Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Das Verhalten von Eisenbeton-Pfählen während des Rammens

Autor: Glanville, W.H. / Grime, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2738

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

VI 3

Das Verhalten von Eisenbeton-Pfählen während des Rammens.

Le comportement des pieux de béton armé lors du battage.

Reinforced Concrete Piles During Driving.

W. H. Glanville,*
D. Sc., Ph. D., M. Inst. C. E., M. I. Struct. E.
and
G. Grime, M. Sc.,
Garston.

Einführung.

In und um London gibt es sehr viele Bauplätze, bei denen der Boden aus alluvialen Ablagerungen oder Ausfüllungen besteht, die nur geringe Tragfähigkeit besitzen, oft aber 10 bis 30 Fuß unter die Oberfläche reichen. Unter solchem Boden stößt man auf eine harte feste Kiesschicht, die in der Dicke von einem bis zu 20 Fuß schwanken kann; Schwankungen dieser Art können sogar innerhalb eines begrenzten Gebietes auftreten. Auf Grund der wechselnden Dicke der Kiesschicht neigen viele Ingenieure beim Entwerfen von Projekten dazu, die Fundamente der Bauten in den unter der Kiesschicht liegenden harten Lehm zu stellen.

Schwere Rammverhältnisse werden jedoch angetroffen, will man die Kiesschicht durchdringen, es zeigte sich dabei auch die Schwierigkeit, solche Pfähle herzustellen, die genügend Festigkeit aufweisen, um solchen Verhältnissen gewachsen zu sein. Typische Beispiele von Mißerfolgen zeigen Fig. 1 und 2.

Bevor die vorliegenden Untersuchungen in Angriff genommen wurden, waren sozusagen keine Angaben vorhanden, die erlaubt hätten, aus den Rammverhältnissen Rückschlüsse auf das Verhalten der Pfähle zu ziehen. Zudem standen auch keine zufriedenstellenden Methoden zur Verfügung, die Aufschluß gegeben hätten über das richtige Bärgewicht, Fallhöhe des Bärs und über die richtige Art der Schlaghaubenpackung für einen bestimmten Pfahl. Die aus der Bauerfahrung hervorgegangenen Regeln führten zu unbefriedigenden Resultaten, und auf Grund der vorhandenen sehr geringen Kenntnisse über den Sachverhalt war es sehr schwer darüber zu entscheiden, ob das Eintreten oder Nichteintreten von Schwierigkeiten mehr Wahrscheinlichkeit besitzt. Für den Ingenieur wie für den Unternehmer war ein solcher Zustand äußerst unbefriedigend.

Die „Building Research Station" (Amt für Bauforschung) hatte durch Veranlassung und unter Beihilfe der „Federation of Civil Engineering Contractors" (Verband der Ingenieur-Baufirmen) die Aufgabe unternommen, Untersuchungen über das Verhalten von Eisenbeton-Pfählen durchzuführen.

---

* Wörter-Verzeichnis der Figurentexte siehe Schluß dieser Arbeit.

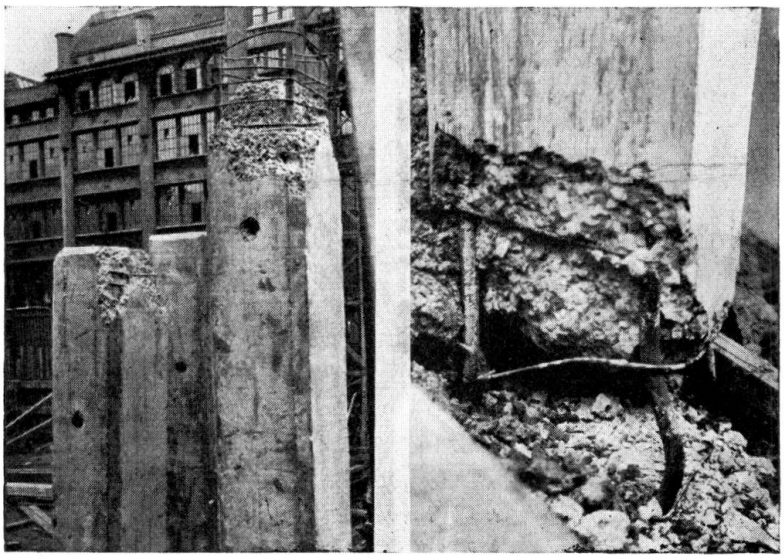


Fig. 1.
Beispiele von Zerstörungen an Eisenbetonpfählen.

Die Hauptaufgabe dieser Untersuchung lag darin, Methoden zu finden, die erlauben, das Rammen eines Pfahles ohne Beschädigung zum voraus zu bestimmen. Das benötigte erstens analytische wie auch experimentelle Untersuchungen über die Natur und Größe der durch Stoß in einem Pfahle erzeugten Spannungen, zweitens: das Studium der Wirkung des Stoßwiderstandes auf die angewendeten Methoden bei der Berechnung und Herstellung von Pfählen;

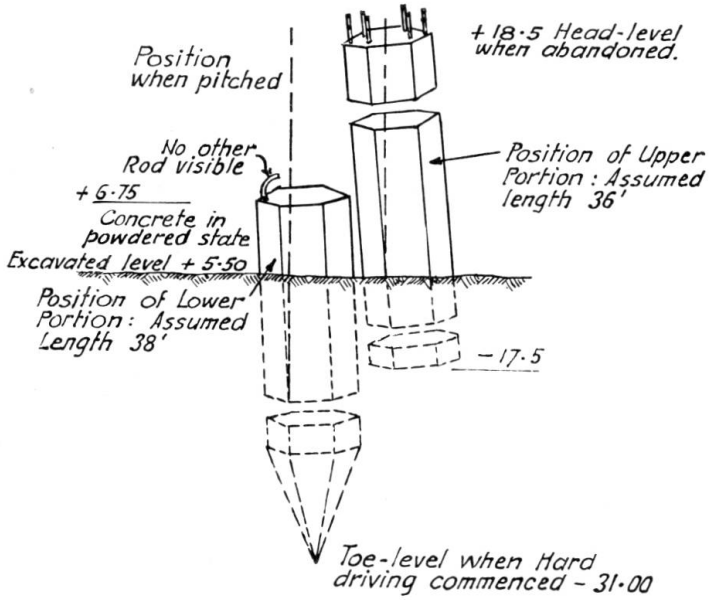


Fig. 2.
Zerstörung in der Mitte eines Pfahles.

drittens: die Entwicklung solcher Methoden, die im Stande sind, über nachteilige Verhältnisse während des Rammens Aufschluß zu geben. Eine vollständige Abhandlung über die Untersuchungen wird als offizielle Veröffentlichung vom „Building Research Station" herausgegeben. Eine gekürzte, jedoch weitergehende Behandlung des Themas als die vorliegende Arbeit ist bereits im "Journal of the Institution of Civil Engineers" erschienen.

Theoretische Betrachtungen.

Allgemeines.

Der Umfang der vorliegenden Arbeit erlaubte nicht, die vollen mathematischen Entwicklungen, die die Untersuchungen begleiteten, hier wiederzugeben. Wir verweisen deshalb auf die Veröffentlichungen im „Journal of the Institution of Civil Engineers"[1] und der „Building Research Station".

Zu Beginn der Studien für dieses Problem wurde erkannt, daß eine zweckdienliche Darstellung der Verhältnisse, wie sie beim Rammen von Pfählen vorliegen, nur auf Grund der Theorie über die Fortpflanzung von Spannungswellen im elastischen Stab erfolgen kann.

Der Untersuchung liegen folgende Annahmen zu Grunde:

a) Der Pfahl sei unbeschädigt nach dem Rammen.
b) Der Pfahl verhalte sich wie ein linear elastischer Stab.
c) Die Spannungswellen im Rammbär seien vernachlässigt.
d) Die Schlagjungfer, die Schlaghaube und die Packung seien einer Feder, und das Ganze mit einem Kissen vergleichbar, welches den Druck unmittelbar weiter leitet.
e) Der Spitzenwiderstand sei elastisch, der Druck an der Spitze sei proportional der Eindringungsbewegung der Spitze. Die Methode, welche die Widerstände des Kissens und der Pfahlspitze miteinander in Beziehung bringt hinsichtlich dieser idealen Bedingungen, wird später gezeigt.

Die Gleichung, welche sich allgemein auf die Wellenfortpflanzung auf einen langen, dünnen, linear elastischen Stab anwenden läßt, hat folgende allgemeine Lösungsform:

$$\xi = f\left(t - \frac{x}{a}\right) + F\left(t + \frac{x}{a}\right),$$

hierin bezeichnet ξ die Verschiebung eines Querschnittes hinsichtlich seiner ursprünglichen Lage.

t bezeichnet die Zeit (in diesem Falle nach vollzogenem Stoß),

x bezeichnet die Ordinate eines Querschnittes, gemessen von einem Pfahlende (vom Kopf des Pfahles),

a bezeichnet die Geschwindigkeit der Längswellen in einem Stabe.

Die oben erwähnte Gleichung besagt, daß die Verschiebung eines Querschnittes sich aus der Summe zweier Funktionen zusammensetzt. Die erste dieser Funktionen $f\left(t - \frac{x}{a}\right)$ stellt die absteigende Welle dar, während die zweite $F\left(t + \frac{x}{a}\right)$ einen Ausdruck für die im Pfahle aufsteigende Welle liefert.

Der Pfahl hat keine aufsteigende Welle bis die Zeit $\frac{l}{a}$ verstrichen ist (l = Pfahllänge), d. h. erst nachdem eine Zurückwerfung an der Pfahlspitze stattgefunden hat und diese Welle wird den Pfahlkopf erst nach Verstreichen der Zeit $t = \frac{2l}{a}$ erreichen.

[1] The Behaviour of Reinforced Concrete Piles During Driving (Das Verhalten von Eisenbetonpfählen während des Rammens) by W. H. Glanville, D. Sc., Ph. D., M. I. C. E., Geoffrey Grime, M. Sc. and W. W. Davies, B. Sc. (Eng.) A. M. I. C. E. (Journ. Inst. Civ. Eng. December 1935).

