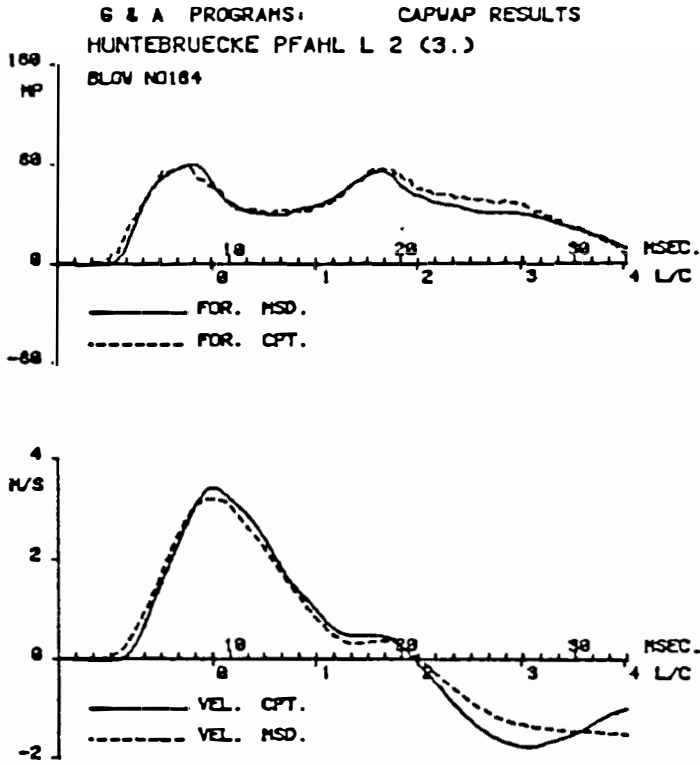


Bild 16: CAPWAP/WAPCAP-Berechnung für B+B-Einstabpfahl L 2

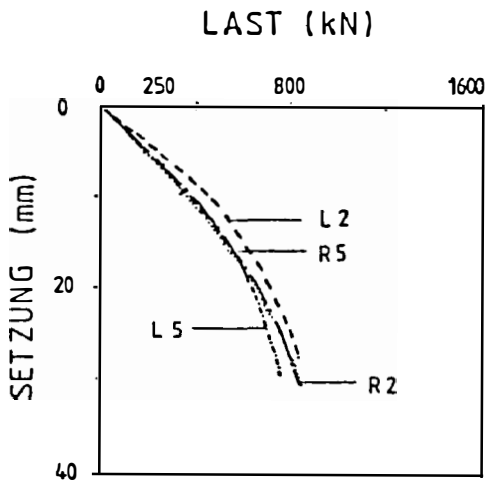


Bild 17: Lastsetzungskurve nach CAPWAP für vier B+B-Einstabpfähle

7. Literatur

Umfangreiche Literatur kann den Vorträgen der Baugrundtagung 1984 in Düsseldorf: Seitz/Klingmüller - Dynamische Tragfähigkeitsprüfungen bei Bohrpfählen (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., S. 533 ff.) entnommen werden. Erwähnenswert sind darüberhinaus:

- (1) Balhaus, Meseck, Seitz: Dynamic pile tests - German practice, ISCMFE 1985, San Francisco, 4/A 4, p. 1341-1346.
- (2) Henze: Diskussionsbeitrag "Dynamische Probelastung von Einstabpfählen", Vorträge der Baugrundtagung 1984, DGEg, S. 574 ff.
- (3) Klingmüller: Dynamische Pfahlprüfung als nichtlineare Systemidentifikation. Vorträge der Tagung: Dynamische Probleme, Modellierung und Wirklichkeit, Mitteilungen des Curt-Risch-Institutes, TU Hannover
- (4) Klingmüller, Lawo: Methods of optimal control applied to a problem of non-linear systems identification, 2. Int. Symp. on Structural Control, Univ. of Waterloo, Ontario, 1985
- (5) Krubasik: Maßnahmen zur Tragkraftherhöhung an Großbohrpfählen, Baumaschine + Bautechnik Heft 7/8, 1985
- (6) Otto, Seitz: Probelastungen an Ortbetonrammpfählen, TIS 9/1985, S. 498-519

Integritätsprüfungen an Ortbetonpfählen

Dr. -Ing. G. Ulrich
Baugrundinstitut Ulrich
Leutkirch – Herbrachhofen

1. Einführung

Der Wunsch des Bauherrn und des Pfahlherstellers, Gründungspfähle nach der Herstellung einer Kontrolle zu unterziehen, wurde im Hinblick auf die zunehmende Auslastung der Pfahltragfähigkeit ständig größer und setzte in den vergangenen 10 Jahren eine Reihe von Neuentwicklungen auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Pfahlprüfung in Gang.

Richtungsweisende Entwicklungen fanden im wesentlichen in den USA und in den Niederlanden statt. Während die Arbeitsgruppe um George Coble und Frank Rausche (3) sich vornehmlich mit der Tragfähigkeitsbestimmung von Fertigteil-Rammpfählen befaßte, hat das in Delft, Holland ansässige Institut IBBC-TNO (Institute for Building Materials and Building Structures) eine einfache Methode entwickelt, Betonpfähle im Boden auf ihre Unversehrtheit (Integrität) zu untersuchen.

Die holländische Integritätsprüfung, kurz auch TNO-Methode genannt, analysiert die Spannungswelle, die durch den Schlag eines Handhammers in den Pfahl induziert wird.

Entsprechend der geringen Schlagenergie ist die Verschiebung der Pfahlteilchen durch die Stoßwelle verschwindend klein. Die Hammerschlagmethode wird daher auch "Low-Strain-Methode" genannt.

Das Ziel der Integritätsprüfung besteht darin, Kenntnis über die geometrische Form des Pfahls zu erlangen wie:

- Pfahllänge
- Querschnittsänderungen
- Risse
- Hohlräume im PfaHwerkstoff.

Keine Aussagen dagegen sind möglich über die Pfahltragfähigkeit.

2. Meßgrößen, Meßgeräte

Die Spannungswelle im PfaH wird durch die Messung der Beschleunigung des Pfahlbetons an einer beliebigen Stelle auf dem Pfahlkopf aufgezeichnet (Bild 1).

Der Beschleunigungsaufnehmer wird "handwarm" auf den Pfahlbeton gepreßt, die andere Hand setzt leichte Hammerschläge auf verschiedene Stellen des Pfahlkopfs.

Der Pfahlkopf muß frei von Betonschlämme sein, ein Glätten des Betons nach dem Abspitzen ist nicht erforderlich.

Pro PfaH werden mehrere Schläge aufgezeichnet.

Die gemessene Beschleunigung wird einmal über die Zeit integriert, so daß auf dem Bildschirm die Geschwindigkeit der Betonteilchen am Pfahlkopf sichtbar wird.

In einigen Fällen wird anstatt der Geschwindigkeit die Verschiebung der Betonteilchen am Pfahlkopf (zweifache Integration) für die Interpretation benutzt.

Die Stoßwelle infolge des Hammerschlags läuft als Druckwelle den Pfahlschaft hinunter und wird am Pfahlfuß reflektiert.

Nach der Zeit $t = 2L/c$ (L = Pfahllänge, c = 4000 m/s Wellengeschwindigkeit in Beton) trifft die zurückkehrende Welle wieder am Pfahlkopf ein.

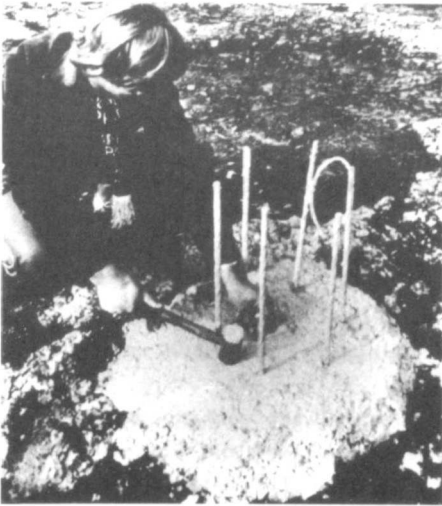
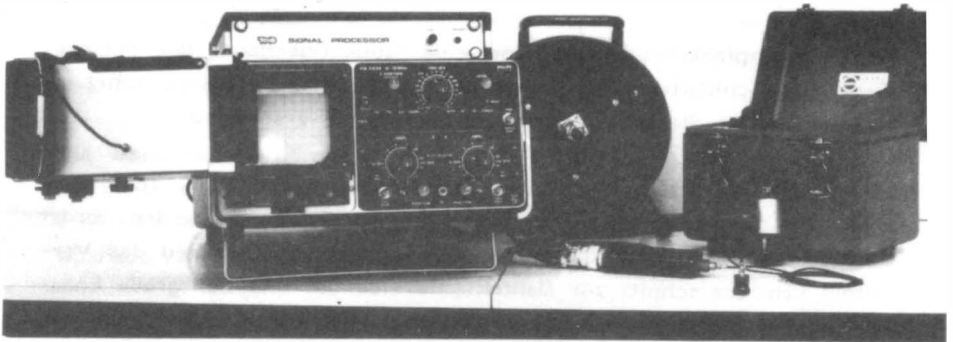


Bild 1: Integritätsmeßgerät der TNO

(Delft, Holland)



Nach der Integration durchläuft das Meßsignal einen Verstärker, der die Amplitude nach einer Exponentialfunktion vergrößert.

Das so behandelte Meßsignal wird dann auf dem Bildschirm eines Oszilloskopes über der Zeitachse aufgezeichnet und von einer Polaroidkamera abgelichtet.

Die Meßausrüstung besteht demnach aus den folgenden Einzelteilen (Bild 1):

- Beschleunigungsaufnehmer mit Verstärker
- Signalprozessor (Integrator, Filter, Verstärker)
- Oszilloskop mit Polaroidkamera.

Die zur Zeit benutzte Geräteversion verarbeitet das Meßsignal auf analoger Basis. Die digitale Meßwertverarbeitung ist in Vorbereitung.

Als Hammer wird i.a. ein 0,5 kg schwerer Plastikhammer benutzt.

3. Grundsätze der Interpretation

Die Hammerschlagmethode wird hauptsächlich für Betonpfähle angewendet.

Bei Fertigteilpfählen ist zu beachten, ob die Stoßwelle vorhandene Kupplungen passieren kann oder nicht. In der Regel wird die Stoßwelle an der obersten Kupplung reflektiert, so daß über den tieferen Teil des Pfahls keine fundierte Aussage möglich ist. Der Fertigteilpfahl ist an sich jedoch für eine derartige Prüfung gut geeignet, weil er einen konstanten Querschnitt und einen einheitlichen Elastizitätsmodul besitzt.

Der Ortbetonpfahl hat in der Regel eine raue Oberfläche und entsprechend der Schichtfestigkeit Querschnittsänderungen - beides führt zu Reflexionen, die die Interpretation des Meßsignals erschweren.

Nach Berücksichtigung der Wellengeschwindigkeit von Stahl ($c = 5200$ m/s) kann das Verfahren auch an Stahlpfählen angewandt werden. Es ist beispielsweise jedoch unmöglich, Spundwände zu prüfen, weil das Verhältnis von Querschnitt zur Mantelfläche klein ist und der große Energieverlust durch Mantelreibung eine ausreichende Reflexion verhindert.

Es können Pfähle mit beliebiger Querschnittsform (Kreis, Rechteck, Rohr) geprüft werden, ebenso große und kleine Querschnitte (Wurzelpfahl, Großbohrpfahl).

Bezüglich der Pfahllänge sind dagegen Einschränkungen, bedingt durch die kleine Schlagenergie, vorhanden. Nach dem neuesten Stand der Technik sind unter günstigen Voraussetzungen (kleine Mantelreibung, wenig Querschnittsänderungen) bereits 40 m lange Pfähle geprüft worden.

In der Regel muß das TNO-Verfahren jedoch auf Pfahllängen von etwa 20 m begrenzt werden.

Bei der Interpretation des Meßsignals wird zunächst nach Druck- und Zugwellenreflexion unterschieden. Hierbei sind die folgenden Zuordnungen möglich:

- Zugwellenreflexion: Pfahlfuß
Querschnittsverkleinerung ("necking")
Abnahme der Mantelreibung
Riß
Hohlraum
schlechter Pfahlbeton
- Druckwellenreflexion: Pfahlfuß auf harter Unterlage (Fels)
Querschnittsvergrößerung
Zunahme der Mantelreibung

Aus der Vieldeutigkeit der reflektierten Welle wird die Problematik der Interpretation ersichtlich.

Im allgemeinen bleibt die Interpretation auf die erste und zweite Reflexion, d.h. Diskontinuität beschränkt, weil weitere Signale zu unübersichtlichen Überlagerungen führen.

Die Mantelreibung stellt einen unerwünschten Effekt dar, indem sie beispielsweise dieselbe Signalauslenkung produziert wie eine Querschnittsveränderung. Um den Einfluß der Mantelreibung zu eliminieren, wird die vorgenannte, exponentielle Verstärkungsfunktion eingeführt.

Für einen Stab im homogenen Medium wird die Anfangsgeschwindigkeit nach der Funktion

$$(1) \quad v_r = v_i \times e^{-j t} \quad \begin{array}{l} v_r = \text{reduzierte Teilchengeschwindigkeit} \\ v_i = \text{Anfangsgeschwindigkeit} \\ j = \text{Dämpfungsfaktor} \\ t = \text{Zeit} \end{array}$$

abgemindert (Lit. 1)

Wenn das Signal mit der Funktion $a = e^{j t}$ verstärkt wird, kann die theoretische Mantelreibung eliminiert werden.

Selbstverständlich bleibt bei diesem einfachen Ansatz die tatsächliche Baugrundsichtung unberücksichtigt.

Für die Praxis ist daher die Kenntnis der Baugrundsichtung, des Rammprotokolls und ein gewisses Maß an bodenmechanischem Verständnis zur Interpretation erwünscht.

Unter der Voraussetzung, daß der Dämpfungsfaktor j richtig eingeschätzt ist, kann die gemessene Teilchengeschwindigkeit zur Bestimmung der Größe von Querschnittsveränderungen genutzt werden.

Nach (1) läßt sich eine Querschnittsveränderung A_2/A_1 wie folgt berechnen:

$$(2) \quad A_2/A_1 = (2-r)/(2+r) \quad \begin{array}{l} A_1 = \text{Querschnitt 1} \\ A_2 = \text{Querschnitt 2} \\ r = \text{Reflexionsfaktor} \end{array}$$

mit $r = v_p/v_i$ v_p = Teilchengeschwindigkeit am Pfahlkopf
 v_i = Anfangsgeschwindigkeit der Teilchen am Pfahlkopf

Das Bild 2 zeigt die Funktion A_2/A_1 für den theoretisch möglichen Bereich von r .

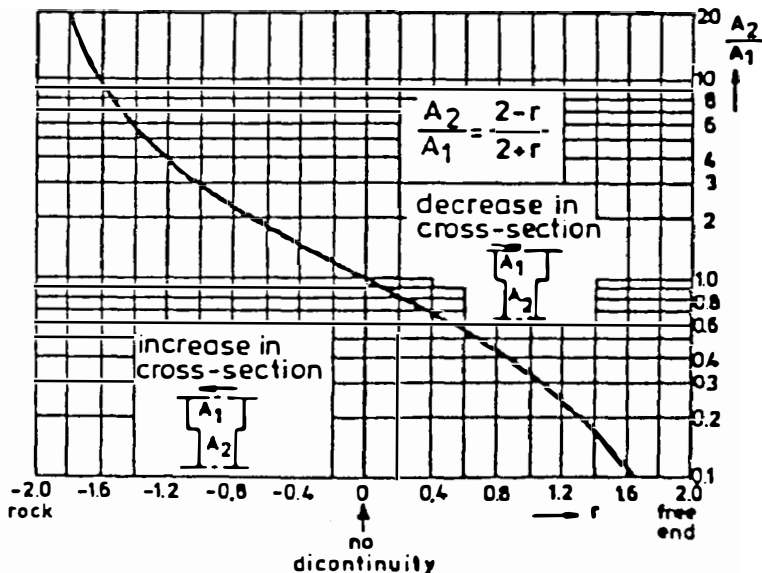


Bild 2: Beziehung zwischen dem Reflexionskoeffizienten r und dem Querschnittsverhältnis A_2/A_1

Es ist anzumerken, daß die vorstehende Berechnung theoretisch nur für homogenen Baugrund gilt und die Anwendung der Gleichung 2 in der Praxis wohlüberlegt werden muß.

Die Pfahllänge kann erfahrungsgemäß auf 0,5 m bis 1,0 m genau bestimmt werden. Voraussetzung ist allerdings, daß der Pfahlfuß auf dem Meßbild gut sichtbar ist.

Maßgebend für die Genauigkeit der Längenbestimmung ist die Größe des Elastizitätsmoduls, der in die Gleichung für die Wellengeschwindigkeit $c = \sqrt{E/\rho H}$ eingeht. Bekanntlich schwankt der Elastizitätsmodul insbesondere bei Ort betonpfählen. Die Wellengeschwindigkeit c ist dagegen als konstant angenommen, so daß sich hieraus schwer bestimmbare Fehlergrößen ergeben.

Bezüglich der Zahl der zu prüfenden Pfähle gilt der Grundsatz, daß möglichst alle Pfähle der betreffenden Baustelle zu messen sind. Es zeigte sich in der Praxis, daß Diskontinuitäten eines Pfahls mitunter leichter zu erkennen sind durch den Vergleich mit den Nachbarpfählen; insbesondere dann, wenn die Baugrundsichtung bzw. die Mantelreibung gleichbleiben.

Pfahlköpfe, die bereits in ein Fundament einbinden, können i.a. nicht geprüft werden, weil das Fundament eine Reflexion erzeugt, die das eigentliche Meßsignal aus dem Pfahl überlagert. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls den Pfahlkopf teilweise freizulegen.

Die Bilder 3 bis 5 sind der Literaturangabe 1 entnommen und stellen einige Grundsituationen dar.

Die Fallbeispiele 1 bis 8 sind vom Verfasser aufgenommen.

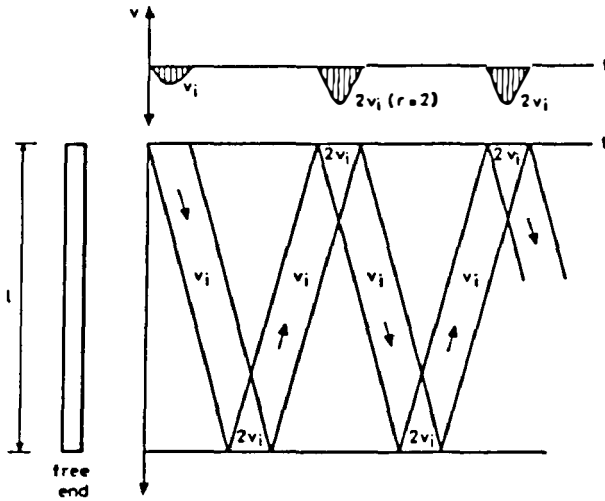


Bild 3a: Pfahl mit einem freien Ende

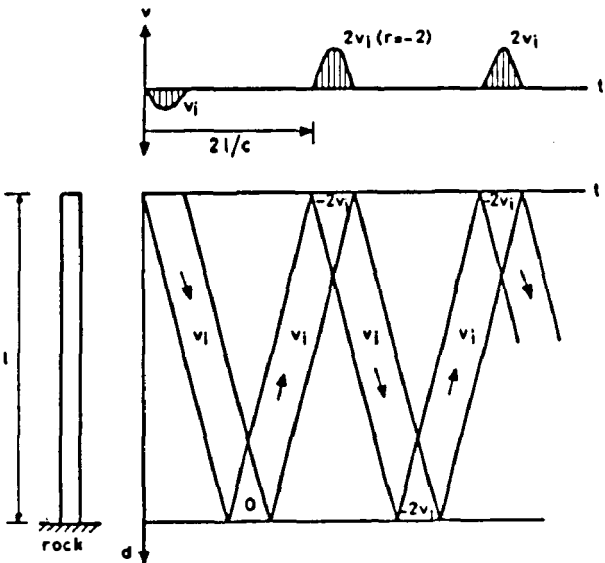
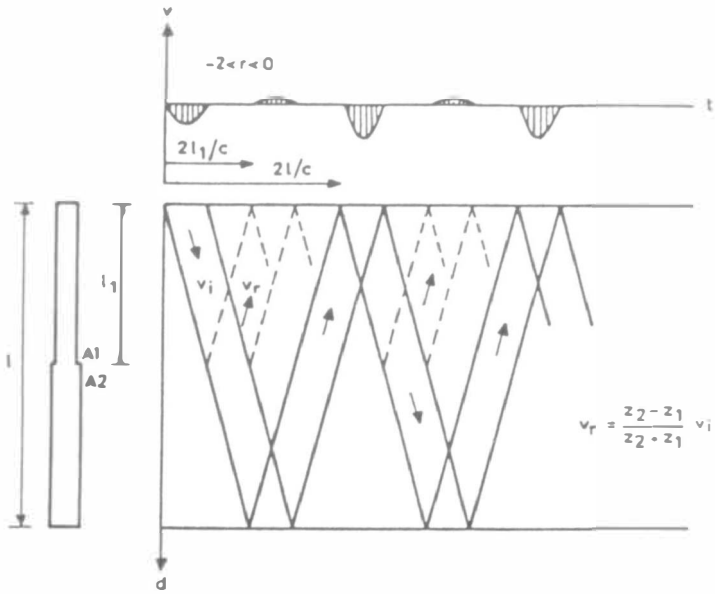


Bild 3b: Pfahl auf unnachgiebiger Unterlage (Fels)



Pile with increase in cross-section.

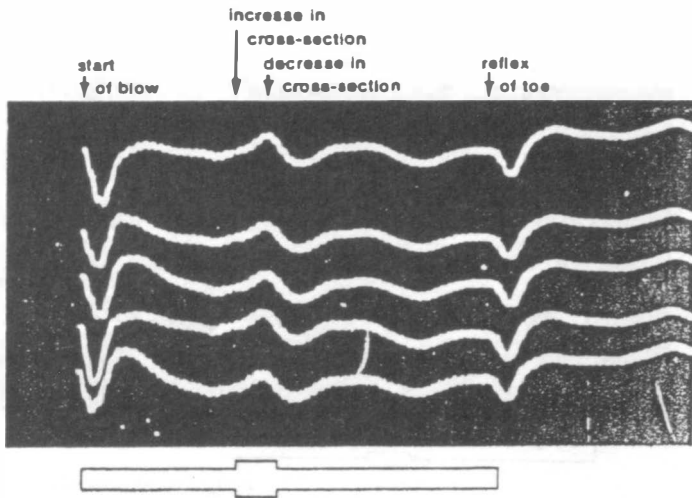
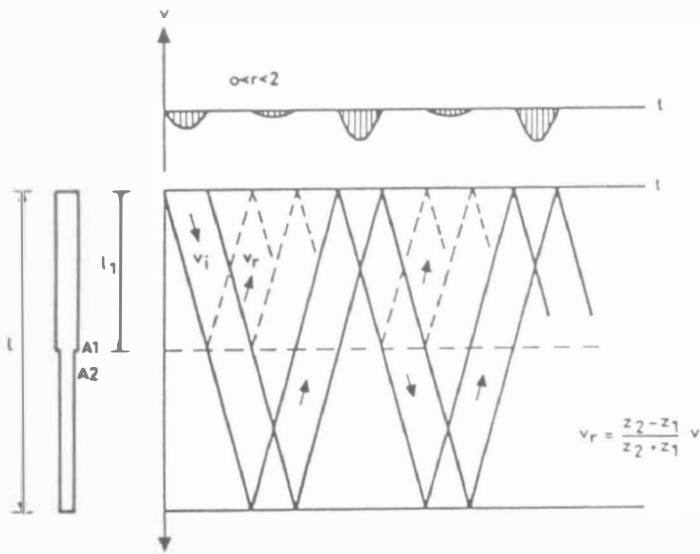


Bild 4: Pfahl mit einer lokalen Querschnittsvergrößerung



Pile with decrease in cross-section.

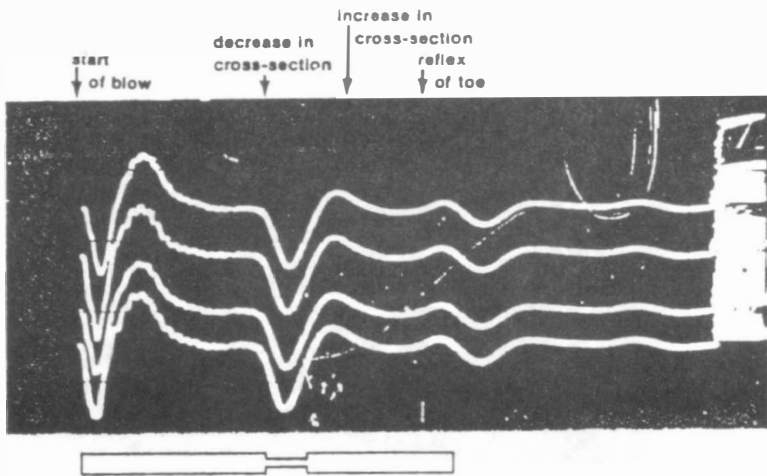


Bild 5: Pfahl mit einer lokalen Querschnittsverkleinerung

Fallbeispiel 1:

Präparierung von Betonpfählen

Die Versuchspfähle wurden von der Firma Bauer auf einem firmeneigenen Versuchsgelände in Schrobenuhausen hergestellt.