Die Gleichung, welche für die Bewegung des Rammbärs während der Anfangsperiode $0 \leqq t < \frac{2l}{a}$ gilt, bevor die zurückgeworfene Welle den Kopf erreicht, besitzt eine einfache Lösung. Daraus und mit Hilfe der angenommenen Kopfbedingungen kann für die erwähnte Periode die Verschiebungsfunktion f, welche das Abwärtswandern der Welle darstellt, ermittelt werden. Die Funktion F, welche die zurückgeworfene, im Pfahle aufsteigende Welle darstellt, kann unter Annahme eines bestimmten Spitzenwiderstandes ausgedrückt werden durch die Funktion f, durch Einführung einer um $\frac{2l}{a}$ früheren Zeit. Da f bekannt ist für ein Intervall $0 \leqq t < \frac{2l}{a}$, ist auch F durch das Intervall $\frac{2l}{a} \leqq t < \frac{4l}{a}$ gegeben.

Dieses Verfahren, angewendet auf aufeinanderfolgende Intervalle $\frac{2l}{a}$, gestattet alle aufwärts und abwärts gehenden Wellen im Pfahl für einen bestimmten Zeitmoment zu bestimmen. Durch Kombination der Wellen für irgend eine Stelle läßt sich die Verschiebung und daher auch die Spannung für irgend einen Zeitpunkt t bestimmen. Die Theorie erlaubt in diesem Falle folgende Schlüsse zu ziehen:

1. Die Spannungsverteilung über die Länge des Pfahles für einen speziellen Zeitpunkt ist im allgemeinen nicht gleichmäßig.
2. Die Maximalspannung für irgend einen Punkt des Pfahles nimmt mit zunehmender Steifigkeit des Kissens zu.
3. Die Maximalspannung am Pfahlkopf ist proportional der Quadratwurzel der Fallhöhe des Rammbärs.
4. Für lange wie für kurze Pfähle mit hartem Kissen, die mit leichtem Rammbär gerammt werden, ist die Maximalspannung am Pfahlkopf einzig abhängig von den Kopfbedingungen und bleibt dieselbe für alle Pfahlhitzen (Eindringungen). Die notwendige Bedingung dazu ist, daß der Maximalwert der absteigenden Spannungswelle erreicht wird, bevor die an der Spitze zurückgeworfene Welle ankommt.
5. Die Maximalspannung an der Pfahlspitze hängt vom Bodenwiderstand ab. Sie ist 0, wenn dem Pfahl kein Widerstand entgegengesetzt wird oder sie erreicht den doppelten Wert der Spannung am Kopf, wenn kein Eindringen möglich ist. Im ersteren Falle haben wir eine Zugsspannungswelle und im zweiten Falle eine Druckspannungswelle, welche an der Pfahlspitze zurückgeworfen wird.
6. Unter günstigen Verhältnissen können sich Längsvibrationen entwickeln auf die gleiche Art, wie ein musikalischer Ton hervorgerufen wird, durch das Anschlagen eines Stahlstabes. Theoretisch sind beträchtliche Zugspannungen möglich, welche ihr Maximum in Pfahlmitte erreichen. Diese sind wahrscheinlich von sehr kurzer Dauer und sind von sofortigen Druckspannungen gefolgt.

Das Pfahlkopfkissen.

Der große Einfluß, welchen das Pfahlkopfkissen (Pfahljungfer, Schlaghaube und Packung) in der Bestimmung der Pfahlspannungen hat, zeigte sich schon

am Anfang der Untersuchung. Wäre kein Kissen vorhanden als Zwischenlage zwischen Rammbär und Pfahlkopf, so würden die Spannungen am Pfahlkopf beinahe sofort ein Maximum erreichen. Das Kissen vermindert gleichzeitig die Geschwindigkeit der Spannungszunahme und ihren Maximalwert. Die übrigen Spannungen im gesamten Pfahl werden auf eine ähnliche Weise beeinflußt.

Die Steifigkeit des Pfahlkissens wird ausgedrückt durch das Verhältnis $\frac{k}{A}$, ein Faktor, auf welchen im Folgenden des öftern verwiesen wird. Unter der Annahme eines Pfahlkissens, für welches die Spannung sich proportional zu der Deformation verhält, bedeutet k die übliche Steifheitskonstante, wie sie für Federn gebräuchlich ist. Sie entspricht derjenigen Kraft, die notwendig ist, um die Einheit der Zusammendrückung zu erzeugen, sie ist $k = E' \cdot A'/l'$, worin E' den Elastizitätsmodul für die Pfahljungfer und A' den Querschnitt und l' ihre Länge darstellt. Bezeichnet A die Querschnittsfläche am Pfahlkopf, dann bedeutet $\frac{k}{A}$ diejenige Spannung am Pfahlkopf, welche zur Erzeugung der Einheitszusammendrückung benötigt wird; sie entspricht demnach dem Quotienten aus Elastizitätsmodul dividiert durch die Länge oder Dicke des Materials, im Falle, daß das Kissen dieselbe Querschnittsfläche besitzt, wie der Pfahl. Das Verhältnis ändert sich im umgekehrten Sinne mit der Dicke und ist unabhängig von den Spannungen. Die Steifigkeitskonstante für eine Hartholzjungfer mit mehr oder weniger konstantem Elastizitätsmodul läßt sich mit genügender Genauigkeit aus diesem Ausdruck bestimmen. Die Schlaghaubenpackung jedoch besitzt kein lineares Verhältnis zwischen Spannung und Zusammendrückung und der Wert $\frac{k}{A}$ ist infolgedessen abhängig von der Größe der erzeugten Spannung. Es ist daher notwendig, den Ausdruck $\frac{k}{A}$ in Pfund pro Quadrat-Zoll (kg/cm²) auszudrücken.

Bezeichnet man die Konstanten für Pfahljungfer und Packung mit $\frac{k_1}{A}$ und $\frac{k_2}{A}$ dann ergibt sich als Ausdruck für $\frac{k}{A}$ die folgende Zusammensetzung:

$$\frac{A}{k} = \frac{A}{k_1} + \frac{A}{k_2} + \cdots \frac{A}{k_n}.$$

Die Kissenwirkung wird in der Hauptsache durch die Packung in der Schlaghaube erzeugt. Die Wirkung der Jungfer ist sehr gering, ausgenommen in solchen Fällen, wo die Packung bis zu einem solchen Grade verfestigt wurde, daß ihre Steifigkeit einen sehr hohen Wert erreicht, oder wo die Pfahljungfer durch Zerfaserung ihre Steifigkeit verloren hat. Die Steifigkeitskonstanten $\frac{k}{A}$ für verschiedene Arten von Schlaghaubenpackungen konnten aus gemessenen Spannungen beim Rammen von Versuchspfählen ermittelt werden. Die so ermittelten Resultate zeigen, daß der Wert $\frac{k}{A}$ für Packungen, wie sie in der Praxis gebraucht werden, zwischen 1000 und 50000 Pfund pro Quadrat-Zoll pro Zoll liegen. Niedrigere Werte, wie 1000 Pfund pro Quadrat-Zoll pro Zoll haben jedoch nur Gültigkeit für die ersten Schläge bei neuen Packungen. Für praktische Zwecke

kann man die untere und obere Grenze auf 10000 bzw. 50000 Pfund pro Quadrat-Zoll pro Zoll annehmen. Die Schlagjungfer dient dem Zwecke, die vorerwähnten Werte auf ungefähr 9500 und bzw. 40000 Pfund pro Quadrat-Zoll pro Zoll zu vermindern.

Während der ganzen Dauer der Untersuchungen konnte keine solche Packungsart gefunden werden, die den theoretischen Anforderungen genügt hätte. Diese Anforderungen können wie folgt umschrieben werden:

1. Geringe Steifigkeit, die sich durch den Faktor $\frac{k}{A}$ ausdrücken läßt.
2. Kein Zunehmen der Steifigkeit während des Rammvorganges.
3. Geringe Kosten hinsichtlich der Dauerhaftigkeit.

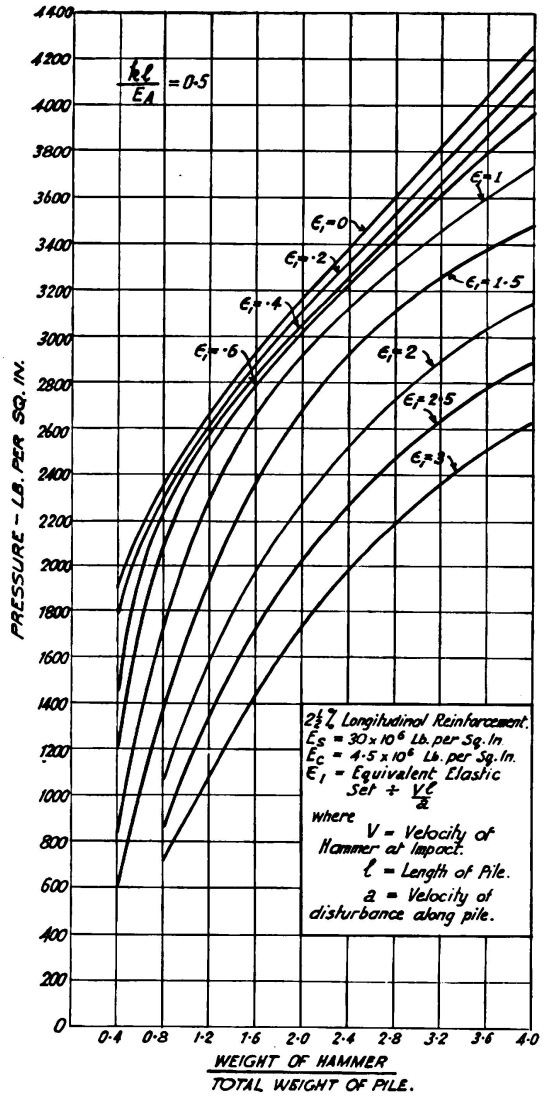


Fig. 3.
Höchstspannung an Pfahlspitze für ein Fuß Fallhöhe. (Für eine Fallhöhe von h Fuß vervielfache mit $\sqrt{h}$).

Bedingungen für die Pfahlspitze.

Es ist bereits erwähnt worden, daß für die allgemeine Theorie die Annahme gemacht wurde, der Pfahlspitzen-Widerstand sei elastisch. Für praktische Verhältnisse trifft diese Bedingung des elastischen Widerstandes nur dann zu, wenn die Eindringung für praktische Anschauung null ist. In allen andern Fällen läßt sich die Eindringung (Hitze) in zwei Teile aufteilen: Eindringung, auf übliche

Weise gemessen, welche hier also „plastisches" Eindringen benannt sei und die „elastische" Bewegung des Bodens, hier als „elastisches" Eindringen eingeführt. Die Eindringung, wie sie in die Berechnung eingesetzt wird, erhält den Namen „elastisches Eindringungsäquivalent" (equivalent elastic set) und wird gleichgesetzt dem doppelten Wert des plastischen Eindringens plus dem Werte des elastischen Eindringens. Die Annahme, daß die für dieselbe maximale Spannung an der Pfahlspitze geleistete Arbeit unabhängig ist von der relativen Größe der plastischen und elastischen Eindringung, versteht sich von selbst. Diese Annahme wurde theoretisch geprüft durch Auswertung spezieller Fälle von rein plastischen Pfahlspitzen und durch Vergleich der Resultate mit solchen, die bei rein elastischer Spitze eine zweifach so große Eindringung als beim plastischen Fall ergaben. Das Ergebnis der Vergleichung zeigte gute Übereinstimmung.

Typische Zahlen für die Schätzung der größten Spitzen-Spannung zeigt Fig. 3. Die vollständige Zahlenreihe bezieht sich für ein Gebiet der $\frac{kl}{EA}$-Werte von 0,1 bis 2,0. Diese Zahlen stellen eine obere Grenze der Pfahlspitzen-Spannung für „hartes" Rammen dar.

Allgemeine Beschreibung des Apparates.

Druck-elektrischer Spannungs-Messer.

Die Haupteigenschaft eines Meßgerätes zur Messung von Impulsen von kurzer Dauer, wie sie beim Rammen von Pfählen vorkommen, ist, daß alle beweglichen Teile einen hohen Eigenschwingungsgrad (eine hohe natürliche Schwingungsperiode) haben, um in der Lage zu sein, genau der zu untersuchenden Bewegung ohne Nachhinken folgen zu können. Diese Forderung führte zur Wahl eines druck-elektrischen Spannungsmessers mit Kathodenstrahlen-Oszillograph.

Die Betätigung des Meßgerätes beruht auf der druck-elektrischen Eigenschaft von Quarz, welcher, gemeinsam mit andern Kristallen, bei Druck oder bei Zug längs einer der hemiëdrischen Achsen in gewissen Zonen des Kristalls elektrische Ladungen erzeugt, die der aufgewendeten Kraft proportional sind. Die zur Verwendung gelangenden Kristallstücke haben die Form langgestreckter rechteckiger Prismen und werden aus dem Natur-Kristall nach den in Fig. 4a und 4b gezeigten Richtungen geschnitten. Diese Prismen, eingebaut in kleine wasserdichte Gehäuse, bilden die Meßzelle und werden an erwünschten Stellen im Pfahle einbetoniert. Bei Gebrauch werden die Kristalle längs der „dritten" Achse Druckkräften unterworfen, wodurch elektrische Ladungen ausgelöst werden, die dem aufgewendeten Druck proportional sind. Die elektrischen Ladungen werden übergeleitet auf Elektroden, die sich an den zur elektrischen Achse senkrecht stehenden Flächen befinden. Die Verbindung mit dem Aufnahme-Gerät besteht aus stark isolierten Kabeln.

Ein Schnitt durch eine Meßzelle ist in Fig. 4c gezeigt. Darin bedeutet (1) das Quarzstück, (2) die Elektroden, (3) Stahlplatten, (4) steifer Ring, (5) starke runde Stahlendplatten, (6) dünner Messing-Zylinder, (7) und (8) konischer Sitz, (9) Rohr mit isoliertem Kabel.

Nach dem Zusammenbau der Meßzelle wird ein Vorspannungsdruck durch Anziehen des verstellbaren Sitzes (7) erzeugt, dadurch reagiert die Zelle sowohl

auf Zug als auf Druck. Damit die Meßzelle im gleichen Maße beansprucht wird wie der sie umgebende Beton, sind ihre Abmessungen so gewählt, daß sie ungefähr den gleichen Steifigkeitsgrad (Festigkeitsgrad) hat wie der Beton, welchen sie verdrängt. Die allgemeine Anordnung der genannten Meßausrüstung ist dargestellt in Fig. 5.

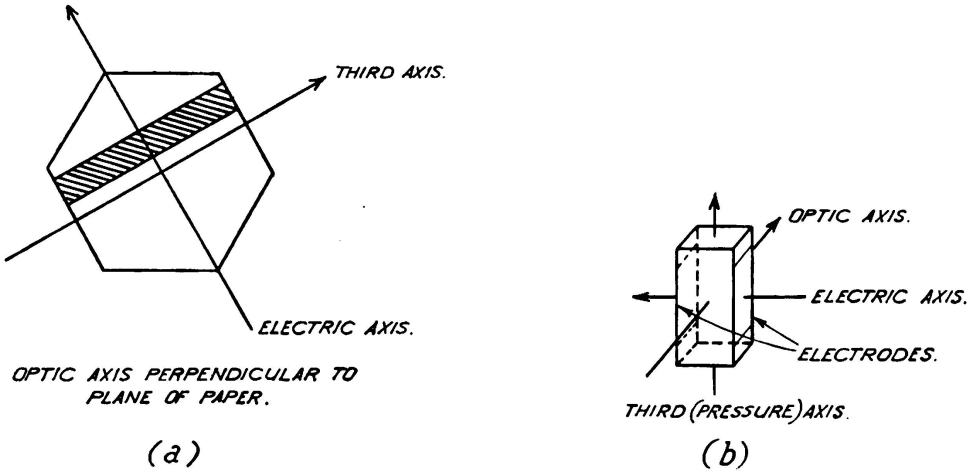


Fig. 4a und b.
Lage der Achsen in geschnittenen Quarzkristallen.

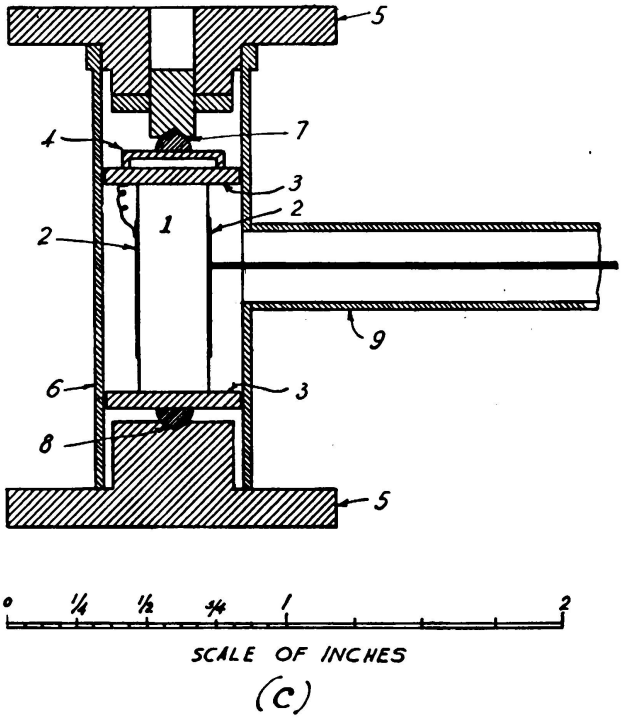


Fig. 4c,
Schnitt durch Meßzelle.

Eindringungs-Meßgerät.

Zur Messung der Eindringung wurde die in Fig. 6 angegebene Methode verwendet, welche zufriedenstellende Resultate zeitigte. Ein Brett mit darauf befestigtem Papier wird durch Klammern am Pfahle befestigt.

Eine Richtlatte wird auf einem schweren Stück Kantholz festgenagelt, dieses ruht auf Holzblöcken; längs der Richtlatte werden mit einem Bleistift die Bewe-

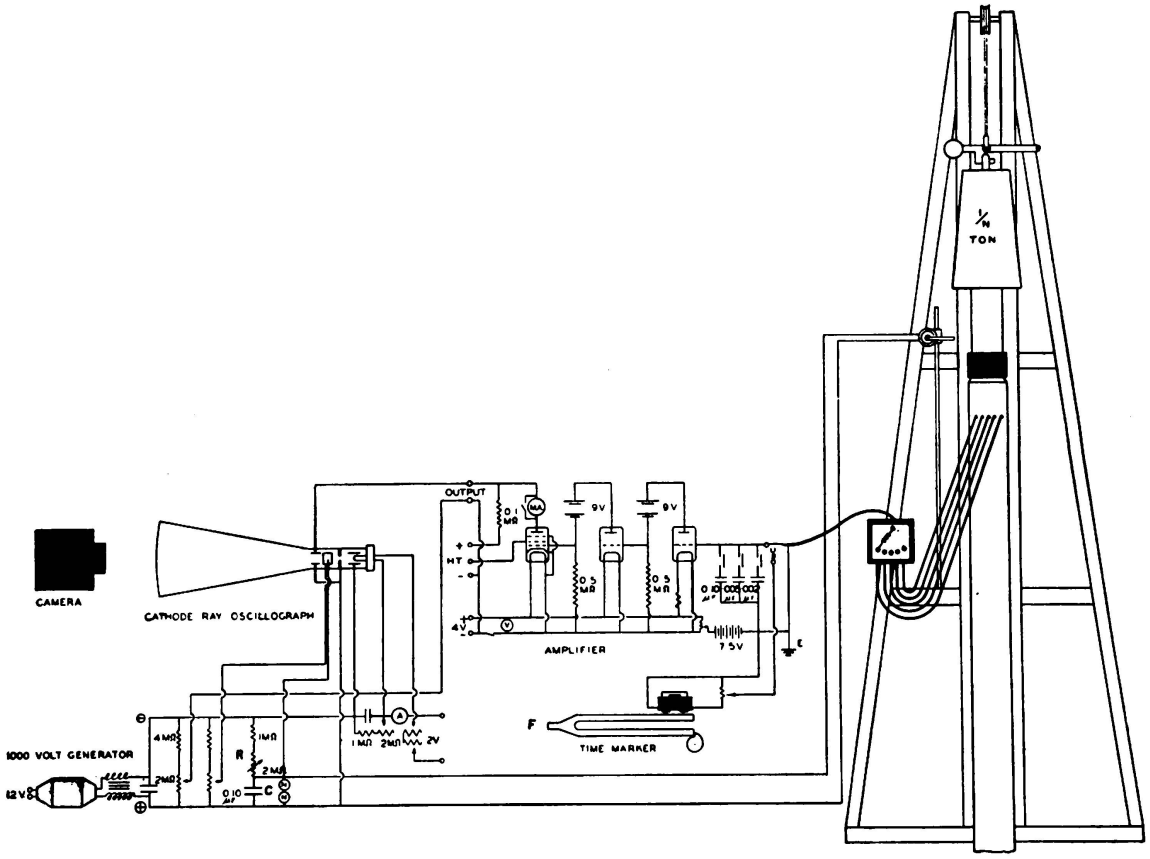


Fig. 5.
Elektrische Leitungsanordnung des Spannungsaufzeichners.