Aus Eindeutigkeitsgründen bezüglich der Pfahlgeometrie konnten die Pfähle nicht in Ort beton ausgeführt werden, sondern mußten in eigens vorbereiteten Schalungen liegend betoniert und nach Erhärten des Betons in den Boden eingebaut werden. Es wurden insgesamt 3 Pfähle auf diese Weise vorbereitet, ein 4. Pfahl wurde als Schneckenverpreßpfahl mit Endlosschnecke - Länge 21,5 m und Durchmesser 550 mm - abgebohrt und unter Baustellenbedingungen, d. h. durch Seelenrohrinjektion in Ort beton ausgeführt.

Die einzelnen Pfähle erhielten die folgenden Abmessungen oder typischen Mängel:

Pfahl 1: konstanter Querschnitt

Durchmesser 800 mm

Länge 13 m

Betongüte B 35

Pfahl 2: Riß über 50% des Querschnitts in 5 m

Tiefe, Rißweite 10 mm

weiche Fußausbildung mit Moosgummipolster

Durchmesser 800 mm

Länge 13 m

Betongüte B 25

Pfahl 3: Querschnittserweiterung auf $d = 1100$ mm

Querschnittsverkleinerung a.d.= 500 mm

Durchmesser 800 mm

Länge 13,2 m

Betongüte B 35

Pfahl 4: Schneckenverpreßpfahl

Nenn Durchmesser 550 mm

Länge 21,5 m

Ort beton B 25

Interpretation der Meßergebnisse

Die Meßsignale, die an den Pfählen 1 bis 4 aufgenommen wurden, sind in den Bildern 6 bis 9 in Polaroidphotos dargestellt.

Unterhalb des Photos ist die jeweils ermittelte Pfahlkontur skizziert. Auf der Abszisse kann direkt die Pfahllänge abgelesen werden, wobei die Wellengeschwindigkeit im Pfahlbeton mit $c = 4000 \text{ m/s} = \text{const}$ angenommen wurde.

Auf der Ordinate ist die Teilchengeschwindigkeit am Pfahlkopf aufgetragen. Eine Auslenkung des Signals nach unten entspricht physikalisch einer Pfahlkopfbewegung nach unten.

Unter Hinweis auf einschlägige Literaturstellen (1) soll hier nicht auf allgemeine Regeln zur Interpretation der reflektierten Wellen eingegangen werden. Es wird lediglich darauf verwiesen, daß Impedanzveränderungen im Pfahl zu Reflexionen führen. Im Einzelfall kann beispielsweise eine am Pfahlkopf registrierte Druckwelle eine Querschnittserweiterung, eine Zugwelle eine Querschnittsverengung oder den Pfahlfuß bedeuten. Die vom Hammerschlag erzeugte, nach unten laufende Druckwelle wird in den Meßphotos als Signalauslenkung nach unten, die reflektierte Druckwelle als Signalauslenkung nach oben erscheinen.

Der Vergleich zwischen tatsächlicher Pfahlkontur und den interpretierten Meßergebnissen ist für alle Pfähle in Bild 10 zusammengefaßt.

Pfahl 1

Der Pfahlfuß ist deutlich sichtbar als zurückkehrende Zugwelle und wird nach der vierfachen Laufzeit der Welle sogar nochmals angezeigt.

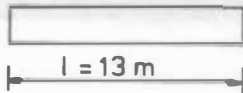
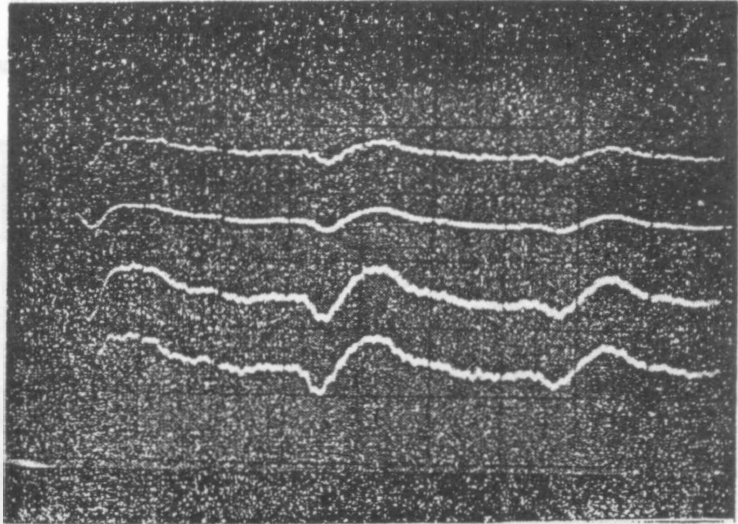


Bild 6: Meßsignal Pfahl 1 mit Pfahlkontur

Pfahl 2

Entsprechend der Signalauslenkung nach unten ist bei ca. 4,5 m eine Querschnittsverkleinerung anzunehmen. Die Länge der Einschnürung kann jedoch nur im Dezimeterbereich geschätzt werden (in Wirklichkeit 10 mm). Das Signal passiert die Verengung und wird vom Pfahlfuß als Zugwelle mit relativ großer Amplitude reflektiert. Die große Zugwellenamplitude deutet zwar auf eine große Impedanzänderung hin, die weiche Fußausbildung mit einem Moosgummipolster kann jedoch hieraus nicht erkannt werden.

Die Querschnittsverminderung wurde nach Bild 2 auf 60 % des Nennquerschnitts berechnet.

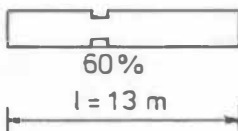
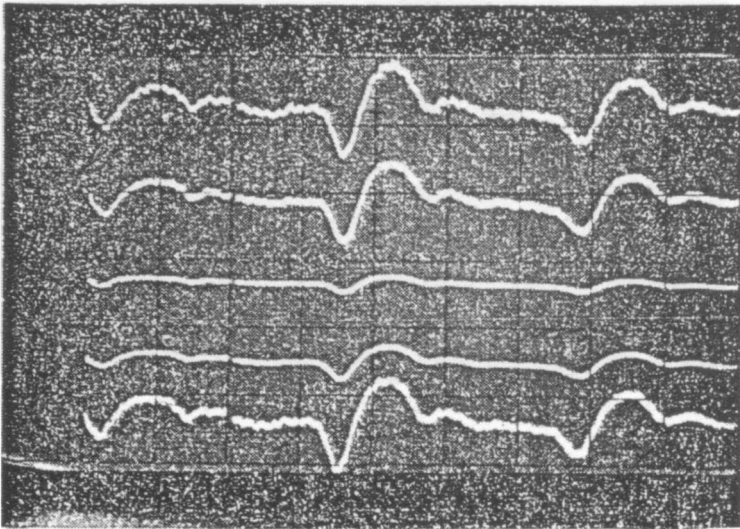


Bild 7: Meßsignal Pfahl 2 mit Pfahlkontur

Pfahl 3

Entsprechend dem Signalverlauf ist nach der Querschnittserweiterung eine Querschnittsverkleinerung festzustellen. Weiterhin wurde am Pfahlfuß eine zweite Vergrößerung des Pfahldurchmessers diagnostiziert.

Der tatsächliche Pfahl dagegen zeigt nur eine Querschnittsvergrößerung (siehe Bild 10). Die Fehlinterpretation der unteren Querschnittserweiterung ist auf eine Überlagerung der reflektierten Wellen zurückzuführen. Dies bedeutet für die Praxis, daß nur die oberste, in günstigen Fällen auch noch eine darunter liegende Diskontinuität mit Sicherheit erkannt werden kann.

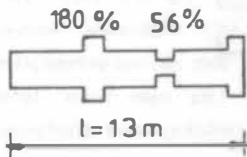
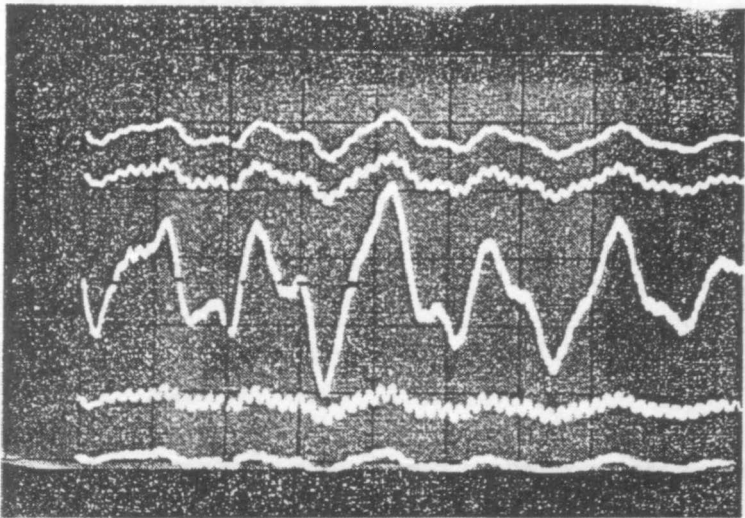


Bild 8: Meßsignal Pfahl 3 mit Pfahlkontur

Pfahl 4

Der Pfahlfuß ist nur noch schwach sichtbar. Es zeigt sich, daß bei einer Pfahllänge von 21,5 m die Grenze der Interpretierbarkeit erreicht ist. Sicherlich hat der Schneckenverpreßpfahl in Ortbeton eine größere Mantelreibung als die Pfähle 1 bis 3, so daß eine größere Dämpfung des Eingangssignals, mithin eine schlechtere Interpretierbarkeit vorhanden ist.

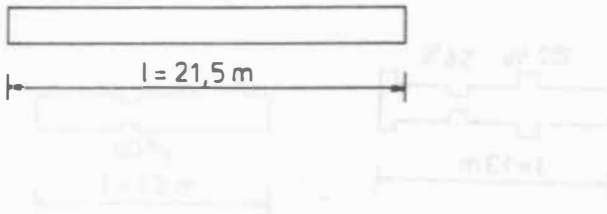
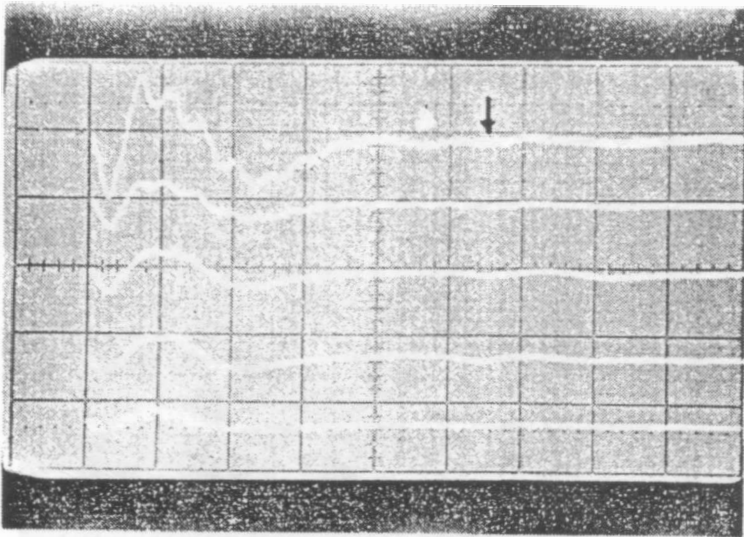
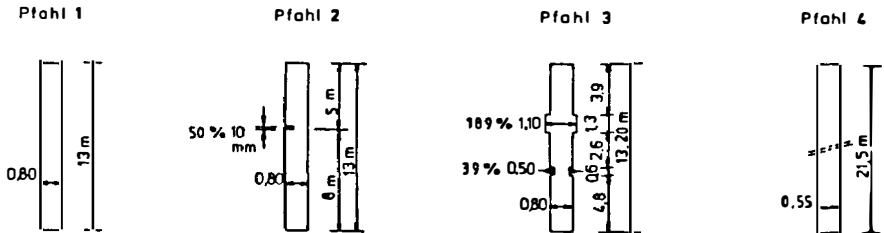


Bild 9: Meßsignal Pfahl 4 mit Pfahlkontur

tatsächliche Pfahlkonturen



aus Meßsignalen interpretierte Pfahlkonturen

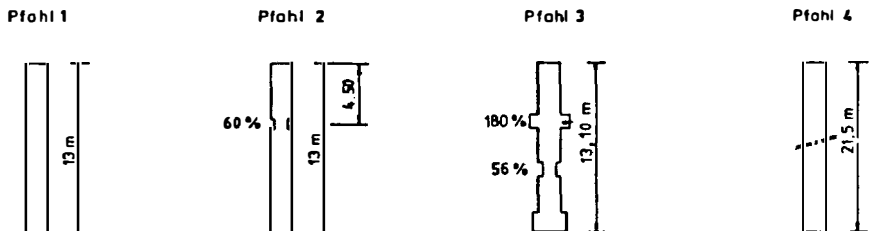


Bild 10: Vergleich der tatsächlichen Pfahlkonturen mit den Meßergebnissen

Zusammenfassung

Allgemein ist festzustellen, daß die Pfahllängen mit guter Genauigkeit ermittelt werden konnten. Mehrere Diskontinuitäten in Folge führen jedoch zu Unsicherheiten in der Interpretation.

Im Zweifelsfall wird man sich daher auf die Deutung der ersten bzw. obersten Fehlstelle beschränken müssen.

Die Grenze der Interpretierbarkeit liegt nach dem derzeitigen Stand der Technik zwischen 15 m und 20 m Pfahllänge, wobei der kleinere Wert für Pfähle mit größerer Mantelreibung gilt.

Änderungen der Betongüte oder Schichten mit großer Mantelreibung können zu Fehlinterpretationen führen, weil diese Diskontinuitäten die gleichen Reflexionen erzeugen wie Querschnittsänderungen. Im letzten Fall wird der einfache Ansatz zur Kompensation der Mantelreibung durch Signalverstärkung vermutlich nicht mehr genügen.

Die Querschnittsänderungen sind qualitativ befriedigend erkannt worden. Es muß jedoch davon ausgegangen werden, daß bei wechselnder Mantelreibung die Treffsicherheit nachläßt.

Literatur

- (1) van Koten, H. und Middendorp, P.: Testing of foundation piles. Hauseigener Heron Verlag der TNO, Delft, vol. 26 no. 4, 1981
- (2) Ulrich, G. und Stocker, M.: Integritätsuntersuchung an präparierten Betonpfählen. Symposium Meßtechnik im Erd- und Grundbau der DGEG.
- (3) Goble, G., Rausche, F., Likins, G.: The analysis of pile driving, a state of the art report. Stockholm, Royal Institute of Technology 1980.
- (4) van Brederode, P.J., Middendorp, P., Reiding, F.J.: Improved integrity testing of piles. 2nd international conference on the application of stress-wave theory on piles, Stockholm 1984.

Fallbeispiel 2

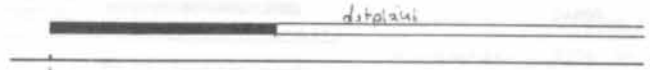
INTEGRITÄTSUNTERSUCHUNG VON PFAHLEN



Prüfbericht 82128
 Prüfdatum 21.12.1982
 Anlage 2.19
 PFAHL NR. C4
 Pfahl-
 länge m 7,5 m

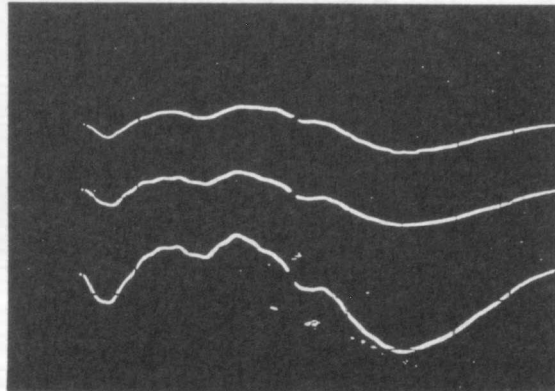
Projekt Neubau B10/27 in Stuttgart-Zuffenhausen
 Querspanne B10 - B27, Bauwerk 25
 Pfahlher-
 steller
 Pfahlart Ort betonrampfpfähle

PFAHL



MESSBILD

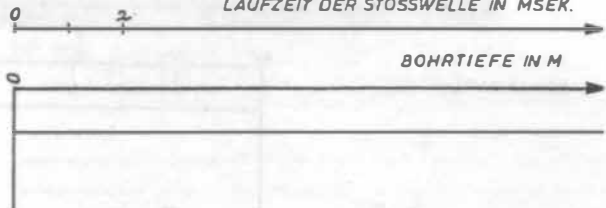
PFAHLKOPFVERSCHIEBUNG NACH UNTEN



LAUFZEIT DER STOSSWELLE IN MSEK.

BOHRTIEFE IN M

BOHRPROFIL



Zu Pfahl C 4

Er beginnt bei 3,55 m eine mit der Tiefe langsam zunehmende allseitige Einschnürung aufzuweisen. Der kleinste gemessene Durchmesser beträgt 0,41 m (Soll 0,56 m) in ca. 4,50 m Tiefe. Ab 4,55 m beginnt der Pfahl sich langsam wieder zu verdicken. In 5,50 m Tiefe erreichte er dann einen Durchmesser von 0,53 m (min. Betondeckung 4,5 cm). Auf dieser Höhe ist er gekappt worden. Siehe beiliegende Skizze 1:100.



INTEGRITÄTSUNTERSUCHUNG VON PFAHLEN

Prüfbericht 81048

Projekt STEEL PLANT AL JUBAIL

Prüfdatum 13.04.1981

Anlage

PFAHL NR. 100

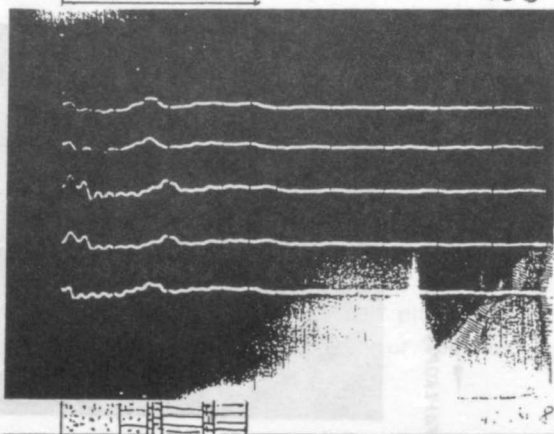
Pfahlher-
stellerPfahl-
länge m 14,40 m

Pfahlart Fußverpresster Orthbetonpfahl

PFAHL

MESSBILD

PFAHLKOPFVERSCHIEBUNG NACH UNTEN



LAUFZEIT DER STOSSWELLE IN MSEK.

BOHRPROFIL

BOHRTIEFE IN M

BODENART



SAND

TON

KALKSTEIN

TON

KALKSTEIN

TON

Befund

Integrität verletzt. Querschnittsverkleinerung oder fehlerhafter Pfahlbeton in 8,0 m Tiefe unter OK Pfahl. Sanierung angezeigt.

Pfahlfußsignal schwierig bestimmbar, da möglicherweise von 2. Reflexion der Fehlstelle überdeckt.

Fallbeispiel 4

INTEGRITY TEST OF PILES



report no. 84023

project E - Mill, Jeddah

date 16.02.1984

SAUDI ARABIA

enclosure 1.4

contractor

Pile No. 26

pile

pile

type of pile cast in place, grouted

length m 40 m

Durchmesser : 254 mm

pile shaft

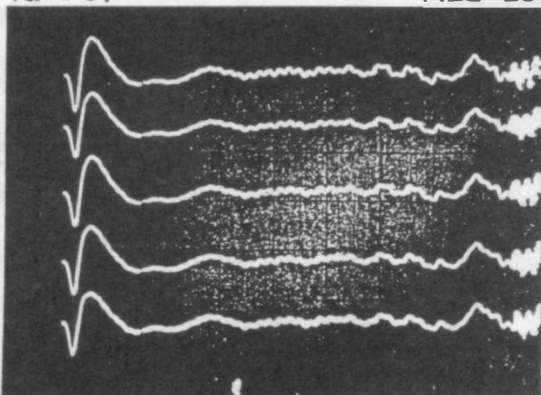
integrity

measurement

09.02.84

PILE 26

displacement of pile top downwards



E-MILL, JEDDAH

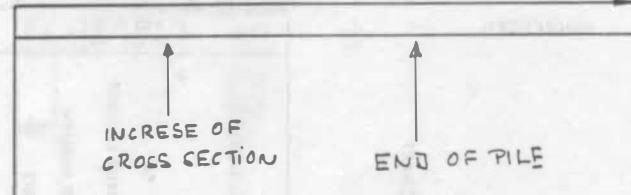
$L_p = 40 \text{ m}$, $L_0 = 45 \text{ m}$, $\phi = 254 \text{ mm}$

0 4 8 length of pile according wave speed

drilling depth m

bore log

type of soil



Fallbeispiel 5

INTEGRITÄTSUNTERSUCHUNG VON PFÄHLEN



Prüfbericht 81018

Prüfdatum 20.1.81

Anlage 8.3

PFÄHL NR. FB 400-L 207

Pfahl-
länge m 9,59 m

Projekt WIEN, A 22

Fahrbahn 400

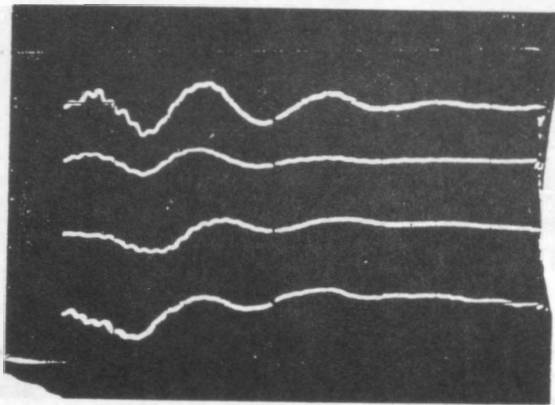
Pfahler-
steller

Pfahlart Ortbetonpfahl

PFÄHL

MESSBILD

↑
PFÄHLKOPFVERSCHIEBUNG NACH UNTEN

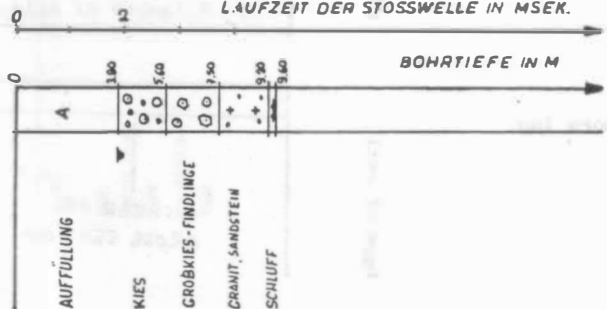


LAUFZEIT DER STOSSWELLE IN MSEK.

BOHRTIEFE IN M

BOHRPROFIL

BODENART



Fallbeispiel 6

INTEGRITÄTSUNTERSUCHUNG VON PFAHLEN



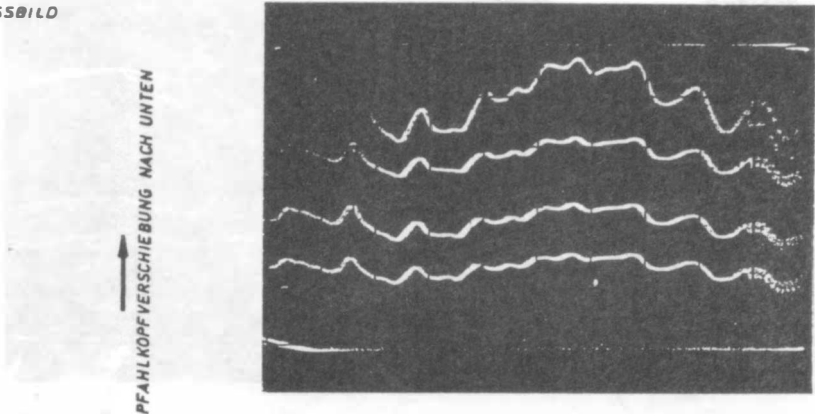
Projekt Fa. Delacher & Co. Transport AG
Hallenneubau Wolfurt/Vorarlberg
Pfaehlersteller
Pfahlart Fertigbeton-Rammpfahl

Prüfbericht 80107
Prüfdatum 16.10.80
Anlage 3.20
PFAHL NR. 809
Pfahl-länge m 8,50

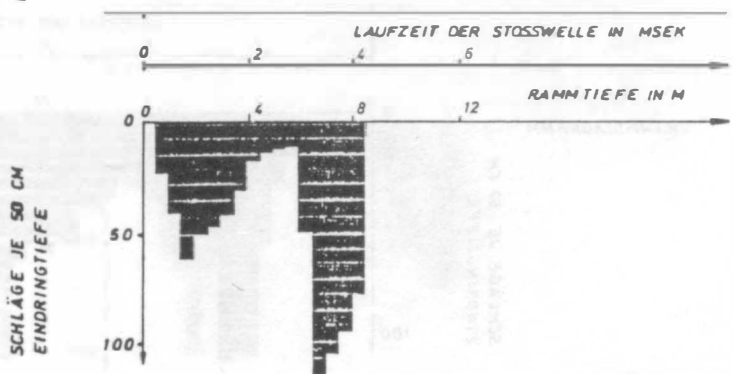
PFAHL



MESSBILD



RAMMDIAGRAMM



Befund

- 3,0 m : Große Querschnittsverengung mit Wiederholungen, Pfahlfuß nicht sichtbar
- : Integrität des Pfahls bei 3,0 m verletzt, Sanierung angezeigt.