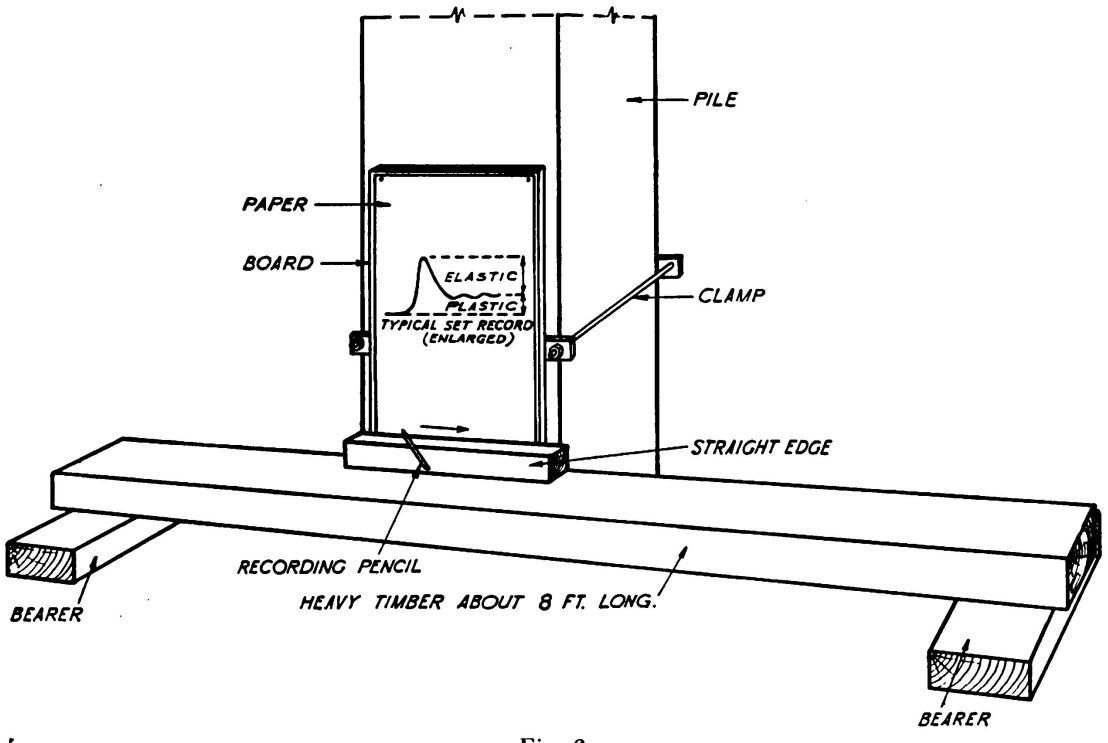


Fig. 6.
Setzmaß-Meßeinrichtung.

gungen der Eindringung auf das Blatt Papier übertragen. Der Holzbalken bildet eine sichere Unterlage für die Messungen, da seine Vibrationen nicht in Erscheinung treten bis nach vollzogener Registrierung der Eindringung, und selbst dann sind seine Schwingungsausschläge nur klein. Aus der Aufzeichnung lassen sich die bleibende oder plastische Eindringung wie auch die elastische oder rückgängige Eindringung, oder besser Bodenbewegung, leicht feststellen.

Spitzen-Spannungsmesser.

Eine einfache Methode zur Messung der Maximalspannung am Pfahlkopf ist durch die Anwendung einer Vorrichtung gegeben, die erlaubt, die maximale Verzögerung des Rammbärs, wenn sie einen gewissen vorbestimmten Wert übersteigt, zu messen. Unter der Annahme, daß die Masse der Schlaghaube vernachlässigt werden kann und daß sich die Packung am Pfahlkopf als eine (jedoch

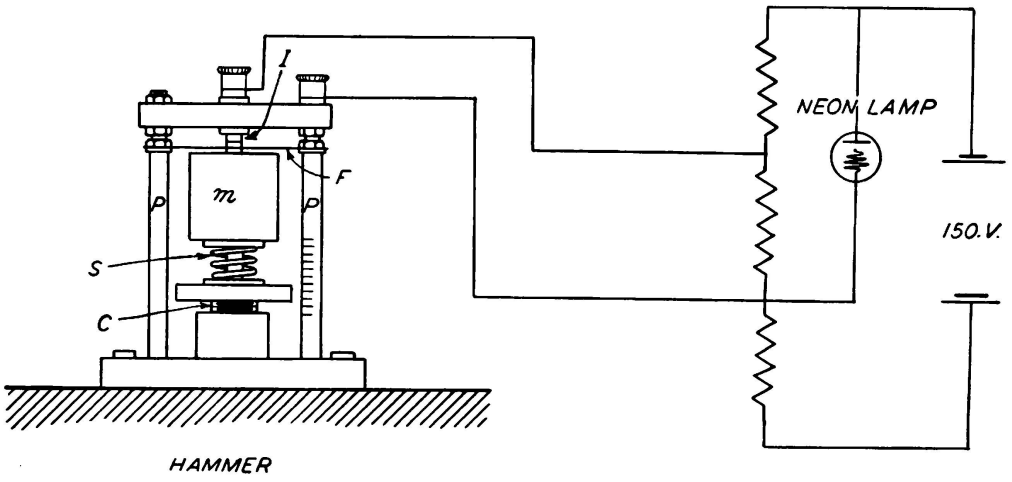


Fig. 7.

Spannungsspitzen - Meßgerät.

nicht notwendigerweise lineare) Feder auffassen läßt, läßt sich durch Messung der maximalen Verzögerung des Rammbärs die Maximalspannung am Pfahlkopf auf einfache Weise messen. Die bei diesem Vorgang durch den Rammbär am Pfahlkopf ausgeübte Kraft ist in irgend einem Moment gleich $M \cdot F$, wobei M die Masse des Rammbärs und F seine Verzögerung darstellt.

Maximalbeschleunigungs-Meßapparate wurden früher gebraucht zur Aufzeichnung der Spitzenwerte der Beschleunigung, gemessen an Straßenoberflächen, hervorgerufen durch Verkehrsvibrationen.[2]

Das für unsere Zwecke zur Verwendung kommende Instrument hat jedoch eine etwas abgeänderte Konstruktion und ist mit einer sichtbaren Anzeige-Vorrichtung ausgerüstet. Die Masse m (Fig. 7) wird durch eine Feder S gegen einen isolierten Anschlag I gedrückt; der durch die Feder ausgeübte Druck kann durch eine kalibrierte Schraube C eingestellt werden. Die Flachfedern F bewirken, daß die Bewegung der Masse m nur parallel zwischen den Säulen P vor sich

[2] Report of the Permanent International Association of Road Congresses, VIIth Congress, Munich, 1934 (2nd Section: Traffic), Bericht der ständigen Internationalen Vereinigung für Straßen-Kongresse.

gehen kann. Die ganze Apparatur wird am Kopfe des Rammbärs so fest gemacht, daß die Achse der Feder S vertikal bleibt. Der elektrische Stromkreis wird durch die Berührung des isolierten Anschlages I mit der Masse m geschlossen; wird die Masse vom Anschlag weggezogen, so ist der Stromkreis wieder unterbrochen. Der ganze Stromkreis ist sehr einfach und ist in Fig. 7 dargestellt. Eine Trockenbatterie von 150 Volt ist mit drei in Serie geschalteten Widerständen verbunden. Zwei dieser Widerstände sind mit einer kleinen Neon-Anzeigelampe verbunden; außerdem wird einer dieser zwei Widerstände kurz geschlossen durch Kontakt der Masse mit dem isolierten Anschlag. Bei geschlossenem Kontakt liegt die Spannung der Neonlampe zwischen Aufleuchtungs-Spannung und der Spannung beim Erlöschen, so daß dadurch der Strom nicht durchgehen kann. Beim unterbrochenen Kontakt übersteigt die Spannung der Lampe die Spannung des Aufleuchtens, wodurch die Lampe zu leuchten beginnt (infolge des Potentialgefälles zwischen den zwei Widerständen), die Lampe bleibt erleuchtet auch bei geschlossenem Kontakt, da die Spannung immer noch einen höheren Wert hat als die Spannung beim Erlöschen. Dieser elektrische Stromkreis ist ein sehr empfindlicher Anzeiger für die Unterbrechung des Kontaktes und kann so eingestellt werden, daß er eine Unterbrechung sogar von 0,0002 Sekunden Dauer anzeigt.

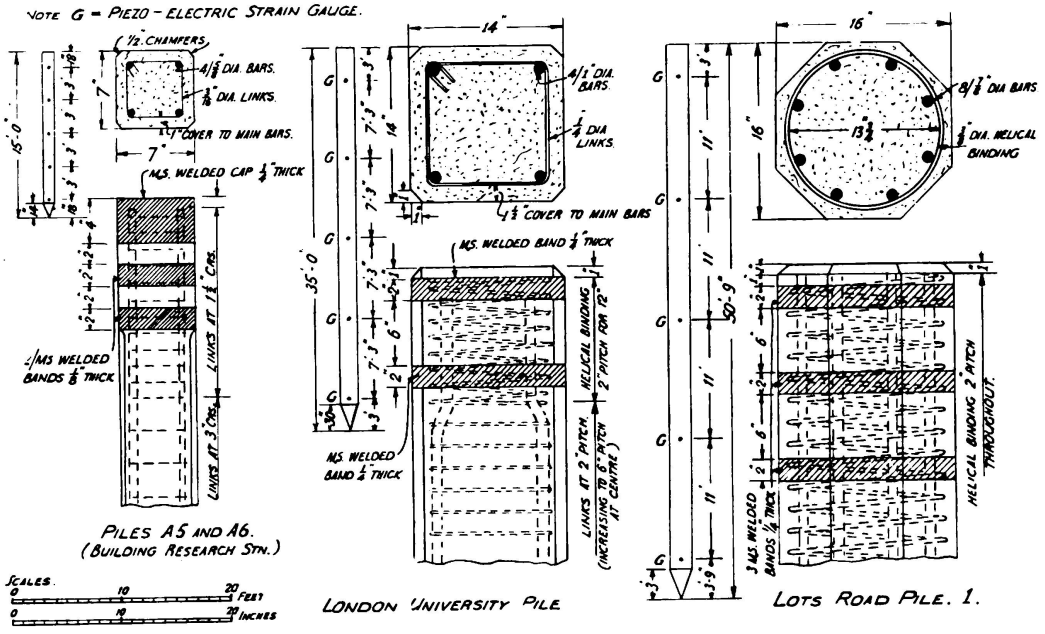


Fig. 8.

Einzelheiten der Pfähle. (Pfahlkopfverhältnisse).

Pfähle A5 und A6.

Fallhammer-(Rammbär-) Gewichte 480, 980 und 2000 Pfund, mit Fallauslösung. Zwischenlage (Kissen); 4,12 und 24 Filzlagen, jede ursprünglich 1/4 Zoll stark.

Pfähle der Universität London.

Einfach wirkender 3 Tonnen-Dampframmbär, Rammjungfer 10 Zoll × 14 Zoll × 14 Zoll aus Pynkadon-Holz, Schlaghaube 10 cwt., Packung 3 1/2 Zoll Tannenholz und 4 Lagen Säcke.

Pfähle des Baues Lots Road.

3,3 Tonnen schwerer Fallhammer mittels Winde bedient, 9zöllige Rammjungfer aus Hickory-Holz, 15 Zoll Durchmesser, Schlaghaube 8 cwt. Packung aus 2 Lagen Manilaseil und 8 Lagen Säcke.

Versuche, die bis jetzt mit dieser Anzeige-Vorrichtung ausgeführt wurden, haben gezeigt, daß Kopfspannungen gemessen werden können mit einem Fehler von höchstens 15 %.

Versuchs-Arbeit.

I. *Spannungs-Messungen.*

Auf Grund von Vorversuchen, welche die allgemeinen Schlußfolgerungen aus der Wellentheorie bestätigten, wurden Versuche mit Pfählen ausgeführt für Rammbedingungen, wie sie bei schwierigen Bauausführungen vorkommen.

Einzelheiten der Pfähle sind in Fig. 8 dargestellt. Die Bodenverhältnisse zeigt Fig. 9, wo auch die gemessenen Eindringungen eingetragen sind.

Die druckelektrische Meßausrüstung, untergebracht in einem fahrbaren Gehäuse, befand sich 20 Fuß von der Ramm-Maschine entfernt. Die Verbindung mit den Meßzellen wurde durch bleiisolierte Kabel von 50 bis 100 Fuß Länge hergestellt.

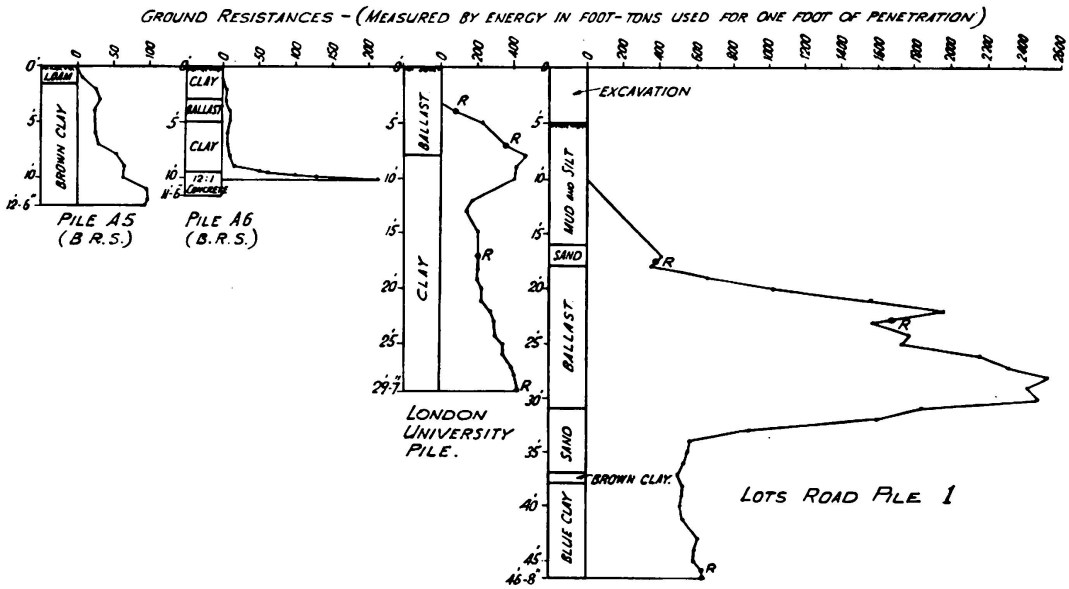


Fig. 9.
Bodenverhältnisse.

Der Meßvorgang war im allgemeinen für alle zu rammenden Pfähle der folgende:

1. Ein Protokoll über die bleibenden Eindringungen, gemittelt aus einer Anzahl Schläge, wurde für den ganzen Rammvorgang hergestellt.
2. Spannungen wurden gemessen für verschiedene Fallhöhen des Rammbärs für vier bis fünf Eindringungsstufen, deren Lage durch die Bodenverhältnisse gegeben waren. (Siehe Fig. 9.)
3. Für jede Gruppe von Spannungsmessungen wurden auch die entsprechenden plastischen und elastischen Eindringungen gemessen.

Verschiedene Abänderungen und Neu-Zurichten des Packungsmateriales wurden während des Rammens vorgenommen, je nach Notwendigkeit.

Typische Spannungsdiagramme, gemessen mit dem druckelektrischen Span-

nungsmesser, sind in den Fig. 10, 11, 12 und 13 dargestellt. Die allgemeinen Eigenschaften dieser Kurven stimmen mit den durch die Theorie vorausgesagten überein. Die Form der Spannungs-Zeit-Kurve und der Maximalwert der Spannung ändert entsprechend der Meßlage am Pfahl und ist abhängig von den

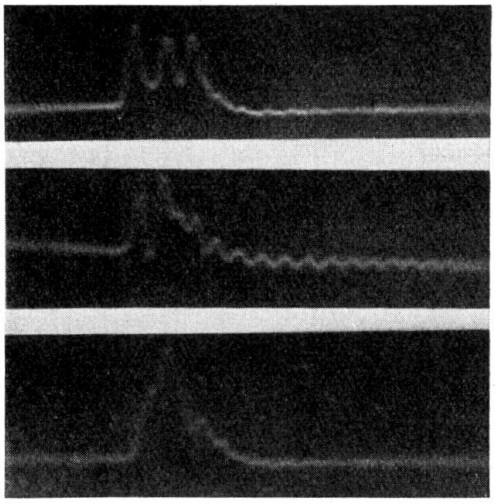


Fig. 10.
Aufnahmen von Längsschwingungen in einem 15 Fuß langen Pfahl. Schwingungsfrequenz 455 in der Sekunde.

Bodenverhältnissen. Die Dauer einer Versuchsmessung am Pfahlkopf hat im allgemeinen die Größenordnung von 0,01 Sekunden, für die Pfahlspitze kann sie etwas größer sein. Die zeitlich ausgedehntere Vibration für die Mitte des Pfahles

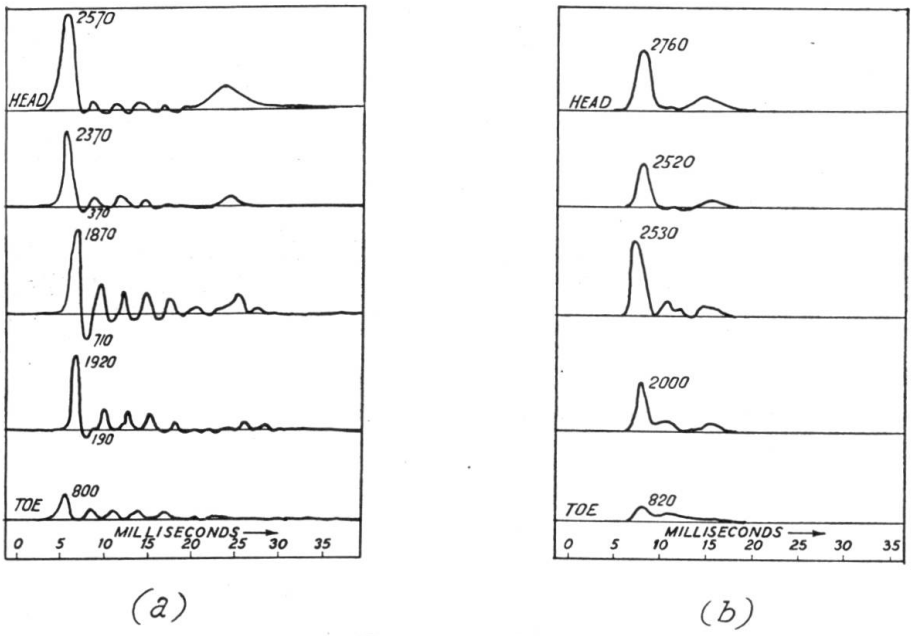


Fig. 11 a und b.

Aufnahmen eines 15 Fuß langen Pfahles gerammt in steifem Lehm, im Institut für Bauforschung Rammverhältnisse: vier 1/4 zöllige Filzlagen am Pfahlkopf. Bärgewicht 980 Pfund, 24 Zoll Fallhöhe, Eindringungstiefen (a) 4 Fuß 3 Zoll, (b) 10 Fuß, entsprechende Setzmaße (a) 0,55 Zoll, (b) 0,08 Zoll (Zahlenwerte bedeuten Spannungsspitzen in Pfund pro Quadratzoll).

der Fig. 10 bedeutet, daß unter gewissen Bedingungen der Pfahl Längsschwingungen ausführt, die mit seiner Eigenschwingungs-Frequenz übereinstimmen.