Fallbeispiel 7

INTEGRITÄTSUNTERSUCHUNG VON PFAHLEN

Prüfbericht 80107

Projekt Fa. Delacher & Co. Transport AG

Prüfdatum 16.10.80

Hallenneubau Wolfurt/Vorarlberg

Anlage 3.8

Pfahlhersteller

PFAHL NR. 232

Pfahlart Fertigbeton-Rammpfahl

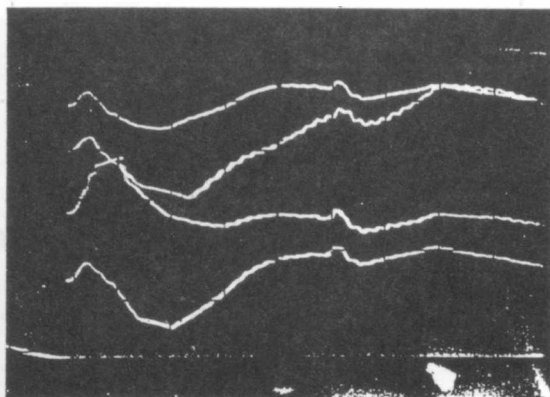
Pfahllänge m 3,5+11,35

PFAHL



MESSBILD

PFAHLKOPFVERSCHIEBUNG NACH UNTEN

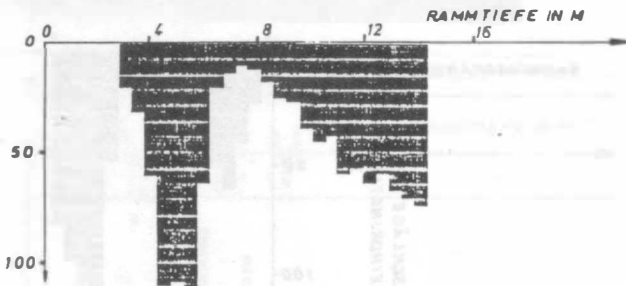


LAUFZEIT DER STOSSWELLE IN MSEC

0 2 4 6 8

RAMMDIAGRAMM

SCHLÄGE JE 50 CM
EINDRINGTIEFE



Befund

- 4,0- 8,0 m: Abnahme der Mantelreibung
- 10,5 m: Kupplung (Zugwelle)
- 14,0 m: Pfahlfuß

: Keine Integritätsverletzung

Fallbeispiel 8

INTEGRITÄTSUNTERSUCHUNG VON PFAHLEN



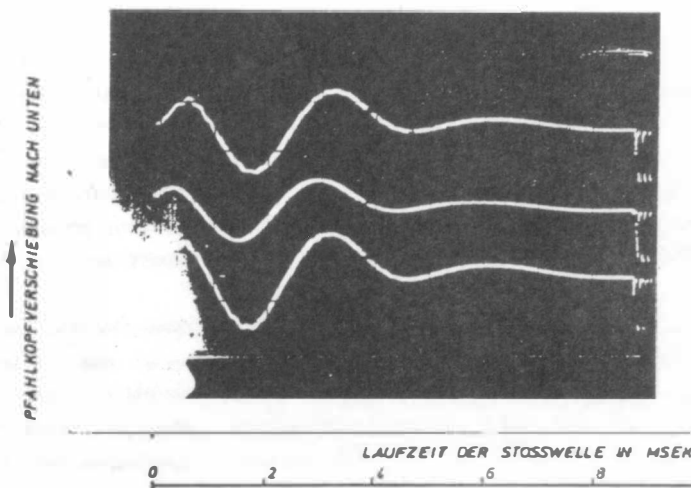
Projekt Fa. Delacher & Co. Transport AG
Hallenneubau Wolfurt/Vorarlberg
Pfehlhersteller
Pfehlart Fertigbeton-Rammpfehl

Prüfbericht 80107
Prüfdatum 16.10.80
Anlage 2.1
PFAHL NR. 4
Pfehl-länge m 3,5+10,0

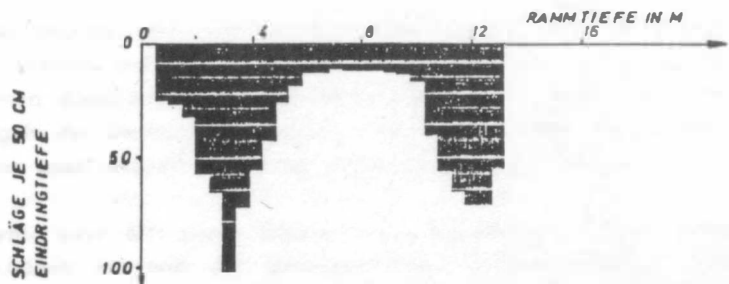
PFAHL



MESSBILD



RAMMDIAGRAMM



Befund

3,5- 7,0 m: Abnahme der Mantelreibung
starke Signaldämpfung

Einsatz dynamischer Pfahltests aus der Sicht eines Bauherrn

Dipl. — Ing. H. Braaker
Behörde für Strom— und Hafenbau
Hamburg

Im Laufe meiner Ingenieurtätigkeiten habe ich sowohl auf der Seite der privaten Bauausführung Bauherrnbelange vertreten müssen, wie auch bei einer aktiv und passiv bauausführenden technischen Behörde, die eigene Bauvorhaben erstellen muß und außerdem bauaufsichtliche Aufgaben für private Bauherrn und in eigener Sache erledigt. Auf der Basis dieser Tätigkeiten soll das Thema dieses Kurzvortrages hier behandelt werden.

Die privaten und öffentlichen Bauherrn stellen uns die Bauaufgaben, die wir am Bau Tätigen zu erfüllen haben. In jedem Fall ist eine standsichere Ausführung unerläßlich. Sowohl Sachschäden, die noch notfalls durch materiellen Ersatz egalisiert werden könnten, wie auch Schäden an Leib und Leben sind unbedingt zu vermeiden.

Seitens des Staates wird verständlicherweise speziell der Sicherheitsaspekt im Hinblick auf Personenschäden hoch gewichtet. Es sei auf die verschiedenen Bauordnungen hingewiesen, in denen sowohl auf anerkannte Regeln der Baukunst abgehoben wird, wie auch über sie die DIN-Vorschriften Gesetzeskraft und entsprechendes Gewicht erlangen.

Jeder private oder öffentliche Bauherr legt so neben Vermeidung von Personenschäden während der Bauausführung selbstverständlich auch Wert auf ein gesundes, dauerhaft standsicheres Bauwerk. Auch seriöse Ausführungsfirmen verfolgen schon aus Image- und Gewährleistungsgründen gleiche Zielrichtungen.

Jedes Produkt unterliegt den diversen Qualitätskontrollen. Eine fabrikmäßige Herstellung von Waren erleichtert im allgemeinen diese Kontrollen, zumal schmale Bandbreiten von Material- und Fertigungsstreuungen relativ leicht eingehalten werden können. Bei allen Bauaufgaben stehen jedoch i.a. schwer definierbare Randbedingungen an, wie ja auch statistische Auswertungen oft schwer machbar oder kaum verwertbar sind oder oft durch große Erfahrung des Spezialisten ad absurdum geführt werden können.

Bei dem hier angesprochenen Problemkreis kommt auch noch der meist sehr uneinheitliche Baugrund dazu, der zusätzliche Streumargen in die Planung einzubeziehen zwingt.

In vielen Bereichen und Regionen - speziell in ehemaligen Niederungen und eiszeitlich geprägten Ustromtälern - sind die im allgemeinen relativ unempfindlichen Flachgründungen oft nicht mehr machbar, so daß statt dessen sensible Tiefgründungen konzipiert werden müssen. Die für Tiefgründungen - im allgemeinen Pfahlgründungen - geltenden Bemessungsrichtlinien sind in DIN-Vorschriften und Empfehlungen zusammengefaßt und werden regelmäßig durch Fortschreibung dem jeweils neuesten Wissensstand angepaßt. Gefragt ist in diesen Fällen immer das Trag- und Setzungsverhalten des Einzelpfahles und der Pfahlgruppe. Dieses gilt ganz besonders auch im Tätigkeitsbereich unseres Amtes und im nord-deutschen Küstenbereich.

Die Bestimmung der Konstruktionseinzelheiten erfolgt im allgemeinen im Vorwege durch Bodenerkundungen, Bohraufschlüsse, Proberammungen u.a.; baubegleitend durch sorgfältige Protokolle und Festhaltung der Ausführungsdaten sowie nach Einbringung der Gründung durch nachträgliche Überprüfungen, Probebelastungen u.v.m..

Für eine ordnungsgemäße Planung sind eindeutige Bodenaufschlüsse notwendig. Die Lage und Aufschlußtiefe richten sich nach der Art des Bauwerks und den anstehenden Baugrundverhältnissen. Vergleiche hierzu z.B. die Empfehlung des Arbeitsausschusses für Ufereinfassung. Moderne Aufschlußarten sind neuerdings häufig im Gespräch, bringen im allgemeinen jedoch nicht die Genauigkeit von Bohrungen.

Die sorgfältige Kontrolle der Pfahleinbringung ist nach wie vor die zuverlässigste Methode, die im Pfahlbereich anstehenden und auf die Tragfähigkeit einwirkenden Verhältnisse festzustellen (großer Rammbericht, Ziehen der Pfähle, Rammformeln allein und auch in Verbindung mit dynamischen Pfahltests). Gleiches gilt sinngemäß für Bohrpfähle.

Streng genommen sind jedoch Probelastungen allein in der Lage, das Trag- und Setzungsverhalten einer Pfahlgründung genau zu ermitteln.

Als bewährtes Instrument steht seit vielen Jahren die statische Probelastung zur Verfügung. Diese Belastungsprobe ist zwar sehr aufwendig, sowohl bezüglich Kosten, Zeitbedarf und baubetrieblicher Behinderungen, liefert jedoch zuverlässige Aussagen über den untersuchten Pfahl. Sie können sowohl zur Eichung von Rammformeln wie auch von dynamischen Probelastungen bestens verwendet werden. Letztere können relativ einfach auf beliebig viele Pfähle angewendet werden.

Die Belastungsproben - wie auch dynamische Pfahltests - sollten schon mit dem Leistungsverzeichnis ausführlich und bezüglich Randbedingungen "VOB- gerecht" ausgeschrieben werden, wie auch in den Terminplänen verankert und deutlich bei den Rammarbeiten ausgewiesen sein.

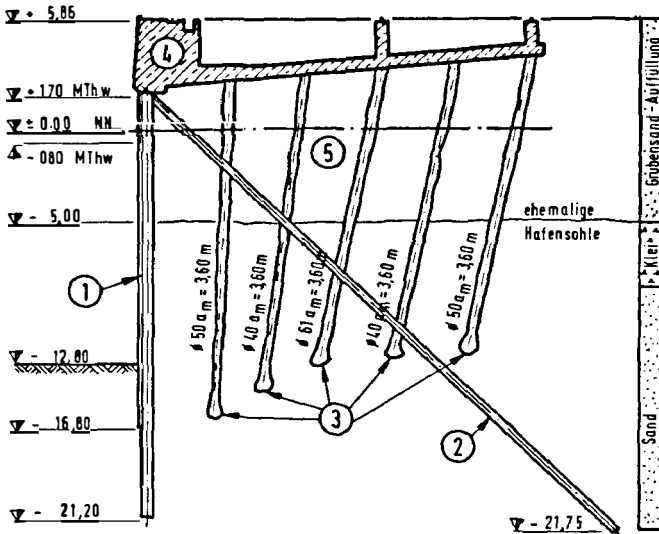
Es gelingt im allgemeinen nur, einige wenige Pfähle statisch probezubelasten. Statische Probelastungen können deshalb i.a. nur eine mehr oder weniger zutreffende Stichprobe darstellen. Wegen der im Vorwege festzulegenden Randbedingungen für die Belastungsprobe (Reaktionspfähle, evtl. bessere Materialgüte der Probepfähle, Versuchszeiten etc.) muß oft auch der Probepfahl schon vor der Rammung festgelegt werden.

Seine Rammdaten sprechen dann bei der Einbringung des Pfahls häufig dagegen, daß gerade dieser Pfahl als repräsentativ angesehen werden kann. Damit kann die Probelastung für die Gesamtgründung, wie oben angeführt, unter Umständen zum Zufallsergebnis werden. Deswegen sind alle Verfahren, die die Beurteilung möglichst vieler Einzelpfähle ermöglichen, z.B. über Rammergebnisse oder dynamische Pfahltests, für jeden Bauherrn und jede Prüfinstanz überaus wertvoll.

Nur darüber werden gewisse statistische Untersuchungen und Auswertungen erst ermöglicht. Die Pfahlnormen DIN 1054, DIN 4014, DIN 4026 usw. honorieren dieses auch dadurch, daß bei mehreren Probelastungen weniger große Pfahlsicherheiten, d.h. größere Pfahlauslastungen zugelassen werden. Letztendlich ist damit ein wirtschaftlicheres und sichereres Bauen ermöglicht. Bild 1 zeigt eine Zusammenstellung der Kosten/lfdm für den im Jahr 1972 gebauten Europakai. Man sieht, daß die Kosten für Spundwand und Pfähle mehr als 50 % der Gesamtkosten/lfdm ausmachen. Dies unterstreicht die in den o.g. Pfahlnormen gemachten Aussagen bezüglich einer wirtschaftlichen Bauweise.

Europakai

Baujahr: 1972



	Kosten für 1 lfdm.	DM/lfdm	%
1	Spundwand	= 7.100,-	34,4
2	Stahlpfähle	= 1.500,-	7,4
3	Frankpfähle	= 2.600,-	12,6
4	Betonarbeiten	= 7.400,-	35,4
5	Auffüllung u. Grundräumung	= 2.000,-	9,7
		= 20000,-	=100,0

Bild 1: Zusammenstellung der Kosten für den 1972 gebauten Europakai

Dynamische Pfahltests stellen eine Renaissance der baubegleitenden Überwachung der Einzeltragglieder dar. Sie ermöglichen schon beim Abteufen des Pfahls eine Beurteilung der Pfahltragfähigkeit bzw. der Pfahlschaftbeschaffenheit, der sogenannten Pfahlintegrität.

Seit vielen Jahrzehnten wurde bei ingenieurmäßig überwachten Bauvorhaben jeder Einzelfahl über Auswertung von Rammberichten und Rammprotokollen und über an Probelastungen geeichten Rammformeln bezüglich Tragvermögen protokolliert und kontrolliert. Und dieses mit gutem Erfolg.

Nur sehr erfahrene Ingenieure sind jedoch dazu in der Lage, wie neuerdings durch dynamische Meßmethoden eindeutig belegt wird, die richtigen Festlegungen der für Rammformeln erforderlichen Eingangswerte wie Fallhöhe, Eindringung des Pfahls, Exzentrizität des Schlages, Effizienz des Rammschlages usw. zu treffen.

Die Größe des Rammschlages und damit die Eindringung des Pfahles unter dem Rammschlag hängt so z.B. bekanntlich von vielen Faktoren, Randbedingungen und handwerklichen Fertigkeiten des Rammgerätes und der Rammmannschaft ab und ist bei vielen Rammgeräten schwer bzw. nur ungenügend genau zu ermitteln. Die Summe dieser Werte kann häufig leicht manipuliert werden. Bei Vibratoren und anderen modernen Einbaugeräten fallen auch diese oder andere leicht meßbare Werte nicht an. Letztendlich haben diese Gegebenheiten bisher immer wieder den verschiedenen Rammformeln den Anstrich der Unseriösität gegeben.

Durch dynamische Pfahltests ist der effektive Rammschlag jetzt eindeutig meßbar. Dieses gilt besonders für einfache und übersichtliche Verhältnisse. Fügt man den gemessenen Wert in physikalische Formeln über den Rammschlag ein, so liefern auch die lange Zeit so umstrittenen Rammformeln - wie an der klassischen Rammformel vielfach praktiziert - Tragfähigkeitsaussagen, die gut mit denen von statischen Probelastungen korrespondieren, da die oft nur ungenau bekannten Korrekturfaktoren der Formeln durch die Meßwerte überflüssig werden.

Ein Beispiel für die Auswertung der klassischen Rammformel zeigt das Bild 2.

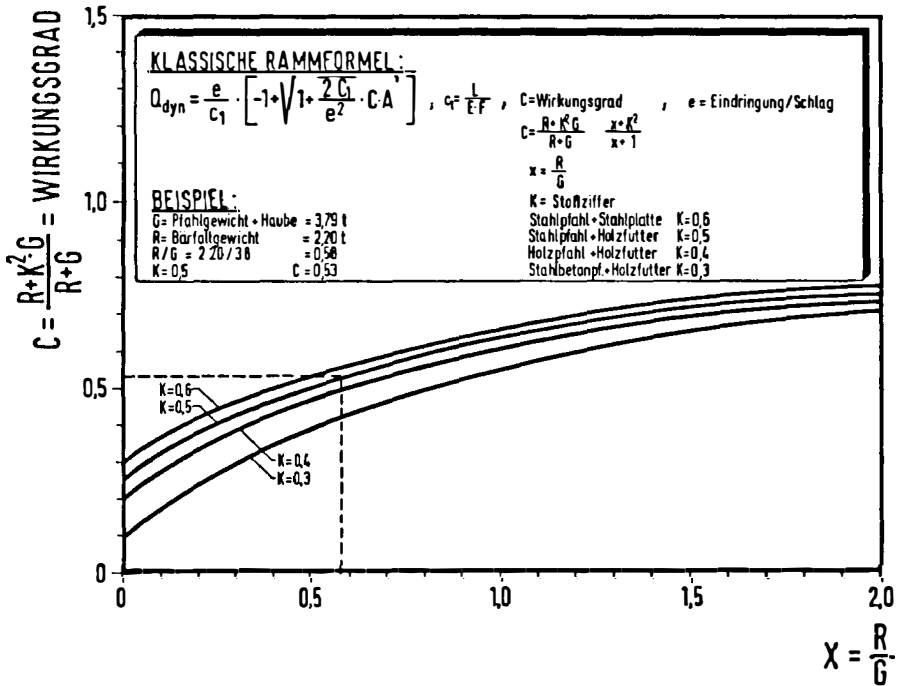


Bild 2: Auswertung der klassischen Rammformel

Durch Auswertung der dynamischen Messungen über die diversen modernen Verfahren (Case, Capwap, oder auch Rammformeln) wird es nunmehr wieder möglich, alle oder zumindestens sehr viele Gründungspfähle bezüglich Tragfähigkeit und Integrität baubegleitend "im Griff" zu behalten.

Jeder Bauherr, jeder Prüfenieur und jeder Hersteller der Pfähle wird dieses aus den verschiedensten Gründen uneingeschränkt begrüßen.

Damit Sofortentscheidungen auf der Baustelle ermöglicht werden, sollten die Ergebnisse von dynamischen Pfahltests, die angefallenen Meßschriebe und sonstigen Werte unbedingt auf der Baustelle gefertigt und angemessen ausgewertet werden. Damit ist es dann möglich, sich den durch Rammung des Einzelpfahles gewonnenen Erkenntnissen spontan anzupassen und eine sichere und wirtschaftliche Gründung zu erstellen.

Es soll nunmehr an Beispielen aus der Praxis gezeigt werden, wie wichtig eine Qualitäts- bzw. Tragfähigkeitskontrolle im Zuge des Bauablaufes und dieses nicht nur an einzelnen Pfählen sein kann.

Im Jahre 1966 sollte eine Siloanlage gebaut werden, deren 1. Bauabschnitt 50.000 Tonnen Fassungsvermögen sowie das zugehörige Maschinenhaus beinhaltete. Die Silolasten sollten planmäßig über Ortbetonpfähle in die unteren Tragschichten abgeleitet werden. Die Tragsande waren von bis zu 10 m mächtigen Kleischichten überlagert.

Durch die Rammung wurden die Kleischichten tixotrop, was bedauerlicherweise erst nach Einbringung von ca. 40 % der insgesamt 720 Gründungspfähle erkannt wurde. Die Köpfe der zuvor gerammten Pfähle wurden bei der Freilegung in gegenüber dem Pfahlansatz verschobener Lage vorgefunden. Es stellte sich die Frage, wie viele der schon eingebrachten 280 Stück Pfähle noch volle Tragfähigkeit erbringen würden.

Nach damaligem Stand der technischen Möglichkeiten wurden statische Probelastungen als einzige Untersuchungsmethode angesehen. Unter Abwägung der Terminzwänge in Folge unabwendbarer Inbetriebnahme des Silos, der baubetrieblichen Belange, der Kosten und der Sicherheitsbedürfnisse wurden zur Feststellung der Pfahlintegrität 11 Stück der Probelmpfähle (an 3 Pfählen davon Mehrfachbelastungen) probelastet und daraus auf die Beschaffenheit von ca. 250 Pfählen geschlossen.

Die Ortbetonpfähle, deren Qualität zweifelhaft erschien, wurden großzügig durch Bohrpfeiler ersetzt. Dennoch blieb als unbefriedigend die Tatsache nach, daß die Untersuchung von nur 11 Pfählen, d.h. 4 % der Gründungselemente im Problembereich möglich war.

Bei Einsatz heute einsetzbarer Integritätsmethoden wäre sicherlich die Einstufung der tatsächlichen Verhältnisse besser möglich, wie auch eine wirtschaftlichere Sanierung.

Regelbauwerke sind im Bereich unseres Amtes Kaimauerbauwerke, für die beispielhaft "Kaimauer südlicher Reiherstieg" hier genannt werden soll. Das Bauwerk geht zur Zeit seiner Vollendung entgegen und wurde in baubetrieblicher und ausführungstechnischer Sicht bereits anderweitig

vorgestellt. Es handelt sich um eine Seeschiffskaimauer für 12 m Wassertiefe, die insgesamt 22 Blöcke mit im Mittel 30 m Länge, d.h. ca. 660 m Gesamtlänge aufweist. Für die Gründung waren schwere wasserseitige Tragbohlen PSp 1012 mit gleich vielen Füllbohlen, Zugpfähle PSp 350, Verdrängungsbohrpfähle sowie Ortbetonrammpfähle einzubauen.

Bild 3 gibt einen Überblick über die jeweilige Anzahl der genannten Pfähle und Bohlen.

Gesamtlänge	- 650 lfm
Tragbohlen	400 Stück
Füllbohlen	400 Stück
Zugpfähle (VM)	240 Stück
VB-Pfähle	260 Stück
Ortbetonrammpfähle	315 Stück

Bild 3: Gründungselemente der Kaimauer "Südlicher Reiherstieg"

Die Auslastung der Gründungselemente betrug unterschiedlich zwischen ca. 2.500 kN (Druck) und 1.500 kN (Zug). Der Baugrund war nach den umfangreichen Baugrundaufschlüssen im wesentlichen einheitlich.

Wie üblich waren die Baulerme eng, die anfallenden Schwierigkeiten bedingt durch Anwendung neuer, zunächst nicht gut laufender Bauverfahren überaus Bauzeit verlängernd.

Erfahrungen mit Gründungen der Altbebauung ermöglichten unserem Grundbau, für den Entwurf relativ zuverlässige Vorbemessungsvorgaben für Mantelreibung und Spitzendruck für die verschiedenen Pfahltypen zu nennen. Letztendlich werden bei uns im Amt jedoch die tatsächlichen Pfahlgrenzlasten durch Probelastungen im Zuge des Bauablaufes überprüft. Aus wirtschaftlichen und terminlichen Zwängen konnten hier die in Bild 4 angeführten Probelastungen durchgeführt werden.

Proben - Nr.	Pfahlsystem	Anzahl der Belastungsproben	
		statisch	dynamisch
434	VB Reno-Schraub- Verpreßpfahl	1	-
422/427	Spundwand EB PS 1012	1	2
421	VB Fundex/Fluck	1	-
414	Ortbetonrammpfähle	-	1
420	VB Ortbetonrammpfähle/Fluck	2	-
	Zugpfähle	2	-

Bild 4: Zusammenstellung der Probebelastungen "Kaimauer Südlicher Reihertstieg"

Damit standen insgesamt sieben statische und drei dynamische Probebelastungen zur Verfügung. Zusätzliche dynamische Messungen zur Bestimmung der effektiven Rammarbeit erlaubten außerdem die Pfahltragfähigkeit über Rammformeln, die durch die statischen Probebelastungen geeicht werden konnten, schon bei der Ausführung zu kontrollieren. Hieraus notwendig werdende zwei Zusatzpfähle konnten ohne Behinderung des planmäßigen Bauablaufs vor Ort spontan angeordnet werden.