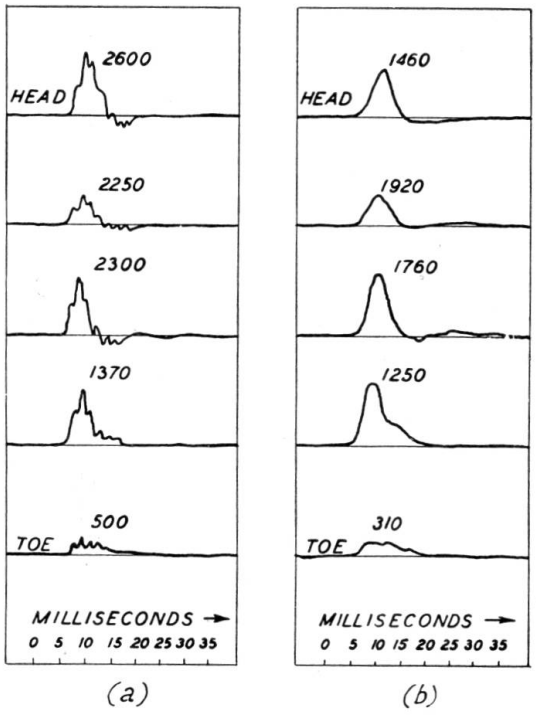
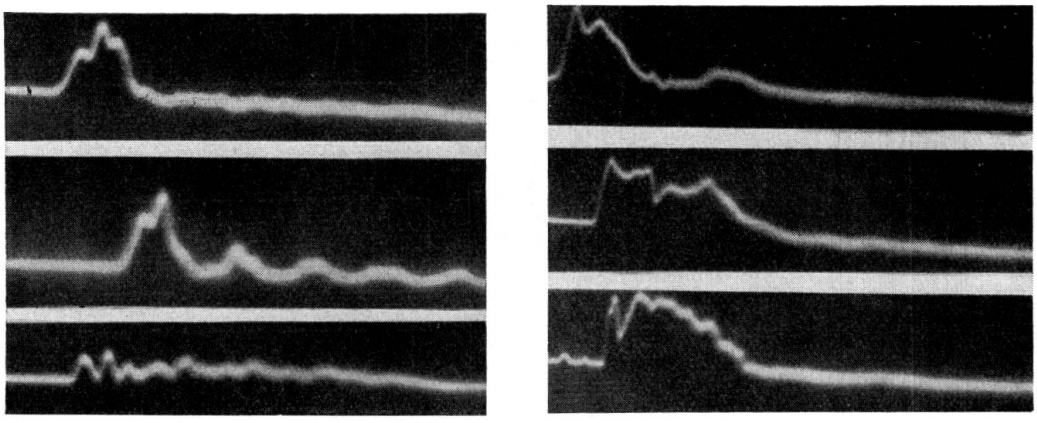


Fig. 12 a und b.
Pfähle der Universität London. Typische Resultate. Rammverhältnisse: Bärgewicht 3 Tonnen, Fallhöhe 24 Zoll, Eindringungstiefe 29 Fuß 6 Zoll. (a) Packung und 10 cwt. Schlaghaube des Unternehmers; (b) Zwölf Filzlagen ohne Schlaghaube. Setzmaße: (a) 0,07 Zoll, (b) 0,04 Zoll. (Zahlenwerte bedeuten Spannungsspitzen in Pfund pro Quadratzoll; der geringe Wert für den Kopf bei (b) entstand infolge Gegendruck am Rammbär).

Die Wirkung der Rammverhältnisse auf die Spannungen im Pfahl.

In der Mehrzahl der Fälle tritt die durch das Rammen hervorgerufene höchste Druckspannung am Pfahlkopfe auf. Nur wenn die Pfahlspitze durch eine außerordentlich harte Schicht hindurchgetrieben werden muß, treten die größten Spannungen an der Pfahlspitze auf. Diese Verhältnisse sind dargestellt in Fig. 14 und 15. Auf Grund theoretischer Betrachtungen kann gezeigt werden, daß der größte Wert der Druckspannung entweder am Pfahlkopf oder an der Pfahlspitze auf-



(a) (b)

Fig. 13 a und b. Baustelle Lots Road, Pfahl Nr. 2.
Typische Aufnahmen für (a) leichtes und (b) hartes Rammen.
Rammverhältnisse: Packung des Unternehmers in 8 cwt. Schlaghaube, 3,3 Tonnen Rammbär, Fallhöhen (a) 24 Zoll, (b) 36 Zoll. Rammtiefe der Pfahlspitze (a) 14 Fuß, (b) 25 Fuß. Höchste Druckspannungen: (a) Kopf 1590, Mitte 1400, Spitze 520 Pfund pro Quadratzoll. (b) Kopf 1930, Mitte 2170, Spitze 2760 Pfund pro Quadratzoll. Setzmaße (a) 0,94 Zoll (b) 0,06 Zoll. Dauer des Schlages (a) 0,010 Sek., (b) 0,009 Sek.

treten muß, obschon unter gewissen Umständen Spannungswerte, die nur wenig kleiner sind als die größten Spannungen, auch an andern Orten auftreten können. In Pfahlmitte wurden mitunter Spannungen gemessen, die gleich oder auch bisweilen etwas größer waren als diejenige am Pfahlkopf, aber diese liegen innerhalb der praktisch möglichen Meßfehler der Spannungsmessung. Ein Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Spannungen am Pfahlkopf ist dargestellt in Fig. 16.

Bei elementarer Betrachtungsweise ist es offensichtlich, daß die größten Kopfspannungen bei gegebenen Eindringungsverhältnissen mit der Zunahme des Bär-Gewichtes wachsen. Diese Spannungszunahme ist jedoch bei normalen Kopfspannungen verhältnismäßig geringer als die Zunahme des Bär-Gewichtes (siehe Fig. 16).

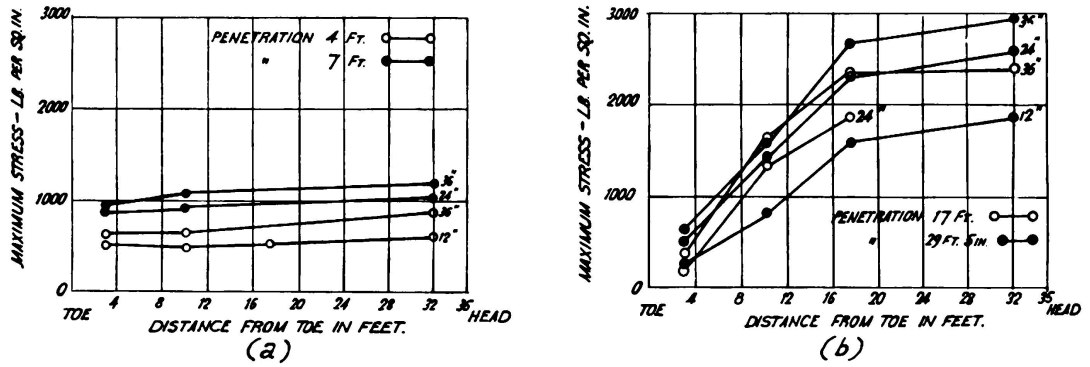


Fig. 14 a und b.

Pfähle der Universität London.

Verteilung der größten Druckspannungen längs des Pfahles bei einer Eindringungstiefe von 29 Fuß 5 Zoll, mit Packung und Schlaghaube des Unternehmers und Fallhöhen von 12,24 und 36 Zoll.

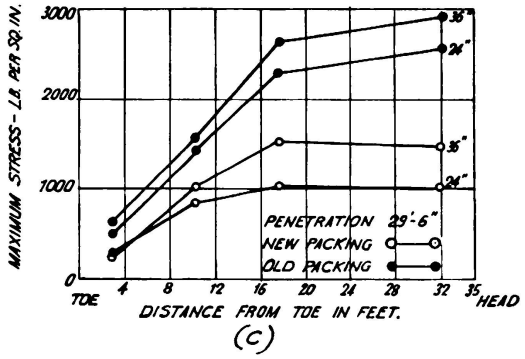


Fig. 14 c.

Vergleich zwischen neuen und gebrauchten Packungen des Unternehmers für Fallhöhen von 24 und 36 Zoll.

Es wurde bereits erwähnt bei der Angabe der mathematischen Grundlagen, daß infolge der begrenzten Geschwindigkeit, mit welcher die Störung der Spannungen fortschreitet, der Maximalwert der Spannung am Pfahlkopf in den meisten Fällen unabhängig ist von den Bodenverhältnissen. Diese Spannung ist gekennzeichnet durch die Pfahlkopfverhältnisse, welche sich zusammensetzen aus dem Gewicht des Rammbärs, der Fallhöhe, der Querschnittsfläche am Pfahlkopf, der physikalischen Konstanten des Pfahles und der Steifigkeit des Rammkissens. Diese Tatsache wurde durch praktische Versuche bestätigt.

Eine Abweichung von gewisser Bedeutung bezüglich der oben erwähnten Tatsachen liegt darin, daß bei einer ursprünglich hohen Festigkeitskonstanten des

Packungsmateriales die Spannung am Pfahlkopf für die erste Rammstufe, wo das Rammen noch leicht vor sich geht, so hoch sein kann wie für die späteren Rammstufen, wo das Rammen nur schwer vor sich geht.

Auf die Vorteile eines kleinen Wertes der Steifheitskonstante k/A wird bei der Betrachtung der Wirkung der Rammverhältnisse auf das Eindringen eingetreten. Die bedeutungsvolle Wirkung einer Zunahme der Steifigkeit während des Rammens zeigte sich in überzeugender Weise bei den Versuchen, die an der Bau-

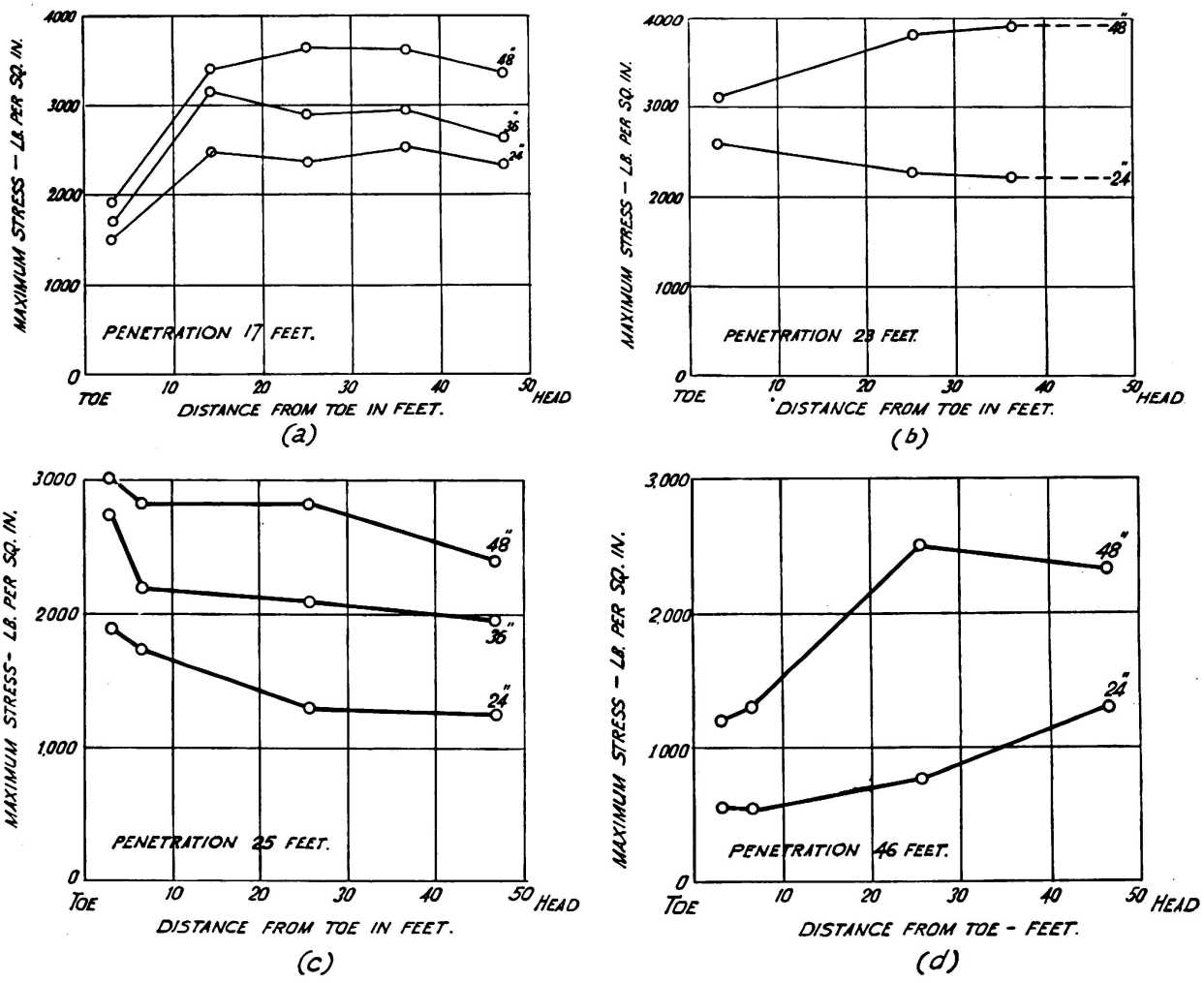


Fig. 15 a—d.

Pfähle der Baustelle Lots Road.

Verteilung der größten Druckspannungen längs des Pfahles für verschiedene Setzmaße, mit Packung und Schlaghaube des Unternehmers. Fallhöhen von 24, 36 und 48 Zoll.
(a) und (b) für Pfahl 1, (c) und (d) für Pfahl 2.

stelle der Londoner Universität ausgeführt wurden. Dabei zeigte eine Weichholzpackung eine Zunahme der Steifigkeit in dem Maße, daß die Zunahme der Pfahlkopfspannung 100 % betrug (Fig. 14c).

Gefährliche lokale Spannungsanhäufungen können sich ergeben durch ungleichmäßiges Verlegen des Packungsmateriales auf den Pfahlkopf. Ein solcher Fall ereignete sich beim Rammen der ersten Pfähle der Baustelle Lots Road, wo der Pfahlkopf sofort nach Aufbringen einer neuen Packlage zerstört wurde,

obschon er vorher Tausende von Schlägen, ohne irgendwelchen Schaden zu nehmen, ausgehalten hatte. Die Zerstörung konnte mit bestimmter Sicherheit dem ungleichmäßigen Verlegen des Packmateriales zugeschrieben werden, indem dieses sich nach rückwärts verschoben hatte.

Aus praktischen Versuchen (Fig. 12) geht hervor, daß die Spannungs-Zeit-Kurven, speziell diejenigen für den Pfahlkopf, einen sanften Verlauf haben, wenn am Pfahlkopf nur die Packung vorhanden ist. Beim Vorhandensein einer Schlaghaube entspricht die aufgenommene Kurve für den Kopf einer der sanften Kurve überlagerten Vibration von hoher Frequenz. Man kann sich die Schlaghaube als eine zwischen zwei Federn gehaltene Masse vorstellen, wobei die Rammjungfer der oberen und die Packung der unteren Feder entspricht. Die in den aufgezeichneten Kurven auftretende hohe Frequenz hat ihre Ursache in der Schwingung der Masse zwischen den Federn. Die Größe der Maximalspannung

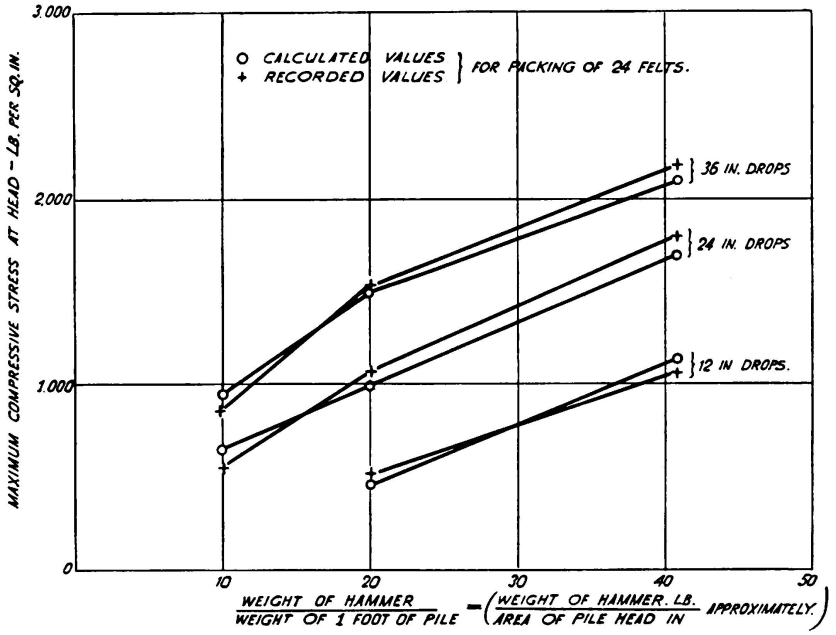


Fig. 16.

Berechnete und gemessene Kopfspannungen eines 15 Fuß langen Pfahles.

wird in den meisten Fällen nur wenig durch diese Schwingungen beeinflußt, die übrigens sehr rasch abklingen.

Eine beträchtliche Länge des obern Teiles des Pfahles kann ebenfalls sehr hohen Spannungen unterworfen sein, die beinahe die Spannungen am Pfahlkopfe erreichen. Dieser Fall tritt ein, wenn sich der an der Pfahlspitze zurückgeworfenen Welle keine Hindernisse (Interferenz) entgegenstellen; eine Spannungsverringerung kann auch eintreten durch Energieverbrauch durch innere und Oberflächenreibung. Ein Beispiel dazu liefern die 50 Fuß langen Pfähle des Lots Road-Baues, wobei die Maximalspannungen für die obere Pfahlhälfte ungefähr konstant blieben (Fig. 15). In solchen Fällen kann Zerstörung durch Druck etwas unterhalb des Pfahlkopfes eintreten, wo durch Transport erzeugte Beschädigungen vorhanden sein können, oder unzureichende Querarmierung, oder schwache Stellen im Beton.

Die an der Pfahlspitze auftretenden Spannungen sind zum größten Teil durch die Eindringung bedingt; kleine Eindringungen erzeugen große Spannungen und umgekehrt. Die Spannungen an der Pfahlspitze sind nur unter solchen Bedingungen von Wichtigkeit, bei denen die Maximalspannung diejenige am Kopf erreicht oder übersteigt; dabei wird angenommen, daß Kopf und Pfahlspitze die gleiche Festigkeit besitzen. Gemäß den Spannungsmessungen, die vorgenommen wurden beim Rammen von Versuchspfählen unter gewöhnlichen praktischen Verhältnissen, ist es nur einmal vorgekommen, daß die Spitzenspannungen diejenigen der Spannungen am Pfahlkopf überschritten haben und dies nur für Pfähle einer einzigen Baustelle bei außerordentlich schweren Rammverhältnissen (siehe Fig. 15c). In diesem Falle wurde der Pfahlspitzenwiderstand durch eine 13 Fuß dicke Kiesschicht verursacht; zur Durchdringung dieser Schicht wurden 200—400 Schläge pro Fuß benötigt.

Berechnete und gemessene Werte von Spannungen an der Pfahlspitze sind in Tabelle 1 gezeigt, woraus ersichtlich ist, daß in jedem Falle die berechneten Zahlen etwa 20 bis 30 % höher liegen als die gemessenen Werte. Es erscheint daher wahrscheinlich, daß die Wirkung der Oberflächenreibung und der Bewegungsverlust nicht zu vernachlässigen sind, auch in solch seltenen Fällen von sehr hohem Spitzenwiderstand.

Tabelle 1.

Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Spannungswerten an der Pfahlspitze.

Pfahl	Bärgewicht	Fallhöhe	Packung	Elastisches Eindringen	Größte Pfahlspitzenspannung Pfund pro Quadratzoll	
	Pfund	Zoll		Zoll	berechnet	gemessen
Building	980	12	12 Filze	0.17	1'700	1'300
Research		24	„	0.39	1'950	1'670
Station		36	„	0.42	2'860	2'000
(15 ft.)	2'000	12	„	0.19	2'440	1'780
		24	„	0.52	2'800	2'230
Lots Road	7'400	24	des Unter-	0.26	3'300	2'600
(No. 1).			nehmers			
		48	„	0.45	4'000	3'100
(No. 2).		24	„	0.23	2'660	1'900
		36	„	0.34	3'300	2'760
		48	„	0.41	3'950	3'040

Zugspannungen von kurzer Dauer, aber beträchtlichem Wert, die in der mittleren Pfahlregion auftreten können, sind theoretisch möglich. Diese Tatsache wurde schon zu Beginn der Untersuchungen erkannt und wurde damals als die mögliche Hauptursache von Pfahlbruch unter Boden angesehen. Die Resultate von Spannungsmessungen an Pfählen, gerammt unter gewöhnlichen praktischen Verhältnissen, führten jedoch nicht zur Unterstützung dieser Ansicht.