In unserem Amtsbereich werden seit Jahren regelmäßig dynamische Pfahltestverfahren eingesetzt, um Aussagen über die Tragfähigkeiten und Sicherheiten der Gründungselemente nicht nur auf einige wenige statische Probebelastungen (viele sind in der Regel nicht machbar) abstützen zu müssen. Die Gründungspfähle werden hoch ausgenutzt, wie am Beispiel vorn ablesbar. Es gelingt dadurch bei den Bauwerken eine "flächendeckende" Qualitätskontrolle zu erhalten, zumal jeder Pfahl rammprotokollmäßig erfaßt wird. Die Bauabwicklung und der Baubetrieb wird so wenig eingeengt, örtliche Unstetigkeiten spontan berücksichtigt und die Bauwerke so sicher und wirtschaftlich erstellt.

Die nachfolgenden Bilder zeigen verschiedene Arten von Probelastungen sowie die Ablesung der Meßgeräte am Pfahlkopf.

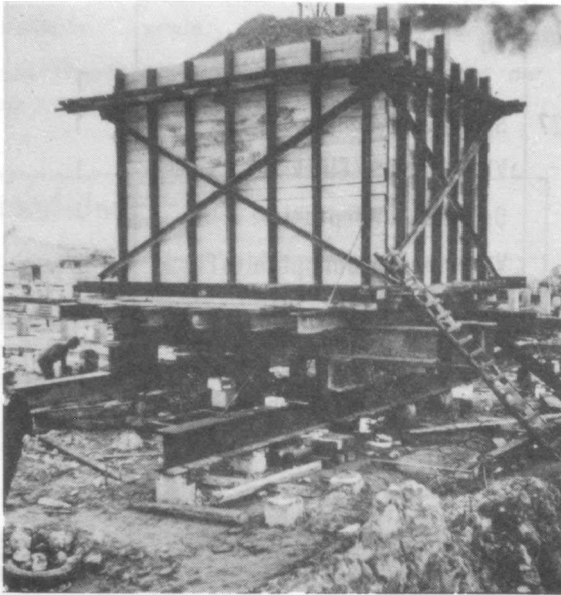


Bild 5: Statische Probelastung mit Gegengewicht

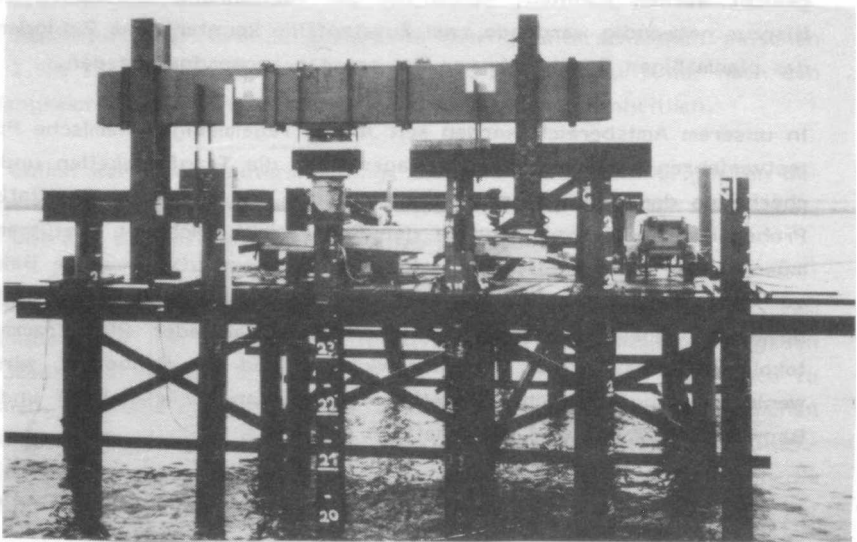


Bild 6: Statische Probelastung mit Zugpfählen über Wasser

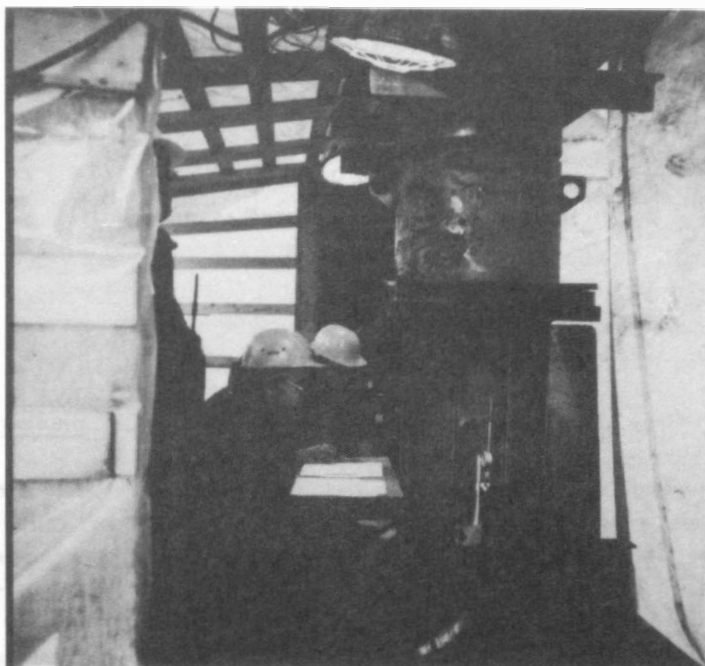


Bild 7: Ablesung der Kraft- und Wegaufnehmer am Pfahlkopf

Was leisten Rammhäre wirklich ?

**Akad. Rat Dipl. — Ing. H. Meseck
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig**

**Dipl.—Ing. J. M. Seitz
Bilfinger+ Berger Bauaktiengesellschaft
Mannheim**

1. Einleitung

Die Idee, bei einem Rammstoß auf die statische Tragfähigkeit eines Rammpfahles zu schließen, ist sehr alt. Weltweit sind mehr als 200 Rammformeln im Einsatz, die den breiten Erfahrungsschatz der Anwender darstellen.

Bei den meisten Formeln ist es erforderlich, die Rammenergie, Setzungen bzw. Eindringungen, Pfahl- und Rammhärgewicht etc. für die Berechnung einer dynamischen Tragfähigkeit unter einem Rammschlag einzusetzen.

Erst die Entwicklung von hochempfindlichen Meßwertaufnehmern hat es vereinfachend ermöglicht, den Kraft- und Geschwindigkeit-Zeitverlauf im Pfahl und damit auch im Hammer im Verbund mit der Stoßhaube und dem Boden zu messen und das komplexe System zu beurteilen. Dabei wird das Gesamtsystem Hammer-Stoßhaube-Pfahl-Boden mit dem dynamischen Verfahren untersucht.

Was kann man von einer dynamischen Messung an Ramppfählen aller Arten, wie Spundbohlen, Fertigbeton- und Stahlpfählen, zusammengesetzten und vorgespannten Pfählen erwarten:

- charakteristisches Stoßzeitdiagramm Hammer-Pfahl-Boden
- Hammerleistung
- effektive Rammenergie (Einzelstoß und gesamter Rammvorgang)
- Feststellung von Mängeln, z.B. Frühzündung bei Dieselhämmern
- Verhalten der Stoßhaube (Abnutzung)
- Spannungen im Pfahlmaterial
- statische und dynamische Pfahltragfähigkeit.

Auf die z.Z. weltweit am häufigsten eingesetzten Meß- und Auswertverfahren ist in verschiedenen Beiträgen dieses Seminars bereits eingegangen worden (4, 5, 8, 15, 17). Bekannte Verfahren sind CASE, CAPWAP und WEAP (5).

Mit dem WEAP Verfahren kann man den Einsatz des Hammers und Pfahltyps vorab aufeinander abstimmen und dann auf der Baustelle optimieren. Es kann z.B. auch untersucht werden, welcher Rammhammer zur Weckung einer ausreichenden statischen Widerstandskraft erforderlich ist. Bei CASE und CAPWAP erhält man Angaben über die Tragfähigkeiten und die Art der Lastabtragung.

In den nordeuropäischen Ländern, wo Ramppfähle mehr als 90 % des Pfahlmarktes ausmachen, werden diese Verfahren auch für die Neuentwicklung von hydraulischen Rammhämmern und Stoßhäuben bzw. -futter verwendet (2,6,12).

2. Grundlagen

In Bild 1 ist das System der Messung während eines Rammschlags vereinfachend dargestellt. Der Stoßvorgang während einer Rammung dauert je nach verwendetem Rammgerät, Eindringung, Pfahllänge, Bodenart etc. 0,005 - 0,1 s. Man mißt unterhalb der Stoßeinleitung am Pfahlkopf mit angeschraubten Meßwertaufnehmern

- a) Dehnungen und erhält daraus mit dem Elastizitätsmodul und der Fläche Kräfte und Spannungen,
- b) Beschleunigungen und integriert diese zu Geschwindigkeiten (auch Verschiebungen).

Einzelheiten zu den Aufnehmern, Meßgeräten, Messungen sowie Auswertungen sind in dem Beitrag von Herrn Balhaus dargestellt.

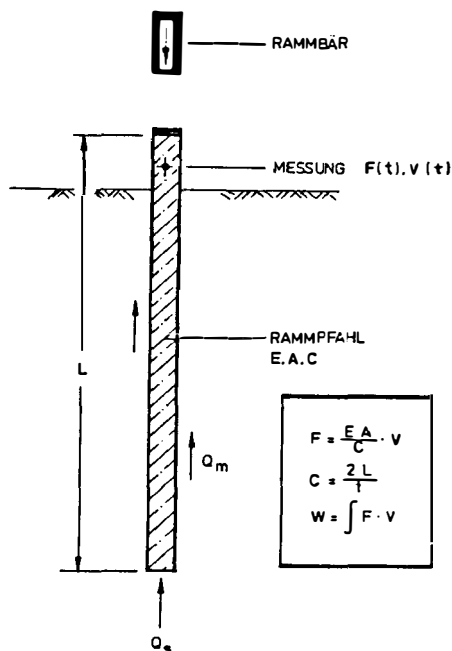


Bild 1: Systemskizze

Anstelle unterschiedlicher Rammformeln tritt zunehmend die Tragfähigkeitsberechnung nach CASE, die aus den Meßreihen der Kraft F und der Geschwindigkeit v hergeleitet wird (5,20).

Die so errechneten dynamischen Ergebnisse werden laufend an statischen Versuchen kalibriert und stellen bisher eine gute Näherung dar. Die dynamischen Versuche sind wesentlich kostengünstiger und können bei der Pfahleinrammung während der Erst- oder Nachrammung vorgenommen werden.

Bei dem Einsatz von Rammhämmern interessieren vorrangig die Stoßenergie, Spannungen im Pfahl und der Stoßkraftverlauf. Aus F und v im Meßquerschnitt kann die effektive Stoßenergie

$$W_{\text{eff}} = \int F(t) v(t) dt$$

errechnet werden.

Mit Hilfe der Gesetzmäßigkeiten der Dynamik ist es möglich, die Zugspannungen des Rammstoßes der Tiefe und Größe nach zu bestimmen (5). Das kann sehr wesentlich bei harten Rammungen und zur Beurteilung der Rißbildung bei Fertigbetonpfählen sein.

Die bei den Versuchen gemessenen Energien geben Aufschlüsse über die eingeleitete (W_{max}), die im Pfahl verbleibende (W_{grenz}) und die in das Stoßsystem zurückgegebene Energie ($W_{\text{max}} - W_{\text{grenz}}$) (Bild 2).

STOSSENERGIE
 W (KNm)

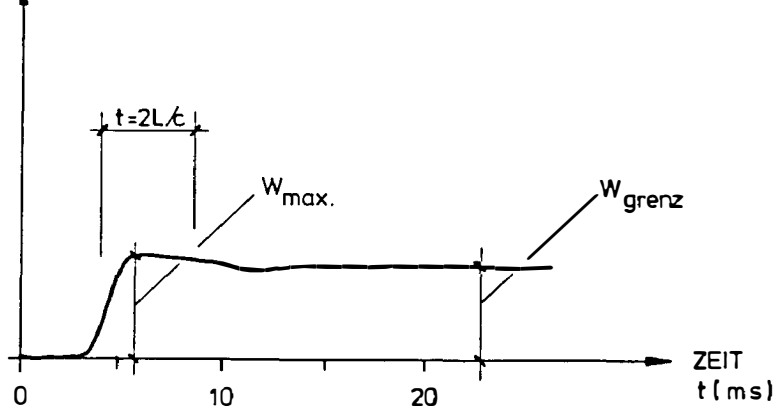


Bild 2: Beispiel des zeitabhängigen Energieverlaufs

Die Energieverluste sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines Rammsystems. Ungeeignete Geräte führen zu Rissen und Schäden an Pfahl und Gerät und auch u.U. zu einer falschen Beurteilung des Tragverhaltens.

Die Energieverluste des Rammvorganges, die auf ein wirtschaftliches Minimum reduziert werden sollten, können die verschiedensten Ursachen haben. Für Luft-Dampf-Hämmer und Dieselhämmer sind die wichtigsten Einflüsse in Bild 3 zusammengestellt.

Luft- Dampf-Hammer	Dieselhammer
Reibung	Reibung
Druck	Druckverluste
Luftvolumen	Dieselpumpe
Vorluft	Öl
Luftzuführung	Verdichtung
	Temperatur
	Vorzündung

Bild 3: Energieverluste

Andere Verfahren zur Bestimmung der Einzelfaktoren für die Verluste sind in (9,10,16) beschrieben.

Messungen an Hämmern im Baustelleneinsatz sind selten. Anzeigegeräte für die Überwachung der abgegebenen Energie sind i.d. Regel nicht vorhanden. Bei Dieselhämmern kann das Saximeter für die Ermittlung der Energie eingesetzt werden: akustische Messung mit der Rückrechnung der Sprunghöhe und Schlagzahl.

Um die verschiedenen Einflüsse aus dem Rammvorgang zu ermitteln, können umfangreiche theoretische und praktische Untersuchungen durchgeführt werden (11,13). Diese Verfahren haben ihren Ursprung in Amerika.

3. Rammstudien mit Wellengleichungen

Im Offshorebereich, wo Rammhämmer mit Gewichten bis zu 80 t und darüber verwendet werden, und bei großen Rammvorhaben sind Vorunter-

suchungen über Hammer, Haube, Pfahl und Boden erforderlich, um ein optimal abgestimmtes System zu erhalten.

Die Einzeldaten für Hammer, Haube, Pfahl und Boden sind aus der Planung und den technischen Daten bekannt. Die Frage lautet: Wie wird die Rammung auf der Baustelle mit dem geplanten Gerät verlaufen?

Der Stoßkraftverlauf eines Rammschlages hängt u.a. ab von:

- Rammgewicht
- Fallhöhe
- Rammfutter
- Gewicht der Stoßhaube
- Querschnittsfläche des Pfahles
- Elastizitätsmodul
- Pfahllänge
- Eindringwiderstand (Baugrund).

Für die Simulation des Stoßvorganges und den Einfluß der einzelnen o. g. Parameter wurde das Programm WEAP entwickelt, mit dem heute nahezu alle Hammerhersteller in den USA arbeiten (13, 14).

Bereits 1950 stellte Smith ein numerisches Rechenverfahren vor, mit dessen Hilfe die Differenzialgleichung der sich in einem Stab fort-pflanzenden Druckwelle auch bei komplizierten Randbedingungen gelöst werden konnte. Dieses Modell erfaßt die komplexen Eigenschaften von Rammbar, Stoßhaube, Pfahl und Boden. Für die Durchführung von Berechnungen mit dem Programm WEAP (Wave Equation Analysis Programme) müssen folgende Daten vorliegen:

- Rammausrüstung: Rammbar, Futter, Haube
- Pfahl: Länge, Querschnitt, Steifigkeit
- Boden: Dämpfung, quake (5), Mantelreibung, Spitzendruck.

In Bild 4 ist das Berechnungsmodell vereinfacht dargestellt.

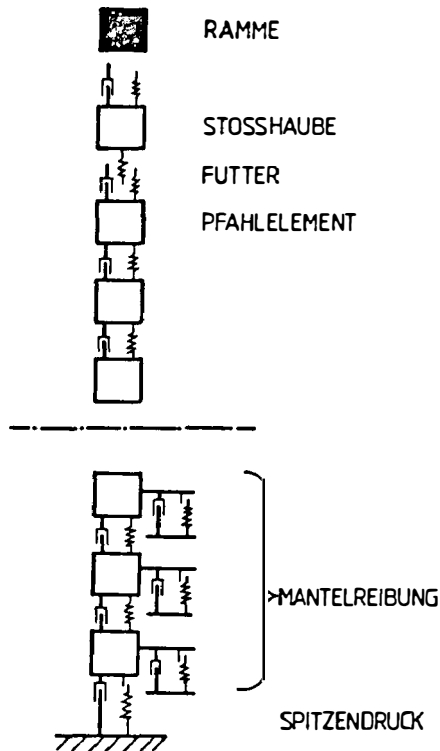


Bild 4: WEAP Berechnungsverfahren mit Modellierung des Pfahl-Boden-Systems in Masse-Feder Elemente

Die iterative Berechnung mit dem Modell liefert die bleibenden Eindringungen bzw. die erforderliche Schlagzahl in Abhängigkeit von der Pfahltragfähigkeit. Mit unterschiedlichen Tragfähigkeiten läßt sich dann eine Tragfähigkeitskurve darstellen, die der Festlegung von Rammkriterien dient.

Bei der Anwendung hat sich gezeigt, daß die rechnerischen Ergebnisse gute Übereinstimmungen mit den Messungen ergeben haben (11). Diese Untersuchungen sollten deshalb auch hier eingeführt werden, da sie bei geringen Kosten wirtschaftliche Arbeitsweisen bei Rambaustellen ermöglichen.

Aus dem Vergleich der Berechnung mit der Baustellenmessung ergeben sich Aussagen zu den Energieverlusten und Systemfehlern, Baugrundaufbau und -verhalten, Steifigkeit der Haube, Entwicklung der Tragfähig-

keit über die Tiefe etc. Bild 5 zeigt ein Beispiel, das den Einfluß der Steifigkeit eines Rammfutters auf den Stoßvorgang verdeutlicht. In (11) sind dazu einige Erläuterungen gemacht.

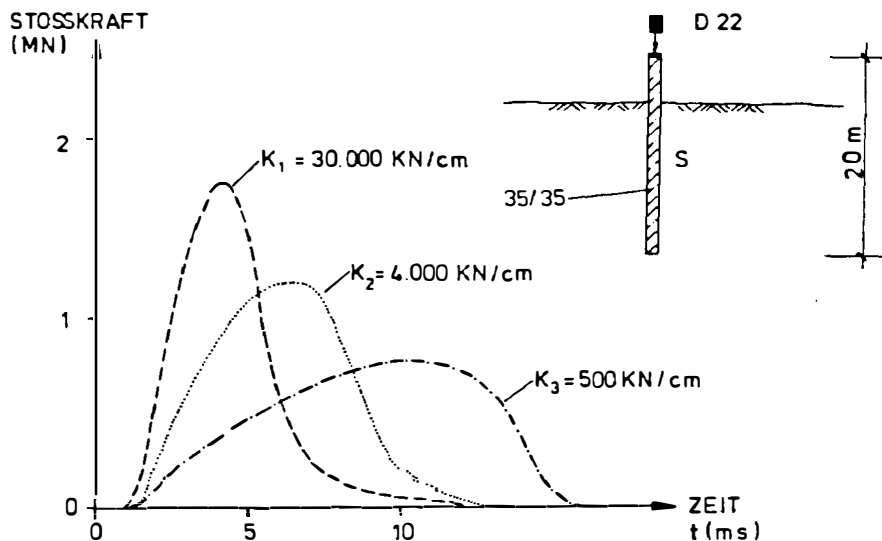


Bild 5: Einfluß der Steifigkeit eines Rammfutters auf die Stoßkrafteinleitung

Mit dieser Vorberechnung wird erreicht, daß eine Systemanalyse zum optimalen Baustelleneinsatz durchgeführt wird. Die Einführung neuer Hämmer unterliegt in den USA teilweise diesen Untersuchungsverfahren.

Die Messungen von F und v erfolgen in der Regel unterhalb der Stoßeinleitung auf der Außenfläche des Rammgutes. Dazu werden je zwei Beschleunigungs- und Dehnungsaufnehmer gegenüberliegend angebracht. Die Messung erfolgt während der Erst- oder im Rahmen einer Nachrammung. Einzelheiten dazu sind in (17) beschrieben.

Die Messungen bei einer Erstrammung dienen auch als dynamisches Rammprotokoll für den Pfahl über die Eindringtiefe. Hauptsächlich findet die dynamische Messung als statische Tragfähigkeitsprüfung für Rammpfähle Verwendung.

Die Meßdaten laufen über ein Kabel während der Rammung kontinuierlich in den Pile Driving Analyser (PDA), der die wichtigsten Daten, wie max. Kraft, Spannungen, Bodenwiderstände, Energie und die Ergebnisse nach dem CASE Verfahren ausdruckt (17).

Gleichzeitig werden diese Werte auf ein Magnetband gespeichert, um im Labor in den Rechner zur weiteren Auswertung eingegeben werden zu können. In Verbindung mit einem Oszilloskop mit der sichtbaren Darstellung der Kurven auf der Baustelle ist es dann möglich, den Kraftverlauf, Zündungsvorgang von Dieselhämmer und exzentrische Stoßanleitung zu überwachen.

Im zweiten Teil dieses Aufsatzes werden einige Beispiele von Baustellenmessungen dargestellt.

Für die Beurteilung der Tragfähigkeit eines Rammpfahls und auch des anstehenden Bodens kann die in den Pfahl eingeleitete Energie herangezogen werden (3, 5). Man unterscheidet dabei nach der Einzelenergie/Schlag und der aufsummierten Gesamtenergie.

4. Rammenergie

Mit der rambbegleitenden Messung der F und v Kurven werden diese Daten ermittelt und für jeden Rammstoß ausgedruckt. Die tatsächliche Stoßenergie/Einzelschlag erlaubt in Verbindung mit Rammformeln eine Abschätzung der zu erwartenden Tragfähigkeit. In (3) sind dazu umfangreiche Untersuchungen an verschiedenen Stahlprofilen in Sandböden zusammengestellt.

Bild 6 zeigt als Beispiel die Energieermittlung für das Einbringen von 18 m langen Stahlrohren in bindige Böden (Herstellungsvorgang für Rammpfähle System "Simplex"). Für die Rammung wurde ein Mitsubishi Dieselbär verwendet.

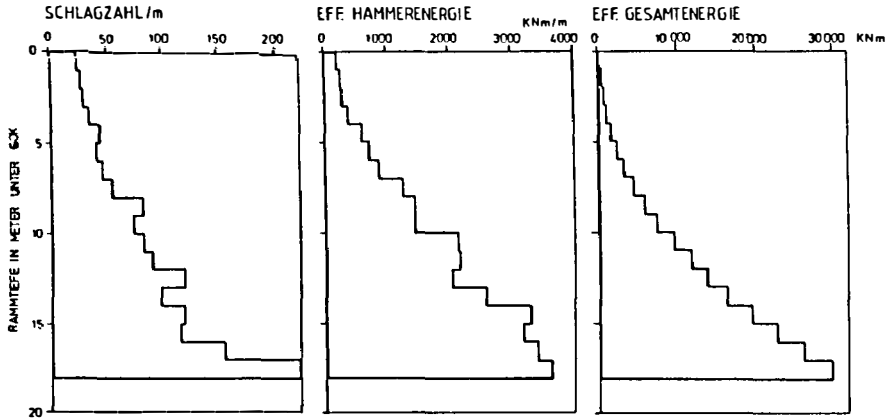


Bild 6: Schlagzahl, effektive Stoßenergie/Schlag und Gesamtenergie

5. Hammeroptimierung

Für den Bau einer Hafenanlage wurden verschiedene Hammertypen auf ihre Verwendungsfähigkeit untersucht (19). Die bis zu 50 m langen Stahlpfähle bestehen aus einem offenen Stahlrohr mit einem Durchmesser von 800 mm und wurden in locker gelagerte Sande eingerammt. Das Ergebnis der Messungen von drei Dieselhämmer D 32, D 46 und D 55 ist in Bild 7 dargestellt. Der Hammer soll das Pfahlmaterial und die Haube schonen und die Spannungen müssen im zulässigen Bereich liegen.

Bei der Rammung wurden deshalb die auftretenden Rammspannungen und die effektiven Stoßenergien ermittelt.

Für die Ramarbeiten wurde der D 46 ausgewählt, da er bei mittleren Stoßenergien Spannungen hervorrief, die die größten bleibenden Setzungen erzielten. Untersuchungen an Freifallbären (25 kN) und Hydraulikbären (80 kN) führten in allen Fällen zu unwirtschaftlichen Leistungen.

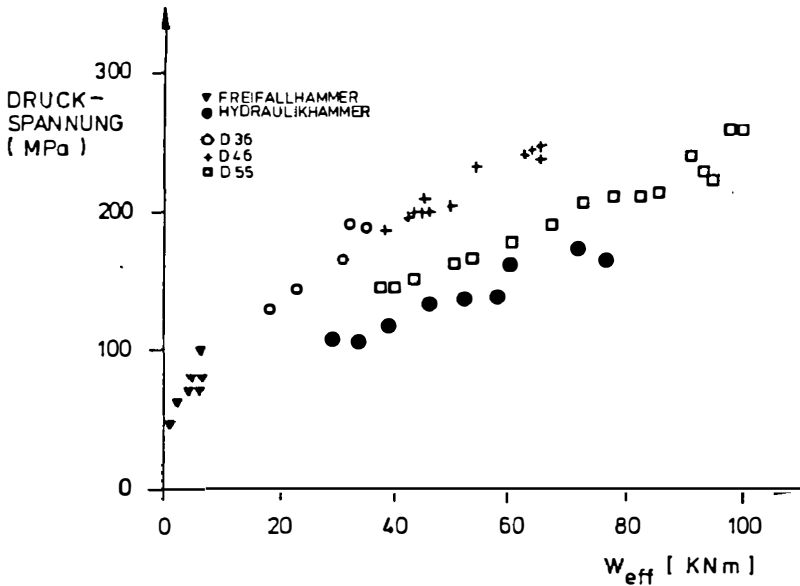


Bild 7: Messergebnis

6. Vergleichsuntersuchungen an Dieselhämmern

Der Stoß eines Dieselhämmers teilt sich auf in: Kompression, Verbrennung und Expansion. Die Spitzenkraft tritt im Augenblick des Kolbenstoßes auf die Haube auf.

Einen großen Raum nehmen die Untersuchungen über den Stoßkraftverlauf bei Dieselhämmern unterschiedlicher Pfahl-Boden-Systeme ein. Die beiden Meßkurven F und v in Bild 8 stellen das "Charakteristikum" für einen Anwendungsfall einer Baustelle dar: Rammhammer, Haube, Pfahl und Boden. Mit den Berechnungsverfahren ist es bereits während der Rammung möglich, die im Pfahl auftretenden Druck- und Zugspannungen zu ermitteln. Aus Bild 8 wird ersichtlich, wie komplex der Stoßvorgang ist. Der in Bild 9 dargestellte theoretische Verlauf kann nur mit vergleichenden Untersuchungen nachvollzogen werden.

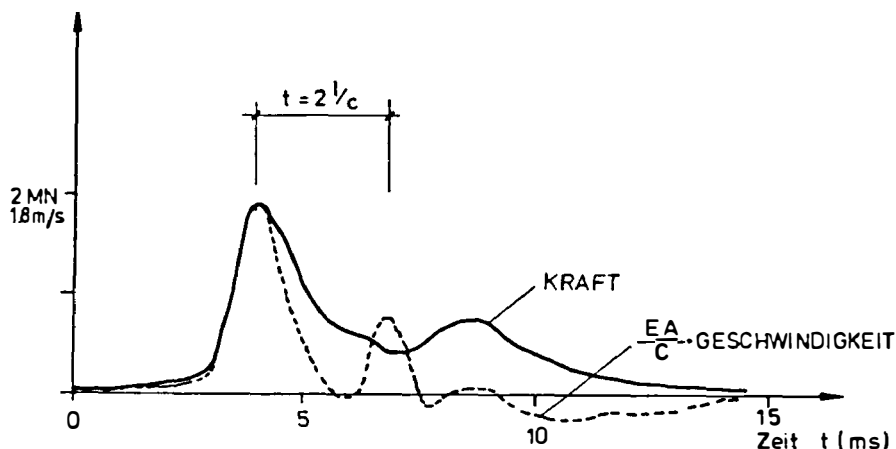


Bild 8: Baustellenmessung

DRUCKKRAFT

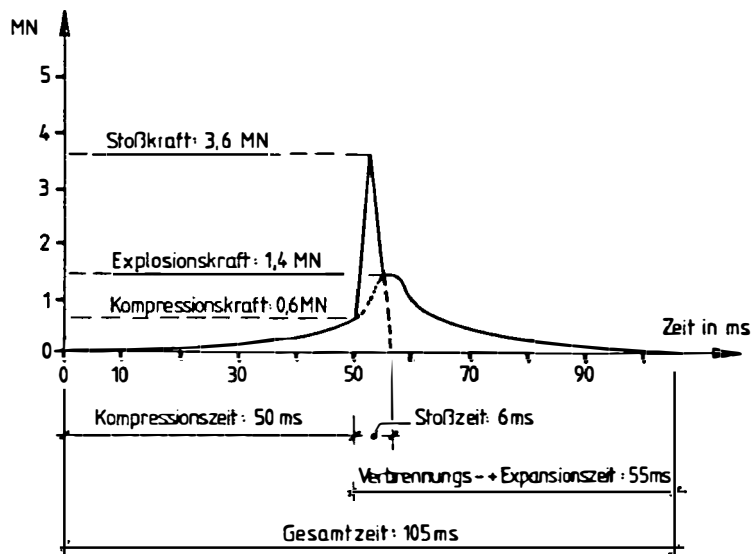


Bild 9: Theoretischer Stoßkraftverlauf

Umfangreiche Untersuchungen zum Wirkungsgrad von Dieselpbären sind in (22) veröffentlicht. Die Autoren haben auf einer Baustelle sechs verschiedene Dieselpbären eingesetzt und während der Rammarbeiten dynamische Messungen durchgeführt. Die dabei ermittelten Wirkungsgrade sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Rambbär	$\frac{\text{Gemessene Energie}}{\text{Theoretische Energie}} = \text{Wirkungsgrad } \%$
Kobe K 45 - I	28 bis 39
Kobe K 45 - II	22 bis 35
Kobe KC 45 - I	18 bis 28
Kobe KC 45 - II	17 bis 20
Kobe KC 45 - III	22 bis 33
Delmag D 46 - 13	30 bis 57

Bild 10: Wirkungsgrade verschiedener Dieselpbäre

7. Stoßkraftverlauf während eines Rammvorganges

Bei einer Rammung mit einem D 22 wurden begleitende Messungen an einem 14 m langen Stahlbetonpfahl durchgeführt. Bei Rammbeginn zeigte sich, daß kein ausgeprägtes Stoßkraftzeitverhalten vorhanden war. Erst gegen Ende der Rammung näherte sich der Stoßkraftverlauf dem in Bild 9 angegebenen. Die ermittelte Hammerleistung lag am Anfang bei 7 %, und nahm dann bis 32 % gegenüber der theoretisch möglichen zu. Zwei Stoßvorgänge sind dazu in Bild 11 dargestellt, der 6. und der 452. Schlag.

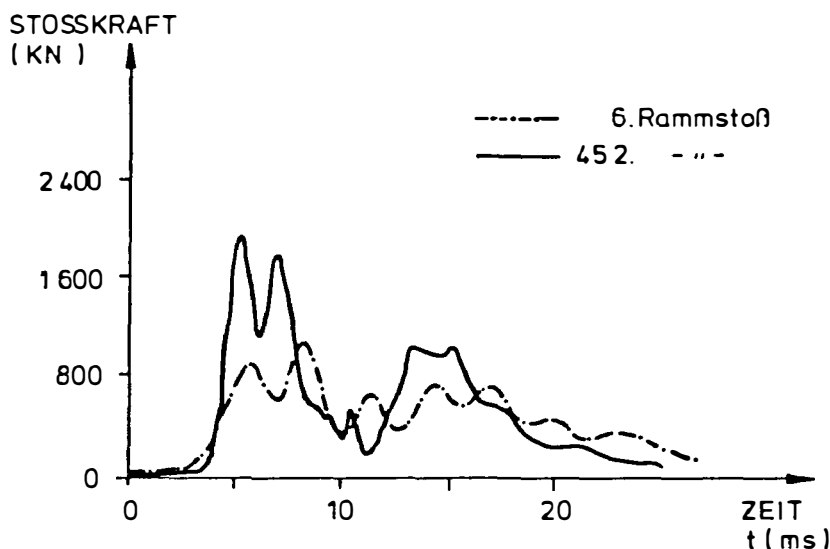


Bild 11: Messergebnis: 6. und 452. Rammstoß

8. Stoßkraftverlauf verschiedener Rammsysteme

Bei der Rammung von Fertigbetonpfählen wird das Verfahren seit einigen Jahren zur Prüfung der Pfahlintegrität und der Tragfähigkeit verwendet. Bild 12 zeigt Beispiele des Stoßkraftzeitverlaufes für unterschiedliche Rammsysteme: Dieselsbär, Schnellschlaghammer und Freifallsbär. Die Form des Stoßes wird auch durch das Verhältnis der Impedanz des Rammbären zum Pfahl bestimmt (20). Aus den Meßkurven in Bild 12 sind die grundlegenden Unterschiede ersichtlich:

- Dieselsbär: komplexer Kraft-Zeitverlauf mit dreieckförmigem Verlauf
- Schnellschlagbär: kurze Stoßdauer mit hohen Stoßkräften (Stahl auf Stahl)
- Freifallsbär: lange Stoßdauer mit rechteckförmigem Verlauf.

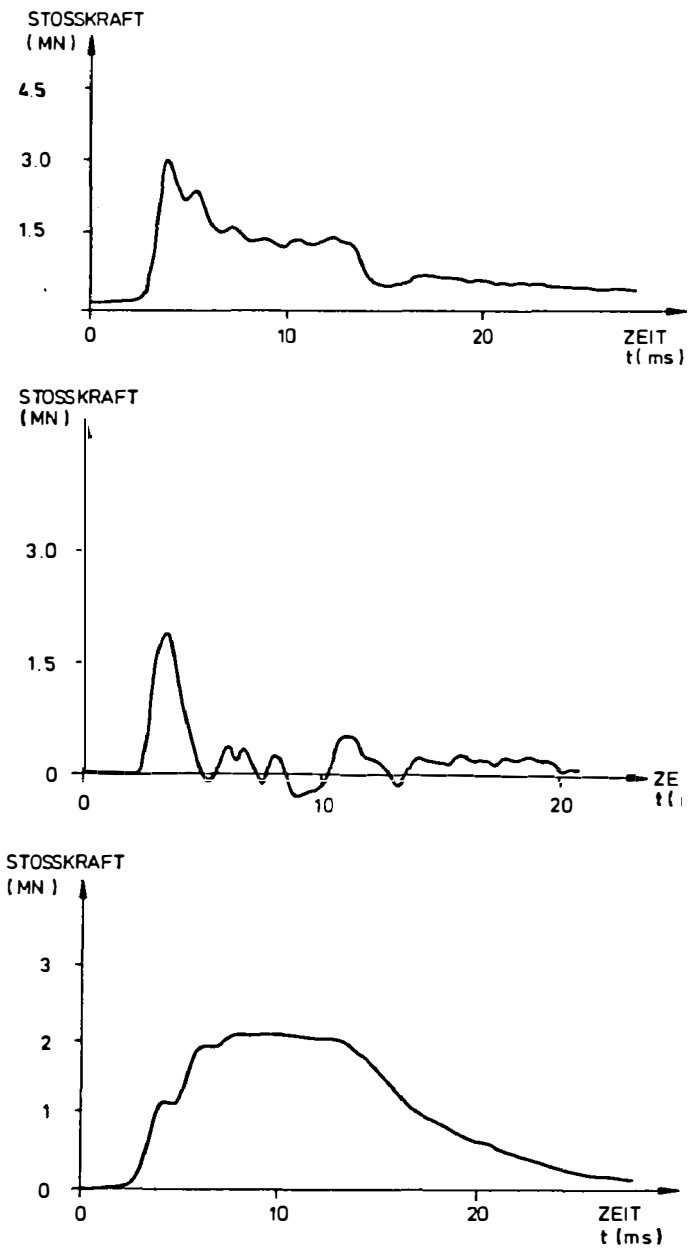


Bild 12: Beispiele des Stoßkraftzeitverlaufes für unterschiedliche Rammsysteme
Oben : Dieselbär D 22 (Fertigbetonpfahl)
Mitte : Schnellschlagbär Menck SB 180 (Spundwand)
Unten: Freifallbär 4 t (Fertigbetonpfahl)

9. Vergleichsuntersuchungen: Freifall- und Dieselbär

Bei einer Baustelle wurden vergleichende Untersuchungen zwischen einem D 22 und einem 4 t Freifallbär vorgenommen.

Die Vergleichsuntersuchungen ergaben, daß der Wirkungsgrad des Freifallbären mehr als doppelt so groß ist wie beim D 22 (Bild 13, oben). Betrachtet man die Eindringungen/Stoß so sind sie beim D 22 nahezu konstant und bei dem Freifallbär mit zunehmender Fallhöhe größer (Bild 13, unten). Entscheidend für die Auswahl des Gerätes ist hier u. a. die erforderliche Rammzeit. Hierbei wurde der D 22 ausgewählt. Für andere Anwendungen kann anhand der Messung jeweils beurteilt werden, welches der vorgesehenen Geräte am wirtschaftlichsten arbeitet.

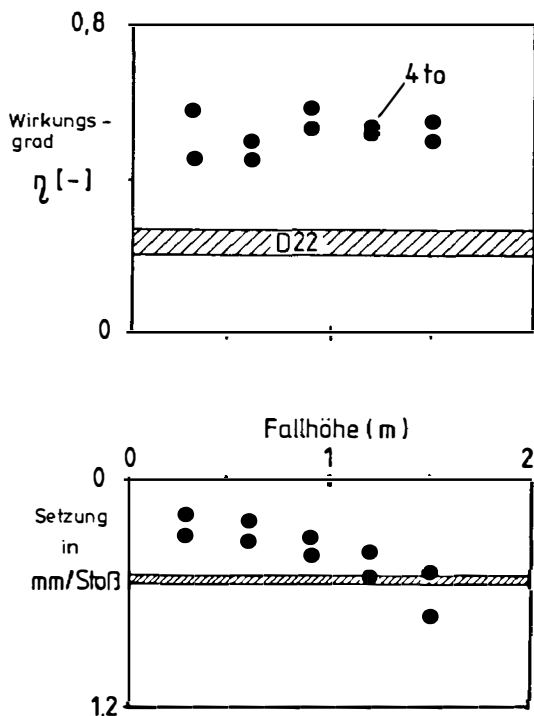


Bild 13: oben: Wirkungsgrad bei einem 4 t Freifallbär und einem D 22
unten: Fallhöhe zur Pfahleindringung in mm/Stoß

10. Hammer-Pfahloptimierung

Für die Herstellung der Pfahlgründung einer Lagerhalle wurden unterschiedliche Fertigbetonpfahltypen und Dieselbäre eingesetzt. Während der Rammung wurden die statischen Tragfähigkeiten nach CASE ermittelt. Dazu wurde für den Boden eine Dämpfungsziffer zugrunde gelegt, die aus empirischen Daten und (5) hergeleitet wurde (Bild 14).

Das Meßverfahren diente zur Festlegung des Pfahltyps und Hammers. Die vorgesehene Gebrauchslast lag bei 750 kN. Der Nachweis der statischen Widerstandskraft mit dem Verfahren nach CASE erreichte bei 4/6 der eingesetzten Pfähle mehr als die doppelte Gebrauchslast.

Pfahltyp	Ramm- bär	Abmessungen cm	Einbindelänge m	Statische Tragfähigkeit kN
1	D12	25/25	8	1200
2	D12	33	8	1630
3	D12	33V	8	1510
4	D12	25/25	7	1760
5	D12	30/30	8	1430
6	D22	35/35V	14	1920
7	D22	35/35	10	2060

Bild 14: Versuchsergebnisse

11. Zusammenfassung

Der Einsatzbereich dieser dynamischen Verfahren ist sehr vielseitig und kann bei unterschiedlichen Hämmern und Pfahltypen wichtige Daten über die Funktionsweise, Systemeigenschaften und Baugrund liefern. Diese Daten tragen dann zur Auswahl eines optimalen Gesamtsystems Hammer-Stoßhaube-Pfahl-Boden bei.

In Verbindung mit dem Wellengleichungsverfahren WEAP ist es möglich, vor den Baumaßnahmen eine Optimierung und gleichzeitig eine Rammvorschrift auszuarbeiten.

Als dynamisches Rammprotokoll gibt die Messung einen zusätzlichen Aufschluß über den Baugrund, dient zur Rammhammerüberwachung und Integritätskontrolle des Pfahles. Das Verhalten der Stoßhaube und die Rammspannungen werden überwacht. Rammbegleitende Schäden an Pfahl oder Rammgerät sind dadurch ausgeschlossen.

Für die Zukunft sind mit diesem Verfahren neben der Weiterentwicklung zu einer besseren Ausnutzung auch Neuentwicklungen möglich (12), die hier vor allem in der Pfahl-Hammeroptimierung, Weiterentwicklung von Stoßhauben, Erhöhung der Rameffizienz, "schonenden" Rammung, den begleitenden dynamischen Baugrundsondierungen und der Absicherung von Tragfähigkeiten zu sehen sind.

12. Literatur

1. Der Bundesminister für Forschung und Technologie,
Zukunftsaufgaben in der Bauforschung, Bonn 1981
2. Barber, G.: Fitting the hammer to the pile and soil,
Piletalk Seminar, Florida 1978
3. de Beer, de Jonghe, Carpentier, Hever, Scholtes:
H. Steel Piles in Dense Sand, Proc. of the 10. ICSMFE,
Stockholm, 1981, Balkema, Rotterdam 1981
4. Conrad, Oben, Meseck: Statische Probelastungen und
dynamische Pfahltests an Stahlrampfpählen, BT 1/84
+ 2/84
5. Goble, Rausche, Likins: The Analysis of Pile Driving;
State-of-the-Art, Proc. Application of Stress Wave
Theory on Piles, Stockholm, 1980
6. Hellmann, Larsson: Pile Driving Equipment, Research
Work Concerning a More Effective Cap, ICSMFE 1977,
Tokyo
7. Kümmel, F.: Der Aufbau des Kraftfeldes im Rammgut bei einem
Schlag, 1980
8. Kümmel, F.: Wellengleichungen, Delmag 1981
9. Likins, G.: Evaluating the performance of pile driving ham-
mers, Users day Amsterdam, 1982
10. Lucier: Performance of Single Acting Diesel Hammers, 2. Proc.
Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm
1984
11. Meseck, H.: Anwendung eines Wellengleichungsprogramms zur
Ermittlung der Tragfähigkeit von Rampfpählen, Sonder-
heft zum 10jährigen Bestehen des Institutes für Grund-
bau und Bodenmechanik der TU Braunschweig

12. Olsson, Stensgard, Grävare: Hammer, Performance, 2. Proc. Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm 1984
13. Rausche, F.: Hammer Performance Measurement, Users day, Philadelphia, 1983.
14. Rausche, F.: Performance of Pile Driving Hammers, J of Construction Division Asce, 09, 1972, 9188, 201-218
15. Rausche, Meseck: Möglichkeiten und Grenzen dynamischer Pfahltestverfahren, Symposium "Meßtechnik im Erd- und Grundbau", November 1983, München DGEg.
16. Rempe, Davisson: Performance of Diesel Pile Hammers, IX ICSMFE, Tokyo 77
17. Seitz, J.: Dynamische Messungen zur Integrität und Tragfähigkeit von Bohrpfählen, Symposium "Meßtechnik im Erd- und Grundbau", November 1983, München, DGEg.
18. Seitz, J.: Dynamische Messungen an Rammhämmern und Pfählen Baugewerbe 13/14, 85
19. Simons, H.: Rammen und Rütteln in verschiedenen Böden, BM + BT, 9/10-1970
20. Simonsen, Jensen: Bearing Capacity of Steel Pipe Piles and Hammer Performance, Dynamic Measurement of Piles and Piers, ASCE Philadelphia 1983
21. Soares, Matos, de Mello: Pile Driveability Studies, Pile Driving Measurements, 2. Proc. Application of Stress Wave Theory an Piles, Stockholm 1984
22. Wu, M., Gurtowski, T., Yamane, G.: Field Evaluation of Diesel Hammer Performance, 11. Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engineering, 1985

Neue Forschungsergebnisse

Dipl.-Ing. H.-G. Balthaus + Dipl.-Ing. H. Meseck
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig

1. Einleitung

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig beschäftigt sich seit 1978 mit den Verfahren der Stoßprüfung von Pfählen (allgemein als dynamische Pfahltests bezeichnet). Unter der Leitung von Professor Dr.-Ing. Hanns Simons wurde in kurzer Zeit eine eigene Meß- und Auswertungsanlage entwickelt und auf verschiedenen Baustellen erprobt.

Nach der Auswertung des umfangreichen amerikanischen Schrifttums und nach dem Vorliegen eigener Baustellenerfahrungen war es offensichtlich, daß wesentliche Grundlagen der dynamischen Pfahltests erst unzureichend erforscht waren. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurden die ersten Forschungsanträge formuliert. Im folgenden soll über diese Forschungsarbeiten und deren Ergebnisse zusammenfassend berichtet werden.

2. Tragfähigkeit von Rammpfählen

2.1 Allgemeines

Dem Ausgangspunkt der dynamischen Verfahren gemäß sind in der Vergangenheit und werden auch heute noch die intensivsten Forschungsanstrengungen der dynamischen Tragfähigkeitsermittlung von Rammpfählen gewidmet. Träger dieser Forschungsarbeiten ist in der Bundesrepublik in erster Linie das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig.

Die 11. "Internationale Konferenz zur Anwendung der Spannungswellentheorie auf Pfähle" hat gezeigt, daß dem Thema der Tragfähigkeit und Integrität von Rammpfählen auch international die größte Beachtung geschenkt wird. Insbesondere aus dem Bereich der Offshore-Technik sind dazu entscheidende Impulse gekommen.

Zur Zeit stehen am Institut für Grundbau und Bodenmechanik drei Forschungsvorhaben zu dynamischen Pfahltests an Rammpfählen kurz vor ihrem Abschluß. Es sind dies ein Vorhaben zu den mathematisch-physikalischen Grundlagen dynamischer Pfahltests, das von der Stiftung Volkswagen-Werk gefördert wird und zwei aus DFG- bzw. niedersächsischen Landesmitteln geförderte Projekte, die eine Vielzahl dynamischer Tests an Baustellenrammpfählen und deren Korrelation zu statischen Probelastungs- und Sondierergebnissen beinhalten.

Auf wesentliche Erkenntnisse aus den genannten Vorhaben soll im folgenden eingegangen werden.

2.2 Modellversuchstechnik

Für die Untersuchung der mathematisch-physikalischen Grundlagen des Verhaltens von Rammpfählen wurden am Institut für Grundbau und Bodenmechanik verschiedene Versuchseinrichtungen und meßtechnische Verfahren für pfahldynamische Modellversuche entwickelt.

An einem Modellpfahl (Bild 1) wurden in trockenem Sand statische Last-Setzungsversuche und dynamische Pfahltests mit Beschleunigungsmessungen an zwei Stellen und Kraftmessungen an drei Stellen des Pfahles durchgeführt. Die Kräfte wurden mit außen am Pfahl applizierten Dehnungsmeßstreifen (DMS) aufgenommen. Zum Schutz der Dehnungsmeßstreifen wurde ein in Bild 2 dargestellter, mehrschichtiger Schutzüberzug verwendet. Die dargestellte Anordnung hat sich während der über zwei Jahre währenden Versuchsdauer ununterbrochen bewährt.

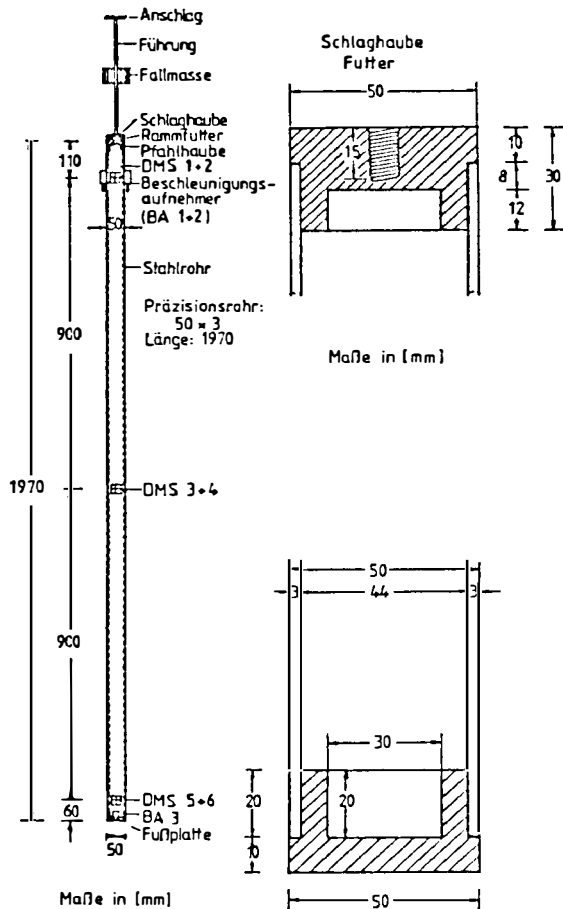


Bild 1: Modellpfahl mit Meßstellen für statische und dynamische Versuche

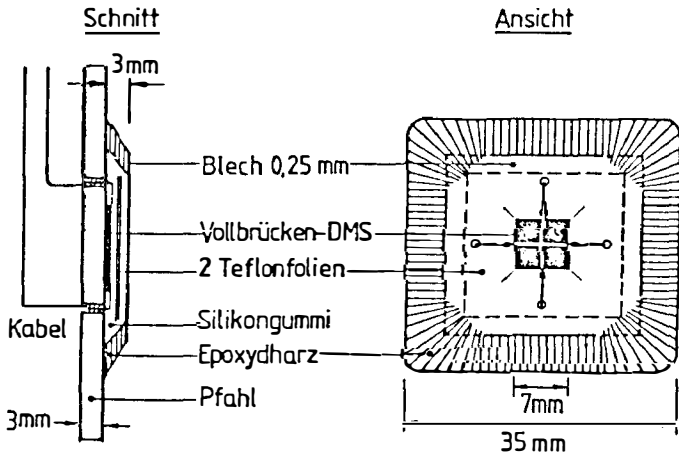


Bild 2: Anbringung der Dehnungsmeßstreifen am Pfahl
(nach Balthaus u. Früchtenicht, 1983)

Die für die dynamischen Versuche eingesetzte Meß- und Auswerteeinrichtung ist in Bild 3 wiedergegeben. Kernstück der Meßanlage war ein achtkanaliger Transientenrekorder, dessen Arbeitsweise bereits in einem vorausgegangenen Beitrag zu diesem Band beschrieben worden ist.

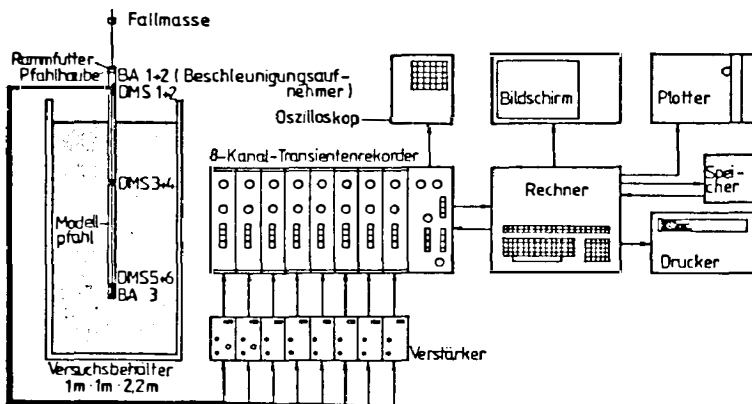


Bild 3: Prinzipskizze der dynamischen Meßeinrichtung

Mit derselben Meßgeräte- und Rechnerkonfiguration konnten auch reine Mantelwiderstandsversuche an einem horizontal durch einen geeigneten Versuchsbehälter geführten Stahlstab durchgeführt werden (Bild 4). Dazu wurde das dynamisch in den Stab eingeleitete Kraftsignal vor und nach dem Durchgang durch den Behälter mit DMS gemessen und anschließend rechnerisch ausgewertet.

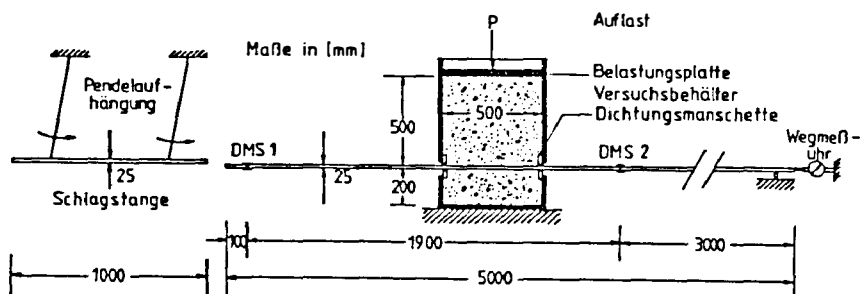


Bild 4: Versuchseinrichtung für dynamische Mantelwiderstandsversuche

2.3 Mathematisch-Physikalische Grundlagen

Im Rahmen des von der Stiftung Volkswagenwerk geförderten Vorhabens wurde neben der Durchführung und Auswertung von Modellversuchen auch ein Rechenmodell für das dynamische Verhalten von Rammpfählen entwickelt, mit dem die Wellenausbreitung im Pfahl für verschiedenartige Gesetze des Bodenwiderstandes am Pfahlmantel und an der Pfahlspitze untersucht werden kann.

Das Rechenmodell wurde in ein Computerprogramm (PDYN) eingebaut, mit dem Berechnungen nach dem CAPWAP-Verfahren sowohl nach dem bisher üblichen vom Benutzer gesteuerten Suchprozeß als auch mit einer computergestützten objektiven Optimumsuche möglich sind (Balhaus, 1985).

Das in FORTRAN 77 geschriebene Programm PDYN gliedert sich in drei Hauptblöcke, deren gegenseitige Zuordnung in Bild 5 dargestellt ist.

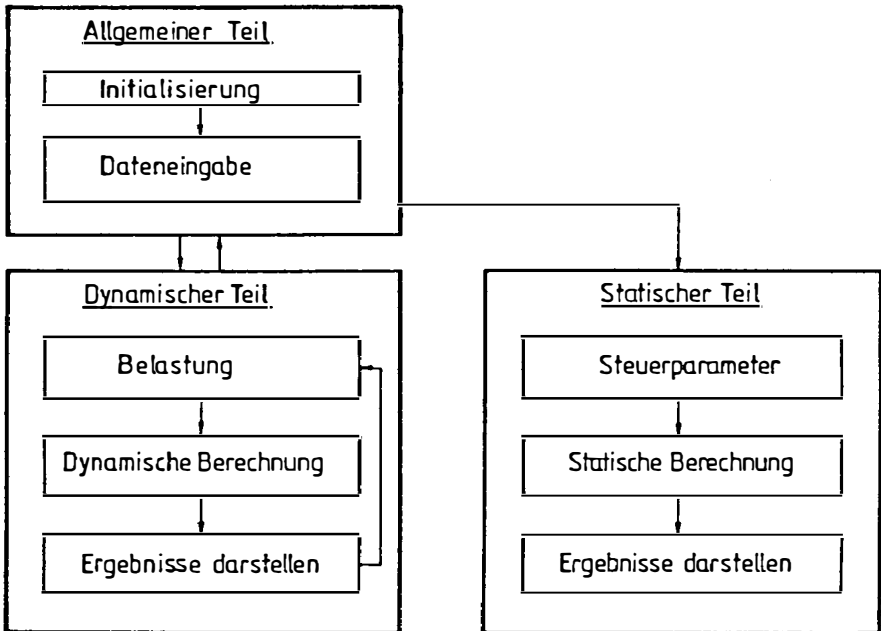


Bild 5: Aufbau des Programmes PDYN

Ein erster allgemeiner Teil dient im wesentlichen der Dateneingabe. Diese erfolgt von einem Hauptmenue aus, das gleichzeitig die Generierung, Korrektur, Anzeige und Ausgabe von Daten erlaubt. Allgemeine Daten, Pfahlgeometrie, Pfahleigenschaften, Bodenaufbau und Bodeneigenschaften können von dort aus eingegeben werden.

Im zweiten Hauptblock des Programmes findet die eigentliche dynamische Berechnung statt. Dazu ist zunächst der Zeitverlauf der Belastung festzulegen. Dies geschieht im Programmteil "Belastung". Hier wird entschieden, ob eine gemessene Belastung oder eine synthetische Belastungs-Zeit-Funktion verwendet werden soll. Neben den Kenngrößen der Belastung, dem Lastangriffspunkt und der Dauer der Belastung wird festgelegt, ob die Belastung

transient oder eine Schwingung ist und ob die Kraft oder die Geschwindigkeit als mechanische Randbedingung vorgegeben werden soll.

Die eigentliche dynamische Berechnung kann als Einzelberechnung für einmal festgelegte Kenntwerte des Bodenwiderstandes oder mit automatischer Optimi Versuche bei gleichzeitiger Variation der Widerstandskennwerte durchgeführt werden.

Im dritten Hauptteil des Programmes können die statischen Last-Setzungslinie des Pfahles und die Kraftverteilungen im Pfahl für verschiedene Laststufen errechnet werden.

Graphische Darstellungen der Ergebnisse und Kontrollausdrücke sind in allen Phasen der Berechnung möglich.

Der Algorithmus des Programmes PDYN beruht auf einer Lösung der einfachen, eindimensionalen Wellengleichung mit der Methode der Charakteristiken. Der Pfahl wird für die Wellenausbreitung als Kontinuum betrachtet. Die angreifenden, nicht-linearen oder linearen verschiebungs- und geschwindigkeitsabhängigen Bodenwiderstände werden an einzelnen Punkten diskretisiert. Die Eingung dieses Rechenmodells auch für die Untersuchung der Wellenausbreitung von kontinuierlich elastisch gebetteten gedämpften Pfählen wurde mit exakten analytischen Modellen überprüft. Bild 6 zeigt einen Vergleich von analytisch und numerisch gewonnenen Ergebnissen.

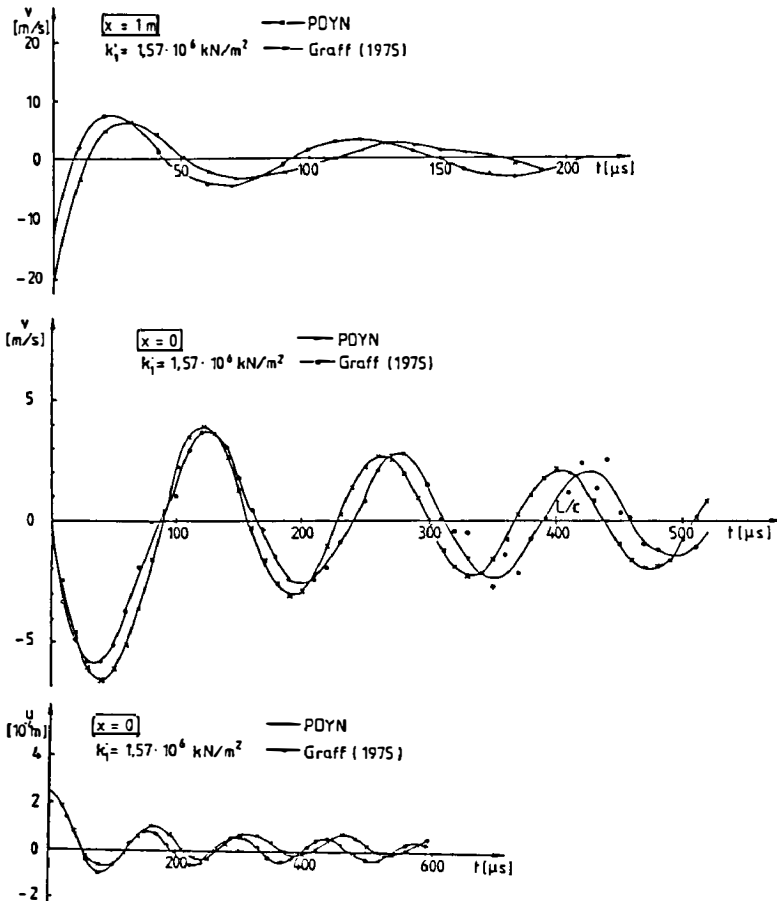


Bild 6: Bewegungsgrößen an verschiedenen Pfahlpunkten bei hoher Steifigkeit der Lagerung für exakte und numerische Lösung bei Belastung durch Dirac-Impuls (nach Balthaus, 1985)

Im Hinblick auf die Gesetze des Bodenwiderstandes haben umfangreiche, systematische Berechnungen nach dem CAPWAP-Verfahren mit computergestützter Bodenkennwertbestimmung gezeigt, daß mit linear viskoser, also geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung und einem bilinearen elasto-

plastischen verschiebungsabhängigen Bodenwiderstand sehr gute Anpassungen von Messung und Rechnung zu erzielen sind.

In Bild 7 ist ein Beispiel für Berechnungen am Modellpfehl (Bild 1) wiedergegeben. Es zeigt sich eine erstaunlich gute Übereinstimmung zwischen allen gemessenen und gerechneten Kräften.

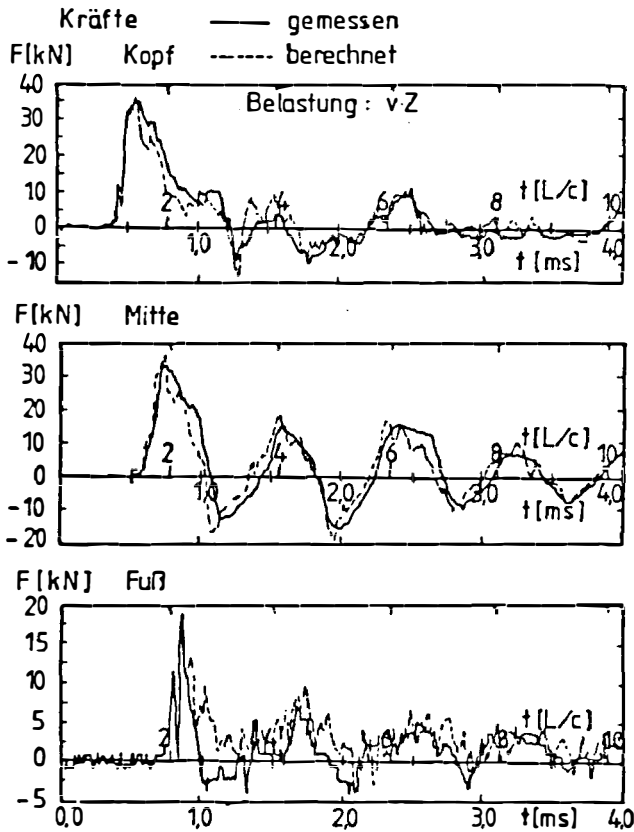


Bild 7: Gemessene und berechnete Kraftverläufe am Modellpfehl bei Belastung durch Geschwindigkeitsrandbedingungen am Pfeilkopf

Für den Modellpfehl wurden auch nach dem CAPWAP-Verfahren gewonnene, statische Grenztragfähigkeiten mit denen aus statischen Probelastungen verglichen. Die erzielbaren Übereinstimmungen erreichten meist nicht die Qualität wie bei den dynamischen Meß- und Rechenergebnissen.

2.4 Messungen an Bauwerkspfählen

Parallel zu den Modellversuchen im Labor wurden Forschungsarbeiten zum Eindring- und Tragverhalten von Rammspfählen durchgeführt. Die hierfür entwickelte und auf verschiedenen Baustellen im In- und Ausland eingesetzte Meß- und Auswertungsanlage ist im Bild 8 dargestellt.

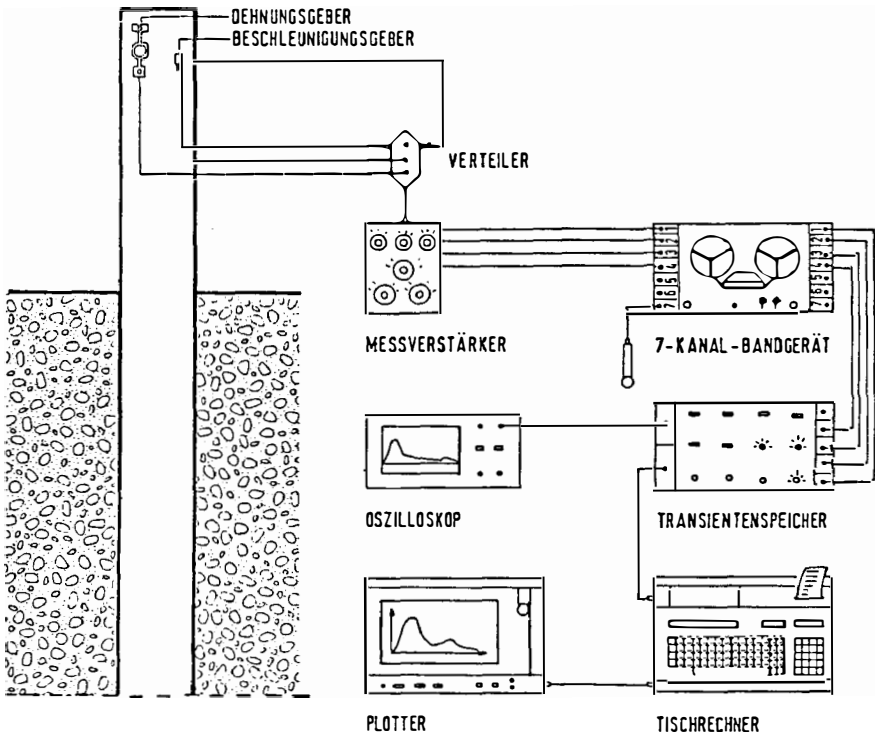


Bild 8: Meß- und Auswertungseinrichtung für dynamische Pfehltests, System Braunschweig

Für die Untersuchungen im Rahmen von Forschungsvorhaben wurden Stahlbetonrammpfähle mit einem Durchmesser von 30 cm bis zu großen Stahlträgern mit einer Steghöhe von mehr als 100 cm getestet. In einem der Forschungsvorhaben wurde zusätzlich auch das Eindring- und Tragverhalten von Rammsonden und Modellpfählen auf den Baustellen untersucht.

Im Bild 9 sind die Kraft- und Geschwindigkeitskurven für einen Stahlbetonrammpfahl und eine Rammsonde dargestellt. Das Bild 10 zeigt die in einem statischen Druckversuch ermittelten Last-Setzungslinien.

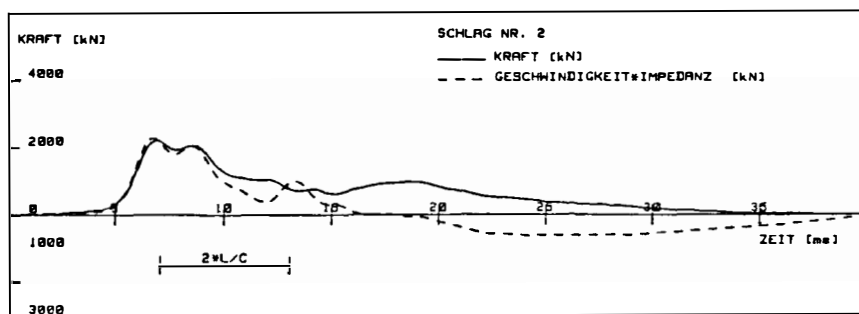
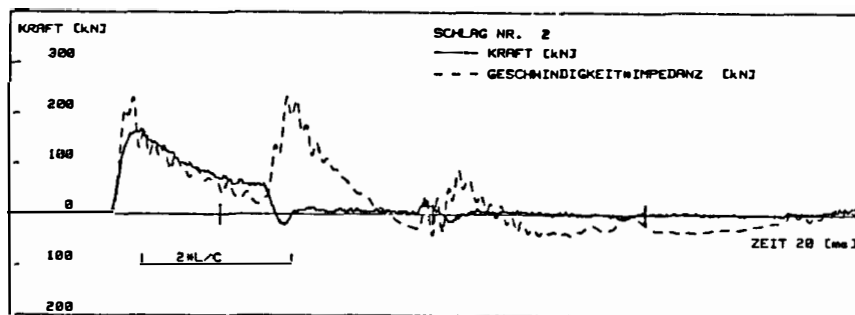


Bild 9: Kraft- und Geschwindigkeitskurven einer Rammsonde (oben) und eines Stahlbetonrammpfahles (unten)

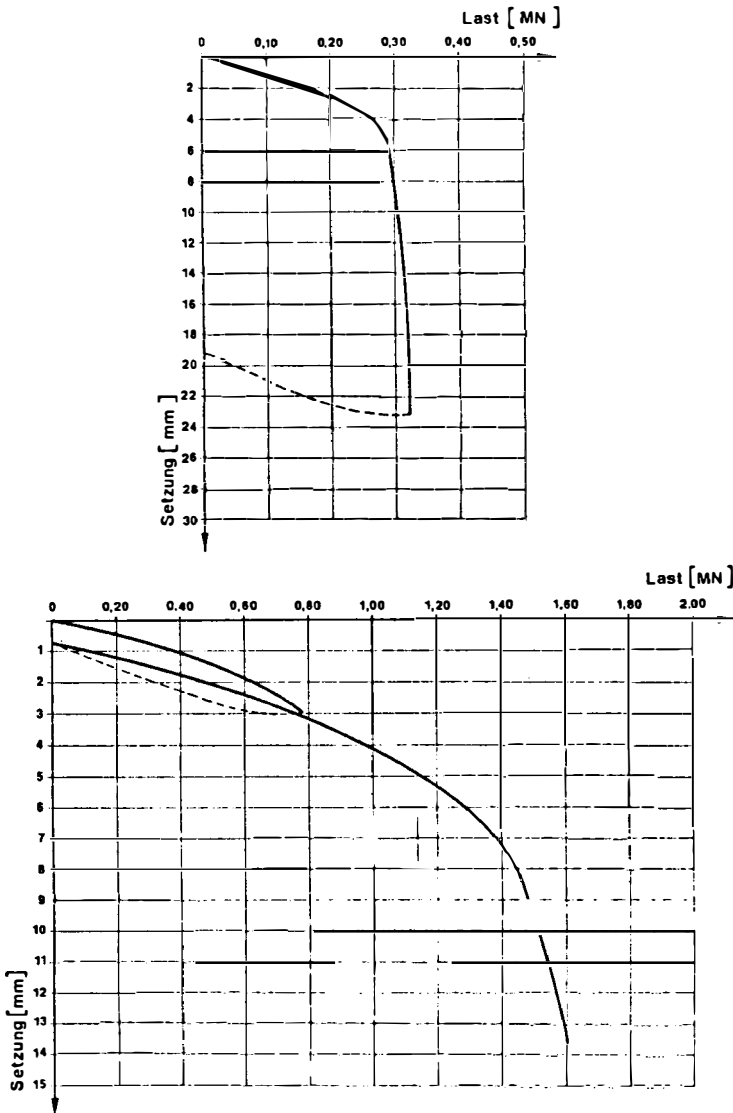


Bild 10: Last-Setzungslinien eines Rammsondengestänges (oben) und eines Stahlbetonrammpfahles (unten)

Neben den üblichen Messungen der Dehnungen und Beschleunigungen am Pfahlkopf standen uns auch einige Pfähle zur Verfügung, die wir über die Pfahllänge zusätzlich mit Dehnungsgebern ausstatten konnten. Das Bild 11 zeigt die Applikation von Dehnungsmeßstreifen an einem Stahlpfahl.

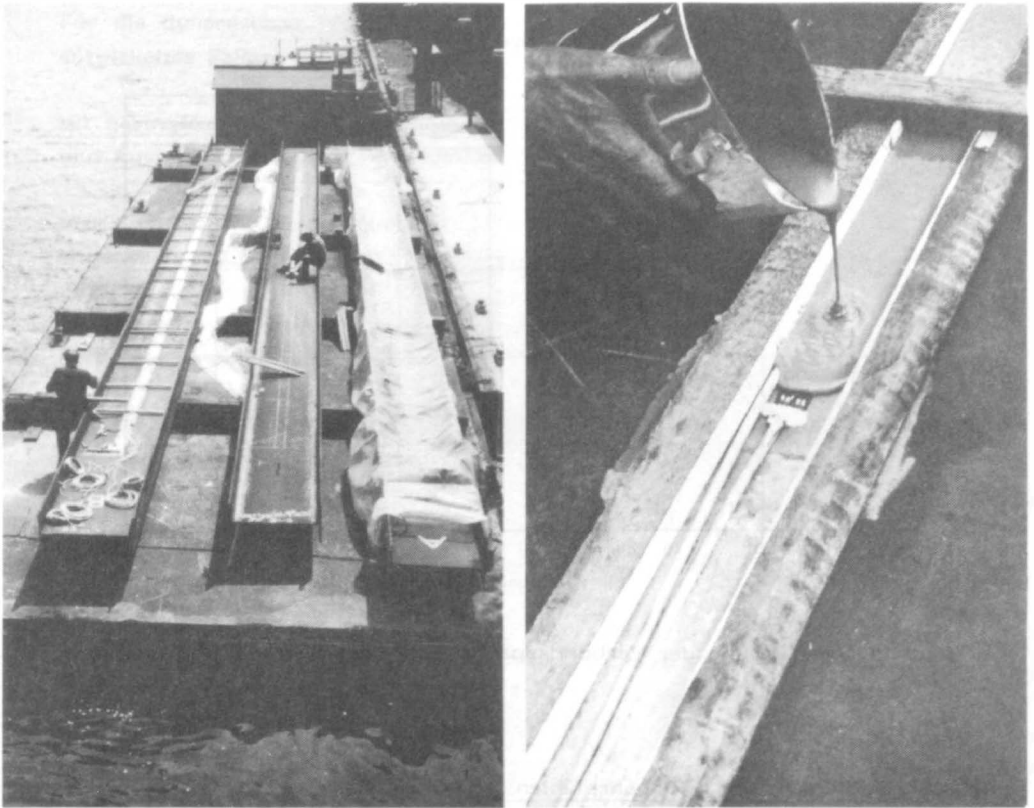


Bild 11: Applikation von Dehnungsmeßstreifen auf einem Stahlpfahl

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffkunde der Technischen Universität Braunschweig wurden Untersuchungen zum Verbund von Spannbetonlizen im Pfahlkopfbereich von Spannbetonpfählen durchgeführt. Die Veränderung des Verbundes zwischen Spannstahl und Beton ist im Bild 12 in Abhängigkeit von der Anzahl der aufgetragenen Rammschläge dargestellt.

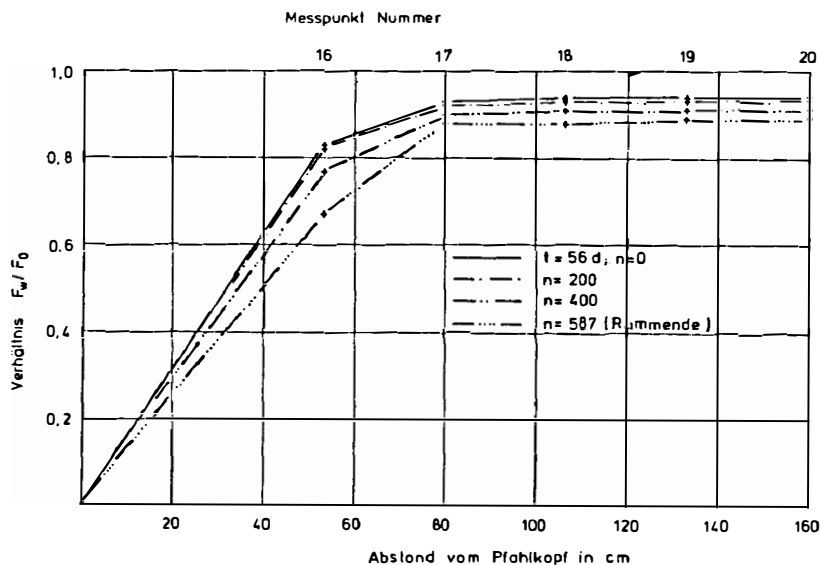


Bild 12: Veränderung der Verbundsspannungen eines Spannbetonpfahles

3. Tragfähigkeit von Großbohrpfählen

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Forschungsvorhabens über "Technisch/Wissenschaftliche Optimierung verbesserter Großbohrpfahlprüfungen" wurden erstmals in der Bundesrepublik in größerem Umfang dynamische Pfahltests an Großbohrpfählen durchgeführt. Das Vorhaben wurde von den Firmen Bilfinger + Berger AG, Mannheim und Philipp Holzmann AG, Hauptniederlassung Düsseldorf durchgeführt. Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig war mit der wissenschaftlichen Betreuung der Forschungsarbeiten betraut.

Da für Großbohrpfähle die statische Probelastung sehr zeit- und kostenintensiv ist, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersucht, ob die bei Rammpfählen erfolgreich durchgeführten dynamischen Tragfähigkeitsprüfmethode auch auf Großbohrpfähle anwendbar sind.

Für die dynamischen Pfahltests wurde ein von der Firma Bilfinger + Berger entwickeltes Fallgewicht (5 t oder 10 t) (Seitz/Klingmüller, 1984) eingesetzt.

Mit geringfügigen Modifikationen konnte die für Rammpfähle entwickelte Meß- und Auswerteeinrichtung auch für Großbohrpfähle verwendet werden.

Vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik wurden einige Pfähle in 4 Meßebenen mit Dehnungs- und Beschleunigungsaufnehmern ausgestattet. Über zwei Magnetbandgeräte konnte eine maximal 14-kanalige dynamische Datenerfassung mit anschließender Auswertung über einen 8-kanaligen Transientenrekorder erfolgen.

Die bei den dynamischen Pfahltests gewonnenen Ergebnisse wurden ausführlich von Seitz/Klingmüller (1984) und Krause/Brieke (1985) dargestellt und erläutert.

4. Integritätsprüfungen

Erste Verfahren zur zerstörungsfreien Überprüfung der Integrität von Pfählen sind bereits Ende der sechziger Jahre in Europa entwickelt worden (Garbrecht, 1970). Die heute vorhandenen Verfahren lassen sich in drei Gruppen einteilen:

■ Bohrlochmessungen

Bei diesem Verfahren wird die Qualität des Pfahlbetons zwischen zwei Bohrlöchern bzw. zwischen zwei einbetonierten Führungsrohren mit Ultraschall oder Gammastrahlen überprüft.

■ Schwingprüfung

Am Pfahlkopf wird ein Schwingerreger angebracht, der einen Frequenzbereich von 0 bis zu einigen 100 Hz durchfährt. Aus den dabei am Kopf gemessenen Kraft und Geschwindigkeiten können pauschale Aussagen über den Elastizitätsmodul und Länge des Pfahles gemacht werden.

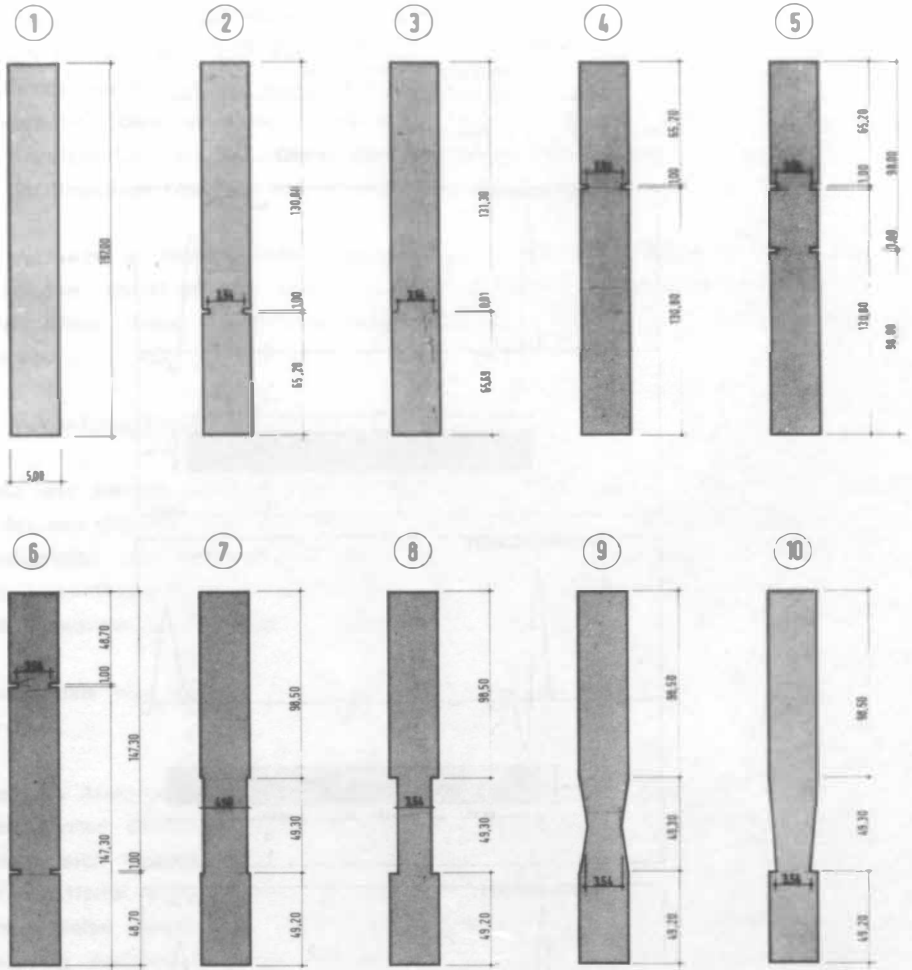
■ Schlagprüfung

Bei der impulsartigen Schlagprüfung wird am Pfahlkopf über eine kleine Fallmasse ein Stoßimpuls aufgebracht und die am Pfahlkopf auftretenden Beschleunigungen gemessen. Aus dem aufgezeichneten Beschleunigungszeitverlauf lassen sich Aussagen über die Pfahllänge und die vorhandenen Fehlstellen treffen.

Für die Durchführung und Auswertung impulsartiger Schlagprüfungen, wie sie vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik durchgeführt werden, kann im wesentlichen die Meß- und Auswertungsanlage der dynamischen Pfahltests verwendet werden. Im Rahmen eines vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst geförderten Forschungsvorhabens sollten die Anwendungsgrenzen dieser Integritätsprüfung, aber auch die Möglichkeiten einer Weiterentwicklung erforscht werden.

Um zunächst die Meßtechnik zu optimieren und Grenzen der gerade noch zu erkennenden Fehlstellen festzustellen, wurden zunächst Modellversuche durchgeführt. Hierfür wurden Kunststoffpfähle mit einer Länge von 1,97 m und einem Durchmesser von 5 cm mit verschiedenen Fehlstellen hergestellt. Einen Überblick über die untersuchten Modellpfähle gibt das Bild 13.

Diese Modellpfähle wurden zunächst frei, d. h. ohne Mantelreibung und nur mit geringem Spitzenwiderstand getestet. Anschließend wurden die Pfähle in eine Versuchsgrube in einem einkörnigen Sand eingebaut und daran anschließend auf einer Baustelle in einen sandigen Schluff eingebaut. Die Ergebnisse dieser umfangreichen Versuche werden demnächst veröffentlicht (Meseck, Balhaus 1986). Das Bild 14 zeigt einige Meßergebnisse an diesen Modellpfählen.



QUERSCHNITT:



∅ 5.00 cm

Bild 13: Modellpfähle zur Untersuchung der Integrität

INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
INTEGRITÄTSPRÜFUNG

BAUSTELLE : LABOR

PFÄHLSYSTEM : PE HML 500 MODELLSTREBE

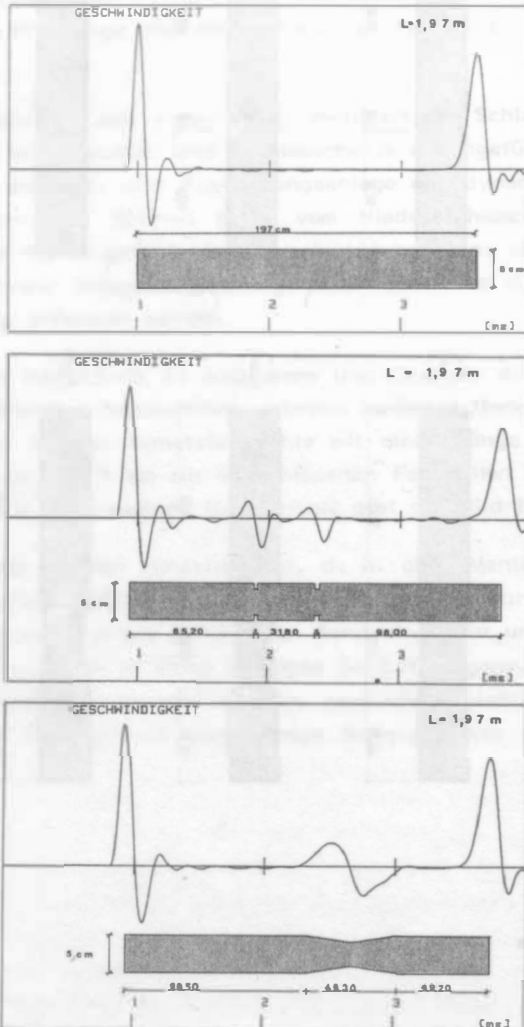


Bild 14: Beispiele für Ergebnisse von Integritätstests an Modellpfählen

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß an freien Pfählen alle Fehlstellen erkannt werden können. Dies gilt aber nur für die Lage der Fehlstelle und nicht für die Größe der Fehlstelle. Besonders kleine Risse werden in ihrer Ausdehnung überschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der eingeleitete Stoßimpuls eine gewisse Laufzeit hat. Die Laufzeit zwischen der Einleitung und dem Ende des Stoßimpulses bestimmt die gerade noch erkennbare Breite eines Risses.

Die Versuche an Modellpfählen wurden ergänzt durch umfangreiche Baustellenmessungen. Dabei standen uns u. a. auch präparierte Betonpfähle zur Verfügung. Über diese Ergebnisse haben Balhaus und Meseck (1984) bereits berichtet.

5. Zukünftige Forschung

Trotz der bereits umfangreichen Forschungsanstrengungen weltweit auf dem Gebiet der Pfahldynamik handelt es sich um eine noch verhältnismäßig junge Teildisziplin der angewandten Bodendynamik. Für die Zukunft sind daher noch wesentliche Forschungsaktivitäten notwendig, bevor endgültige Aussagen und Antworten zu den noch offenen Fragen möglich sind.

Hier sollen nun einige der für die Zukunft wichtigsten Themen umrissen werden.

Über die Aussagekraft und Trennschärfe von Integritätsprüfungen an Pfählen unbekannter Geometrie liegen bisher nicht genügend Erkenntnisse vor. So können sich beispielsweise lokale Querschnittsveränderungen, Veränderungen der Elastizität eines Pfahles und örtlich wirkende Bodenwiderstände in ähnlicher Weise auswirken. Inwieweit Messungen und rechnerische Methoden eindeutig Aufschluß geben können und ob bekannte Meßmethoden auf eine größere Genauigkeit hin verbessert werden können, muß in Messungen an Baustellen- und Modellpfählen untersucht werden.

Im Hinblick auf die Tragfähigkeitsbestimmung mit dynamischen Pfahltests ist zu hoffen, daß die Ergebnisse von möglichst vielen dynamischen Tests mit statischen Probelastungen verglichen werden können und einer kritischen Beurteilung unterzogen werden.

Dazu ist eine genaue und umfassende begleitende Baugrunderkundung (Schichtung, Sondierergebnisse, Indexparameter, Festigkeitswerte, Wasserstand) wesentlicher Bestandteil der nachträglichen Auswertung.

Weiterhin bedarf das unterschiedliche Verhalten von Ramppfählen während der Erst- und einer Nachrammung weiterhin gründlicher Untersuchung.

Das Case-Verfahren gilt bisher von einer Konzentration sämtlicher dynamischer Bodenwiderstände an der Pfahlspitze aus.

Eine größere Verlässlichkeit der erzielbaren Ergebnisse könnte durch eine Aufspaltung der Dämpfung in einen Anteil am Pfahlmantel und einen Anteil am Pfahlfuß erreicht werden.

Schließlich muß erwähnt werden, daß bisher über die dynamischen Vorgänge der Kraftübertragung zwischen Pfahlmantel und Boden sowie an der Pfahlspitze nur begrenzte Kenntnisse vorliegen. Durch geeignete Versuchsanordnungen sollten in umfangreichen und genauen Labormessungen die Abhängigkeiten zwischen den Bodenwiderständen und den kinematischen Größen herausgearbeitet werden. Dadurch könnten für die Plastodynamik wertvolle Erfahrungen gesammelt werden.

Schrifttum:

- Balthaus, H.-G. : Tragfähigkeitsbestimmung von Ramm-
pfählen mit dynamischen Pfahlprüf-
methoden; am Fachbereich für Bauinge-
nieur- und Vermessungswesen einge-
reichte Dissertation (1985)
- Balthaus, H.-G. : Integritätsprüfungen an Ortbetonpfählen
Meseck, H. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 9,
1984, S. 470-478
- Garbrecht, D. : Prüfung von Pfahlbeton in situ; Die
Bautechnik 7/1976, S. 241-244 (1976)
- Krause, T. : unveröffentlichter Forschungsbericht an
Brieke, W. das Bundesministerium für Forschung und
Technologie, Inst. für Grundbau und
Bodenmechanik, TU Braunschweig und F:
Ph. Holzmann AG, Düsseldorf (1985)
- Rausche, F. : Möglichkeiten und Grenzen dynamischer
Meseck, H. Pfahltestverfahren
Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau,
Heft 11, 1983, S. 650-654, 659, 660, 673
- Seitz, J. : Dynamische Tragfähigkeitsprüfungen
Klingmüller, O. bei Bohrpfählen, Vorträge der Baugrund-
tagung, Düsseldorf, DGEG (1984)
- Simons, H. : Dynamische Pfahltests. Bauingenieur 58
Früchtenicht, H. (1983), S. 189-196
Meseck, H.

Kritische Betrachtung der dynamischen Pfahlprüfverfahren

Akad. Rat Dipl. – Ing. H. Meseck
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig

1. Allgemeines

Die Verfahren der Stoßprüfung von Pfählen, allgemein auch als dynamische Pfahltests bezeichnet, werden in der Bundesrepublik Deutschland seit ca. 1978 erprobt. Dabei können drei wesentliche Anwendungsbereiche unterschieden werden:

- Bestimmung der statischen Pfahltragfähigkeit
- Ermittlung der Integrität von Pfählen
- Bestimmung des Wirkungsgrades von Rammsystemen und deren Optimierung.

Auf allen genannten Gebieten hat das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig in den letzten Jahren Forschungsarbeiten und praxisbezogene Baustellenmessungen abgewickelt. Die wichtigsten der dabei gewonnenen Erkenntnisse über die Anwendungsgrenzen der Stoßprüfung von Pfählen sollen nachfolgend vorgestellt werden.

2. Stand der dynamischen Pfahltestverfahren

Die theoretischen Grundlagen der Stoßprüfung von Pfählen und die vorhandenen Auswertungsverfahren sind in den letzten Jahren in verschiedenen deutschsprachigen Veröffentlichungen beschrieben worden.

Als Grundlage der dynamischen Pfahltestverfahren werden heute weltweit die während einer Stoßbelastung am Pfahlkopf auftretenden Dehnungen und Beschleunigungen gemessen. Die dafür verwendeten Geber sind in den letzten Jahren weitgehend vereinheitlicht worden. Auch die Meß- und Auswertungsanlagen (Bild 1) unterscheiden sich nur noch in geringfügigen Details. Diese Unterschiede bestehen vor allem bei der analogen bzw. digitalen Speicherung der Meßsignale.

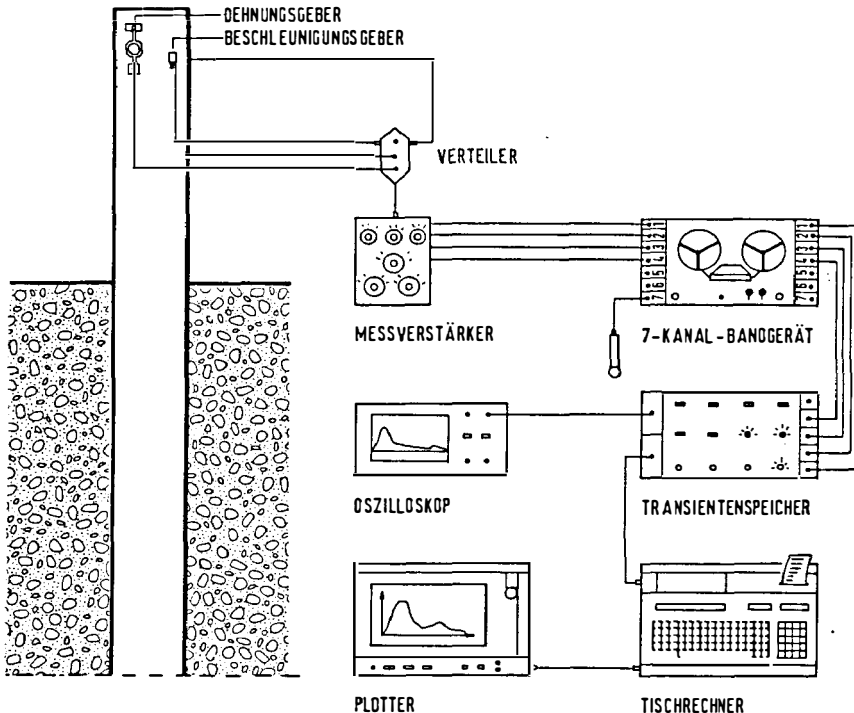


Bild 1: Schematische Darstellung eines Meß- und Auswertungs-systems für dynamische Pfahltests

Bei den Auswertungsverfahren haben sich das CASE und CAPWAP-Verfahren weitestgehend durchgesetzt.

Auf verschiedenen Baustellen im In- und Ausland konnten in den letzten Jahren die Ergebnisse verschiedener Anwender der dynamischen Pfahltests miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse der gemeinsam an einem Pfahl durchgeführten Messungen zeigten dabei jeweils Abweichungen, die kleiner als 3 % waren. Ein Beispiel für solche Messungen zeigt das Bild 2.

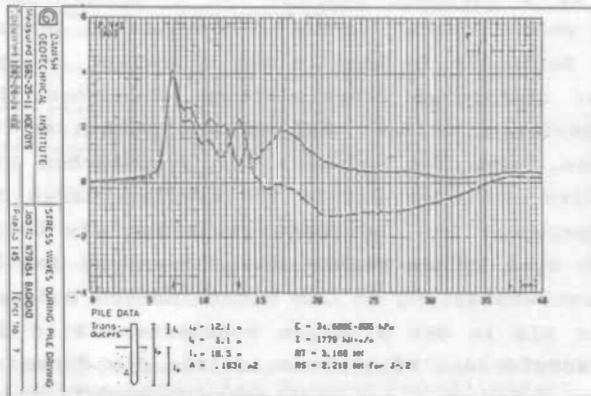
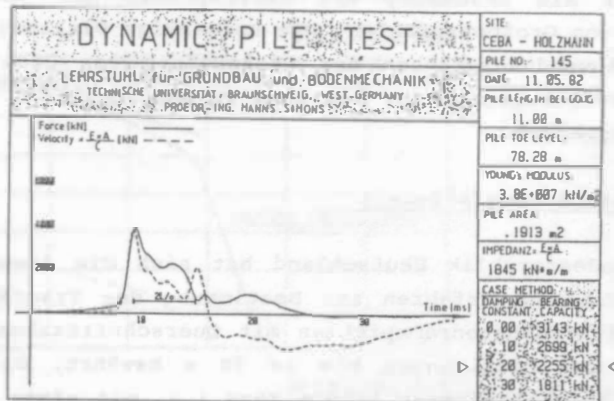


Bild 2: Ergebnisse einer CASE-Auswertung
oben: Institut für Grundbau und Bodenmechanik der
TU Braunschweig
unten: Danish Geotechnical Institute

3. Heutige Anwendungsgrenzen

3.1. Allgemeines

Die dynamischen Pfahltestverfahren sind ursprünglich für die Anwendung auf "übliche" Rammpfähle entwickelt worden. Darunter sind im wesentlichen Stahl- und Stahlbetonrammpfähle mit Querschnittsabmessungen von 0,4 x 0,4 m und Längen bis zu 20 m zu verstehen. Mit zunehmender Baustellenerfahrung hat man versucht, diese ursprünglichen Anwendungsgrenzen zu verschieben. Dies gilt sowohl für die Anwendung auf Wurzelpfähle als auch für die Anwendung von Großbohrpfählen. Die notwendige Diskussion über die heutigen Anwendungsgrenzen der Stoßprüfung von Pfählen bezieht sich daher überwiegend auf den Bereich außerhalb der klassischen Anwendungsgrenzen.

3.2. Statische Tragfähigkeit

In der Bundesrepublik Deutschland hat sich die Anwendung dynamischer Pfahltestverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Stahl- und Stahlbetonrammpfählen mit Querschnittsabmessungen bis zu 60 cm und Pfahllängen bis zu 30 m bewährt. Die statische Grenztragfähigkeit dieser Pfähle kann i.a. mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 10 \%$ bestimmt werden. Die Setzungen unter der Gebrauchslast werden dabei ebenfalls ausreichend genau ermittelt, während die Setzungen im Bereich der Grenzlast in der Regel vom Ergebnis der statischen Probelastung abweichen. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß diese Ergebnisse nur erreicht werden können, wenn der Anwender der dynamischen Pfahltestverfahren bereits ähnliche Pfähle in vergleichbaren Baugrundverhältnissen getestet hat. Darüber hinaus ist die Übereinstimmung zwischen den dynamischen Pfahltestverfahren und dem Ergebnis der statischen Probelastung in den nichtbindigen Bodenarten in der Regel besser als in den bindigen Bodenarten (Bild 3). Auch bei den oben beschriebenen Pfahlarten sollten die dynamischen Pfahltestverfahren daher an einer statischen Probelastung kalibriert werden.

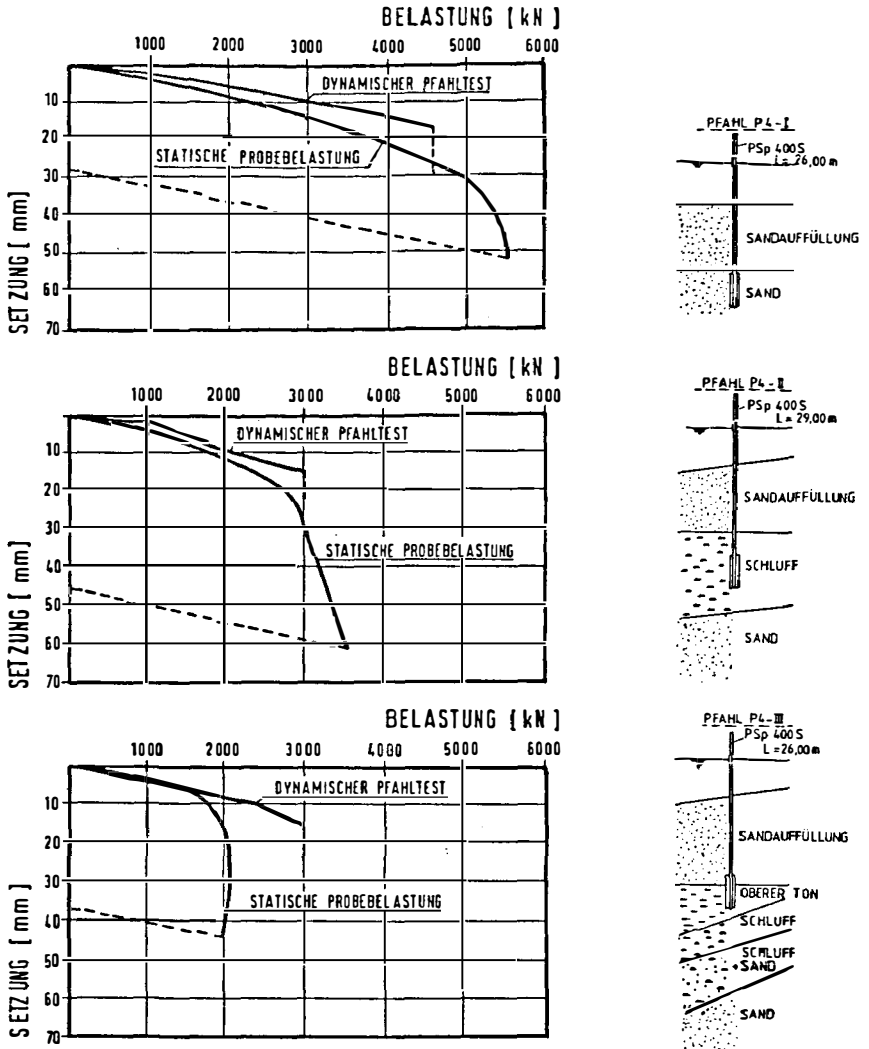


Bild 3: Last-Setzungslinien eines Stahlpfahles in unterschiedlichen Baugrundverhältnissen

Bei Ramppfählen mit großen Querschnittsabmessungen (z. B. große H-Profile mit einer Steghöhe von 1,00 m), großen Pfahlängen, die durchgehend in den Baugrund einbinden und Stahlflügelpfählen kann es zu erheblichen Abweichungen zwischen dem Ergebnis der statischen Probelastung und den dynamischen Pfahltests kommen.

Ein nach wie vor ungelöstes Problem der dynamischen Pfahltestverfahren ist der Vergleich der damit ermittelten Grenzlaster mit dem Ergebnis der statischen Probelastung. Bei der Anwendung des CASE-Verfahrens muß der Dämpfungsbeiwert auf Erfahrungsgrundlage oder durch eine Kalibrierung an einer statischen Probelastung erfolgen. Dies ist exakt aber nur möglich, wenn die statische Probelastung und der dynamische Pfahltest zum gleichen Zeitpunkt durchgeführt werden. Dies ist in der Regel aber nicht der Fall.

Andererseits bieten die dynamischen Pfahltestverfahren die Möglichkeit, den Pfahl zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Rammung zu prüfen und damit die Zeitabhängigkeit der Tragfähigkeit (festwachsen) zu ermitteln. Ein Beispiel für solche Messungen zeigt das Bild 4.

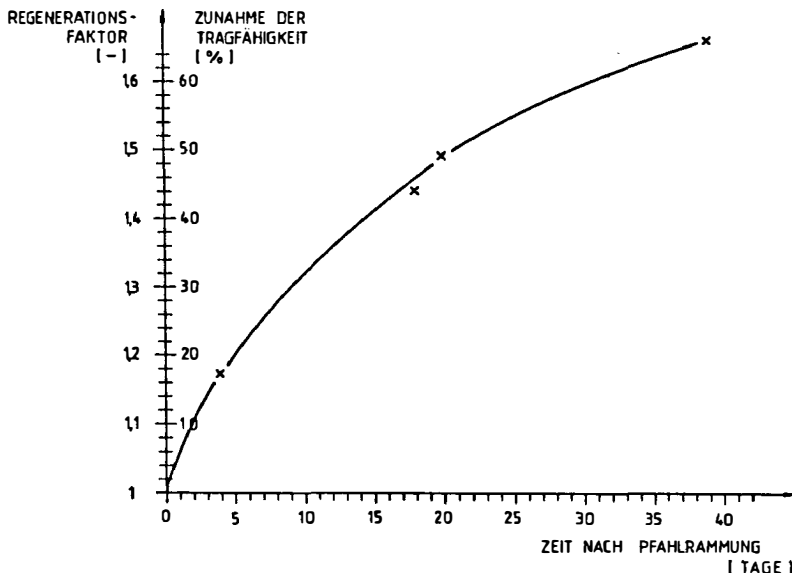


Bild 4 : Mit dynamischen Pfahltests ermittelter Einfluß der Standzeit der Pfähle im Boden auf ihre Tragfähigkeit (Stahlbetonrammpfahl im Schluff)

In den letzten Jahren sind zunehmend auch Ort betonrammpfähle und Verdrängungsbohrpfähle mit dynamischen Pfahltestverfahren überprüft worden. Für die Durchführung der dynamischen Pfahltests an diesen Pfählen muß eine Stoßbelastung mit einem Fallgewicht auf den Pfahl aufgebracht werden. Die Fallhöhe des Schlaggewichtes kann dabei in der Regel stufenlos gesteuert werden. Im Bild 5 sind die Ergebnisse dynamischer Pfahltests an drei nebeneinander stehenden Verdrängungsbohrpfählen dargestellt. Die statische Tragfähigkeit der Pfähle erreicht mit zunehmender Fallhöhe des Schlaggewichtes und damit der aufgebrachten Energie einen Grenzwert. Dieser Grenzwert bzw. die höchste erreichte Last wird in der Regel der statischen Grenzlast gleichgesetzt. Bei Pfählen bis zu einem Durchmesser von 60 cm liegen umfangreiche Versuchsergebnisse vor, die zeigen, daß die Lastsetzungslinie aus den dynamischen Versuchen mit den Ergebnissen der statischen Probelastungen gut übereinstimmen.

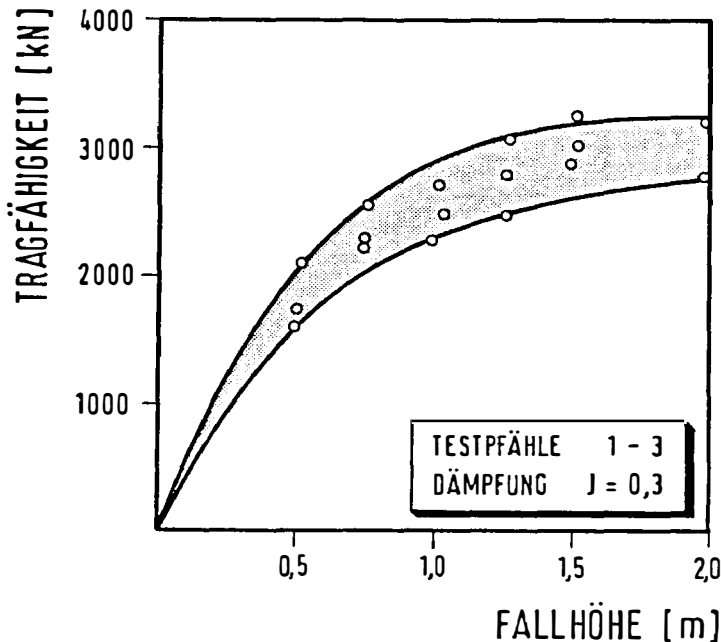


Bild 5 : Ergebnisse der Stoßprüfung an drei Verdrängungsbohrpfählen, Durchmesser 44 cm

An Pfählen mit einem Durchmesser > 60 cm wurden erst wenige dynamische Pfahltests durchgeführt. Die daraus vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß selbst bei Schlaggewichten von 200 kN keine ausreichende Pfahlfußverschiebung erreicht werden kann. Die Tragfähigkeit dieser Pfähle wird daher i. a. weit unterschätzt (Bild 6). Da Großbohrpfähle aber über ein Setzungskriterium bemessen werden und die zu erreichende Grenzlast dann nach dem Kriterium von Franke

$$S_g = \eta^2 \cdot \text{zul. } S$$

festgelegt wird, muß die Lastsetzungslinie bis zu dieser Grenzsetzung sicher ermittelt werden. Der Nachweis, daß dieser Bereich der Lastsetzungslinie bei Großbohrpfählen über dynamische Pfahltests sicher ermittelt werden kann, wurde bis heute nicht erbracht. Für die Anwendung der dynamischen Pfahltestverfahren auf die Ermittlung der Tragfähigkeit von Großbohrpfählen sind daher dringend weitere Forschungsarbeiten notwendig.

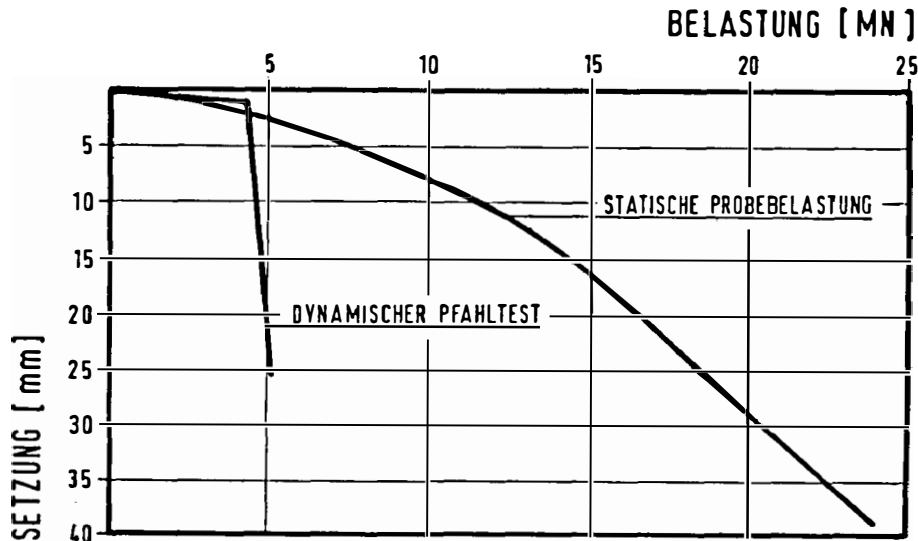


Bild 6 : Last-Setzungslinien eines Großbohrpfahles
Durchmesser 1,5 m, Länge 15,5 m

3.3 Wirkungsgrad und Optimierung von Rammsystemen

Ausgangspunkt für die Entwicklung der heute für dynamische Pfahltests genutzten Meßtechnik war die Überprüfung des Wirkungsgrades von Rammsystemen. An erster Stelle ist hier die Studie der Michigan State Highway Commission aus dem Jahre 1965 zu nennen. Über die zeitabhängige Messung der am Pfahlkopf auftretenden Kräfte und Geschwindigkeiten ergab sich erstmals die Möglichkeit, die in den Pfahl eingeleitete Energie zu bestimmen.

Die dynamischen Pfahltestverfahren werden heute routinemäßig zur Überprüfung des Wirkungsgrades von Rammbären bzw. für die Entwicklung neuer Rammsysteme eingesetzt. Im Bild 7 sind die während der Erprobung eines neuen Offshorebären gemessenen Kraft- und Geschwindigkeitskurven in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Darunter ist die ebenfalls zeitabhängige Energiekurve ausgedruckt. Während der Erprobung von neuen Rammsystemen können einzelne Elemente ausgetauscht und deren Einfluß auf den Wirkungsgrad des Rammsystems durch dynamische Pfahltests überprüft werden.

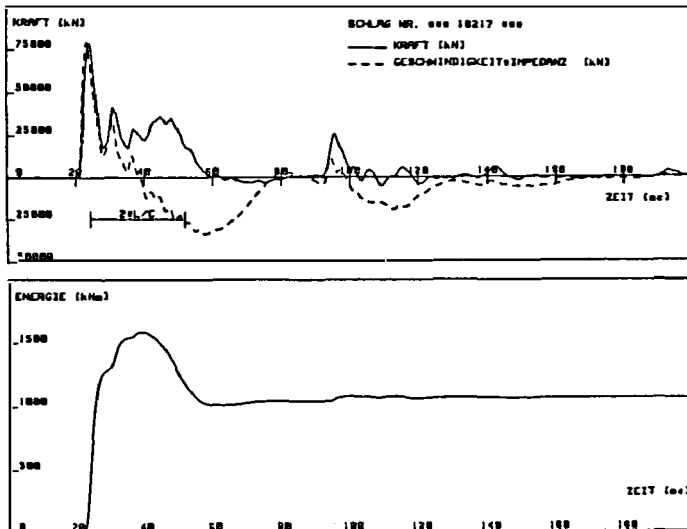


Bild 7 : Meßergebnisse von der Erprobung eines neuen Rammbären

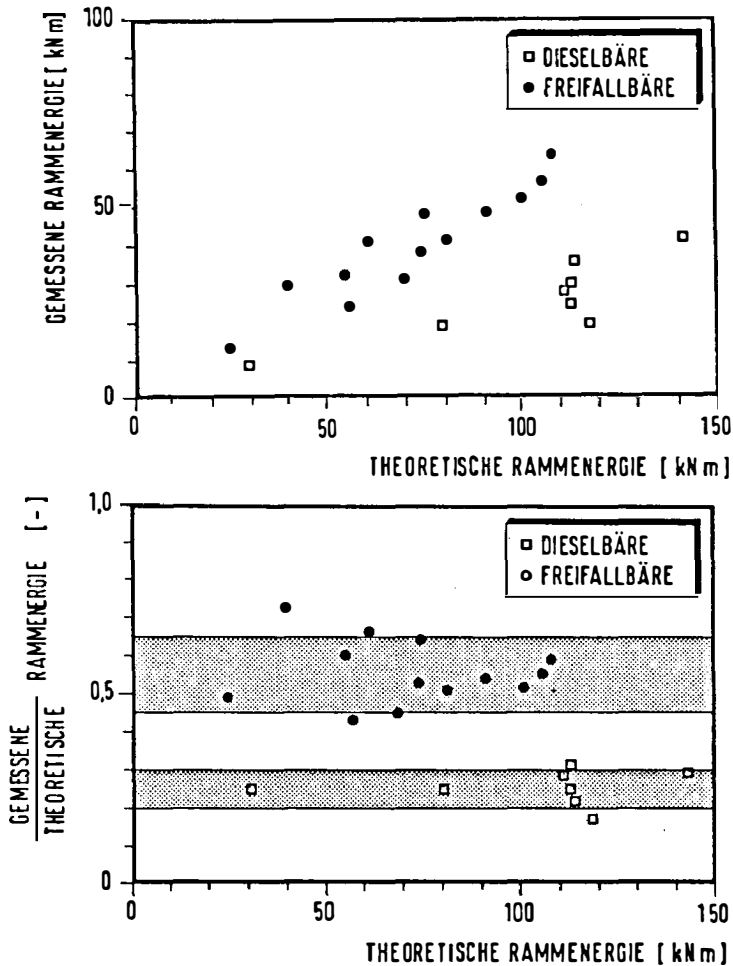


Bild 8 : Wirkungsgrad verschiedener Rammhäre

Die durch dynamische Rammtests ermittelte effektive Rammenergie kann auch in die klassischen Rammformeln eingesetzt werden. Dadurch wird ein wesentlicher Schwachpunkt der Rammformeln, nämlich die empirische Abschätzung der wirksamen Rammenergie, ausgeschaltet und durch Meßwerte ersetzt werden. Einen Überblick über die Wirkungsgrade verschiedener Rammhäre gibt das Bild 8.

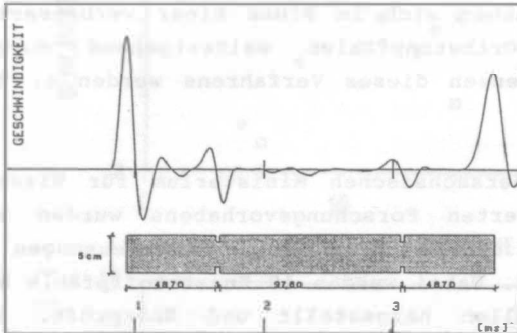
3.4 Integrität

Parallel zu den Verfahren der Tragfähigkeitsbestimmung wurden auch dynamische Verfahren zur Integritätsüberprüfung von Pfählen entwickelt. Diese Integritätsprüfungen werden seit einigen Jahren bereits routinemäßig von verschiedenen Baufirmen zur Eigenüberwachung eingesetzt. Sie haben sich im Sinne einer verbesserten Qualitätskontrolle bei Ortbetonpfählen weitestgehend durchgesetzt. Die Anwendungsgrenzen dieses Verfahrens werden z. Zt. aber noch untersucht.

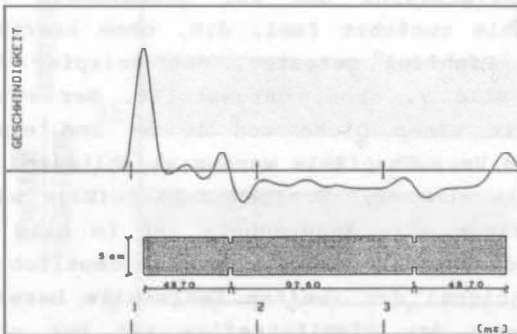
Im Rahmen eines vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst geförderten Forschungsvorhabens wurden vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik Integritätsmessungen an Modellpfählen durchgeführt. Dabei wurden 10 Kunststoffpfähle mit unterschiedlichen Fehlstellen hergestellt und überprüft. Zur Abschätzung des Auflösungsvermögens und der Genauigkeit des Verfahrens wurden die Pfähle zunächst frei, d.h. ohne Kraftangriff am Pfahlmantel und Pfahlfuß getestet. Das Beispiel für solch einen Test ist im Bild 9, oben, dargestellt. Der Pfahl hatte zwei Fehlstellen mit einer Dicke von 10 mm und einem Flächenanteil von 50 %. Die Versuchspfähle wurden anschließend in eine Versuchsgrube, die mit einem einkörnigen Sand gefüllt war, eingebaut und erneut getestet. Das Meßergebnis ist im Bild 9, Mitte, dargestellt. Während die erste Fehlstelle noch deutlich zu erkennen ist, ist das Meßsignal der zweiten Fehlstelle bereits deutlich schwächer und auch der Pfahlfußreflex ist nur noch gering zu erkennen. Im Anschluß an diese Versuchsserie wurde der Sandboden gegen einen Schluff ausgetauscht. Die Ergebnisse dieser Versuchsserie sind im Bild 9, unten, dargestellt. Die eingeleitete Stoßenergie wird hier nur noch an der ersten Fehlstelle reflektiert und danach von der angreifenden Mantelreibung aufgezehrt. Ein Reflex von der zweiten Fehlstelle bzw. vom Pfahlfuß ist nicht mehr zu erkennen. Die umfangreichen Versuchsergebnisse dieses Forschungsvorhabens werden z. Zt. weiter ausgewertet und im Laufe des Jahres 1986 veröffentlicht.

INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
INTEGRITÄTSPRÜFUNG

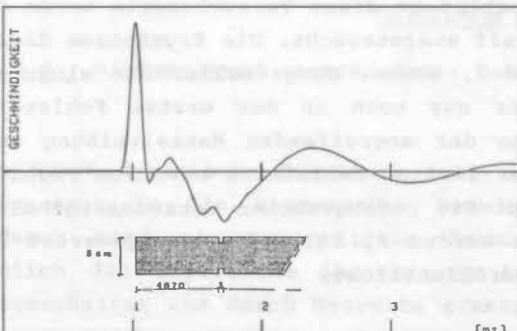
BAUSTELLE : LABOR
PFAHLSYSTEM : PE HML 500 MODELLSTABE



freier Pfahl



Pfahl im Sand



Pfahl im Schluff

Bild 9 : Beispiele für Integritätstests an Modellpfählen

4. Schlußbemerkungen

Mit dem ersten Einsatz der dynamischen Pfahltestverfahren in der Bundesrepublik Deutschland war Ende der siebziger Jahre die Hoffnung verbunden, die teueren und zeitaufwendigen statischen Probelastungen durch ein schnelles und kostengünstiges Verfahren ersetzen zu können. Die in der Zwischenzeit durchgeführten umfangreichen Baustellenmessungen und die vorliegenden Ergebnisse verschiedener Forschungsvorhaben haben zu einer realistischeren Einschätzung der Anwendungsmöglichkeiten der dynamischen Pfahltestverfahren geführt.

Dynamische Pfahltestverfahren bilden dabei eine sinnvolle Ergänzung der statischen Probelastungen. Ähnlich wie bei Baugrundaufschlüssen Bohrungen durch kostengünstige und schnelle Sondierungen sinnvoll ergänzt werden, sollten auch bei den Pfahlgründungen die statischen Probelastungen durch dynamische Pfahltests ergänzt aber nicht ersetzt werden. Dadurch kann nicht nur eine größere Sicherheit unserer Pfahlgründungen erreicht werden, sondern auch eine wirtschaftlichere Dimensionierung möglich werden. Voraussetzung hierfür ist, daß die gesicherten Erkenntnisse über den Einsatzbereich der dynamischen Pfahltests in Empfehlungen und Normen berücksichtigt werden.

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik
der TU Braunschweig (Stand April 1986)

Sammlung technischer Ausdrücke aus Grundbau, Bodenmechanik, Tunnelbau
2. erweiterte Auflage, 1984

- | | | |
|----------|------------------------------|--|
| Nr. 76-1 | Scheffler, E. | : Die abgesteifte Baugrube berechnet mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Wand und Boden, 1976 |
| Nr. 78-2 | Frank, H. | : Formänderungsverhalten von Bewehrter Erde - untersucht mit Finiten Elementen, 1978 |
| Nr. 79-3 | Schnell, W. | : Spannungen und Verformungen bei Fangedämmen, 1979 |
| Nr. 80-4 | Ruppert, F.-R. | : Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie - Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik, 1980 |
| Nr. 81-1 | Schuppener, B. | : Porenwasserüberdrücke im Sand unter Wellenbelastung auf Offshore-Bauwerke, 1981 |
| Nr. 6 | Wolff, F. | : Spannungen und Verformungen bei Asphaltstraßen mit ungebundenen Tragschichten, 1981 |
| Nr. 7 | Bätcke, W. | : Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum, 1982 |
| Nr. 8 | Meseck, H.
Schnell, W. | : Dichtungswände und -sohlen, 1982 |
| Nr. 9 | Simons, H.
Ruppert, F.-R. | : Entwicklung geeigneter Verfahren zum Messen der physikalischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen auf Baustellen, 1982 |
| Nr. 10 | Beckmann, U. | : Einflußgrößen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen, 1982 |
| Nr. 11 | Papakyriakopoulos, P. | : Verhalten von Erd- und Steinschüttdämmen unter Erdbeben, 1983 |
| Nr. 12 | Sondermann, W. | : Spannungen und Verformungen bei Bewehrter Erde, 1983 |
| Nr. 13 | Meseck, H. | : Sonderheft zum 10-jährigen Bestehen des Institutes, 1984 |
| Nr. 14 | Raabe, W. | : Spannungs-Verformungsverhalten überkonsolidierter Tone und dessen Abhängigkeit von ingenieurgeologischen Merkmalen, 1984 |
| Nr. 15 | Früchtenicht, H. | : Zum Verhalten nichtbindigen Bodens bei Baugruben mit Schlitzwänden, 1984 |

- Nr. 16 Knüpfer, J. : Schildvortrieb bei flüssigkeitsgestützter Ortsbrust,
Meseck, H. 1984
- Nr. 17 : Ablagerung umweltbelastender Stoffe
Fachseminar 06.-07. Februar 1985
- Nr. 18 Simons, H. : Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur
Reuter, E. Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton
zum Schutz des Grundwassers, 1985
- Nr. 19 Meseck, H. : Dynamische Pfahltests
Fachseminar 23.-24. Oktober 1985
- Nr. 20 Meseck, H. : Abdichten von Deponien, Altlasten und
kontaminierten Standorten
Fachseminar 06.-07. November 1985
- Nr. 21 Balthaus, H. : Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen
Pfahlprüfmethoden, 1986



Reproduktion und Druck:

Beyrich Reprografie · Bültenweg 73 · 3300 Braunschweig · Telefon (05 31) 34 09 04