Die Versuchsresultate haben gezeigt, daß zur Erzeugung hoher Zugspannungen der Pfahl frei vibrieren muß entsprechend seiner Längseigenschwingung, mit

Gegenknoten an solchen Punkten, wo die Deformation ein Maximum und die Spannung ein Minimum ist, d. h. an den Enden des Pfahles. Zur Erfüllung dieser Bedingungen ist notwendig, daß der Bodenwiderstand gering ist und die Kopfbedingungen derart, daß der Rammbär sofort zurückspringt bei gleichzeitigem Freilassen des Pfahlkopfes, mit anderen Worten, eine harte Packung und ein Rammbär von geringem Gewicht sind dazu notwendig. Die bei praktischen Versuchen gemachten Beobachtungen sprechen jedoch gegen das Auftreten von Zugspannungen bei den im allgemeinen üblichen Rammverhältnissen. Es ist von Interesse zu erwähnen, daß keine Anzeichen von Bruch infolge Zugspannung beobachtet wurden beim Rammen von 15 Fuß langen Versuchspfählen, ausgeführt von der Building Research Station, obschon Zugspannungen, die größer als die Zugfestigkeit von Beton waren, beobachtet wurden.

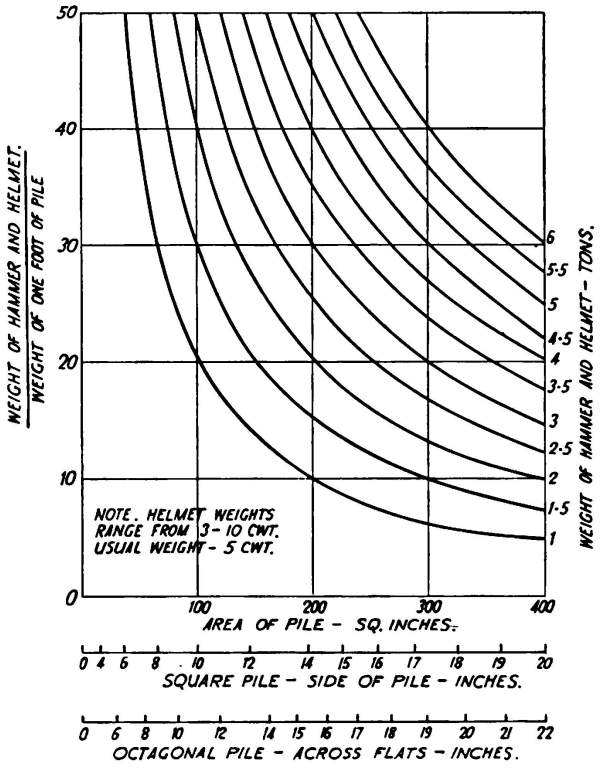


Fig. 17.

Kurventafel für das Verhältnis $\frac{\text{Gewicht von Rammbär und Schlaghaube}}{\text{Gewicht von 1 Fuß Pfahllänge}}$

(Gewicht des Eisenbetons = 160 Pfund per Kubikfuß.)

Aus den in Fig. 17, 18 und 19 dargestellten Kurven läßt sich feststellen, ob für irgendwelche zu untersuchende Rammverhältnisse die Maximalspannung von 3000 Pfund per Quadrat-Zoll oder 2000 Pfund pro Quadrat-Zoll während des Rammens überschritten werden. Drei Möglichkeiten von Rammkissen wurden dabei zugrunde gelegt, nämlich weiches, mittelhartes und hartes Kissen. Für alle untersuchten Packungsarten zeigte sich, daß das harte Kissen anzuwenden ist nach ungefähr 1000 Schlägen.

Zuerst wird aus Fig. 17 das Verhältnis von Bärgewicht und Schlaghaube zum Gewicht von ein Fuß Pfahllänge ermittelt. Aus Fig. 18a oder 18b, je nachdem

2000 oder 3000 Pfund pro Quadrat-Zoll festgelegt wird als maximale Arbeitsspannung, kann die effektive Fallhöhe in Bezug auf die speziellen Kissenverhältnisse entnommen werden. Mit Hilfe von Fig. 19 kann diese effektive Fallhöhe in die freie Fallhöhe umgewandelt werden. Irgend eine höhere als die ermittelte Fallhöhe erzeugt größere Spannungen am Pfahlkopf als festgelegt wurde.

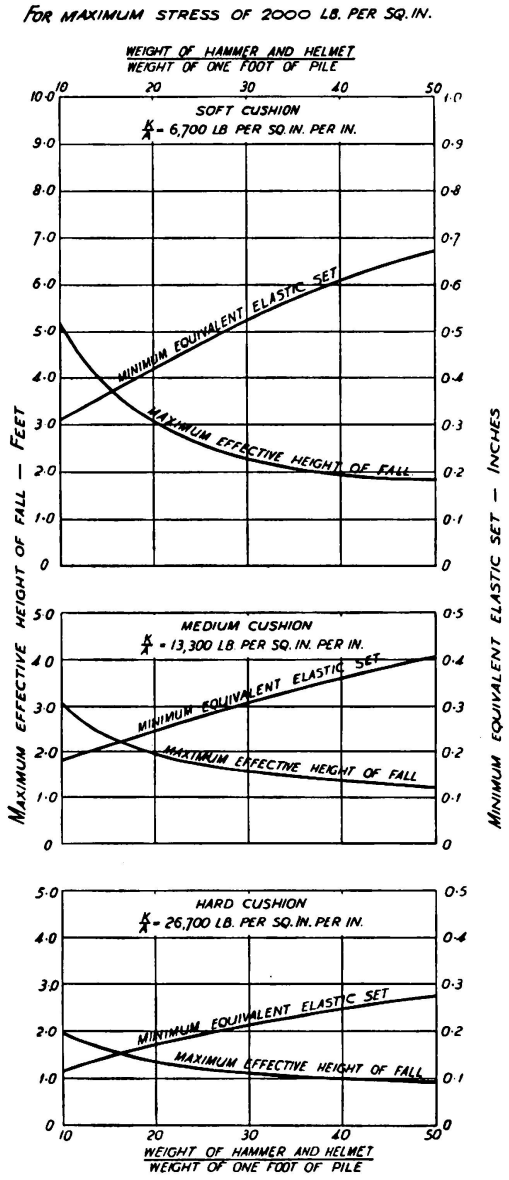


Fig. 18a.

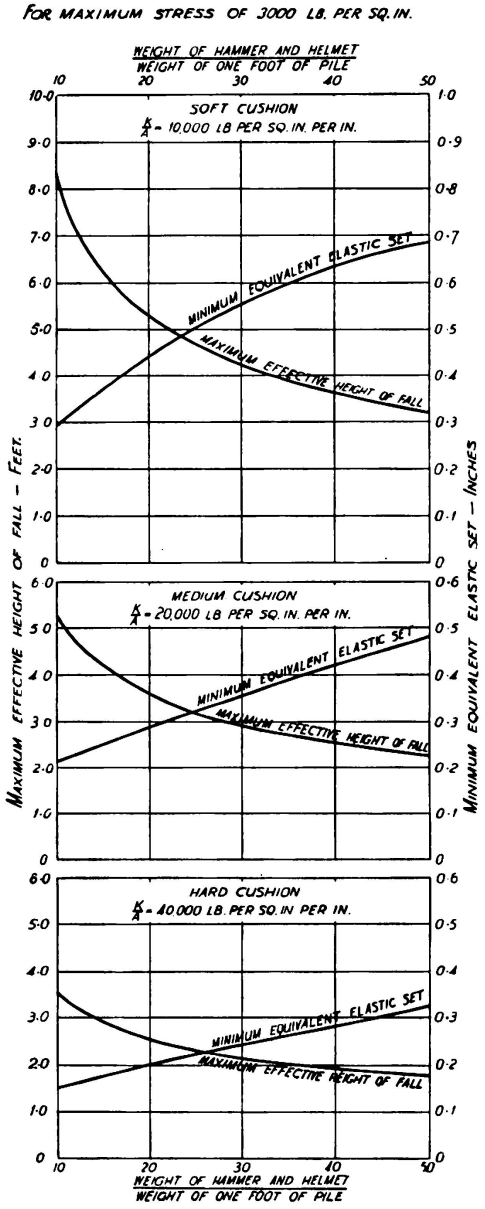


Fig. 18b.

Beziehung zwischen dem Verhältnis $\frac{\text{Gewicht von Rammbär und Schlaghaube}}{\text{Gewicht von 1 Fuß Pfahllänge}}$ und der wirksamen Fallhöhe und dem kleinsten gleichwertigen (äquivalenten) elastischen Setzmaß bei einer größten Spannung von 3000 Pfund pro Quadratzoll ($2^1/_2$ % Längsbewehrung im Pfahl, Elastizitätsziffer für Beton $4{,}5 \times 10^6$ Pfund pro Quadratzoll).

Fig. 18a und 18b gestatten ferner das elastische Eindringen, welches an der Pfahlspitze ähnliche Spannungen, d. h. 2000 oder 3000 Pfund pro Quadrat-Zoll, erzeugt, zu ermitteln. Kleinere Eindringungswerte als die ermittelten, welche

unterhalb der Kurve zu liegen kommen, erzeugen höhere Spannungen. Für Pfahlspitzenspannungen wurde ein Zuschlag von 30% für Reibung eingeschlossen.

Die Wirkung der Rammverhältnisse auf das Eindringen des Pfahles.

Im Laufe der durchgeführten Untersuchung konnte eine größere Zahl von Erfahrungen gesammelt werden hinsichtlich der Wirkungen der Rammverhältnisse auf das Eindringen. Es wird allgemein erkannt, daß die Energiewirkung beim Rammen zunimmt mit dem Gewicht des zur Verwendung kommenden Rammbärs. Die Versuchsergebnisse stimmen mit dieser Ansicht überein; sie zeigen aber auch, daß diese Wirkung weniger hervortritt bei leichtgehendem als bei schwergehendem Rammen.

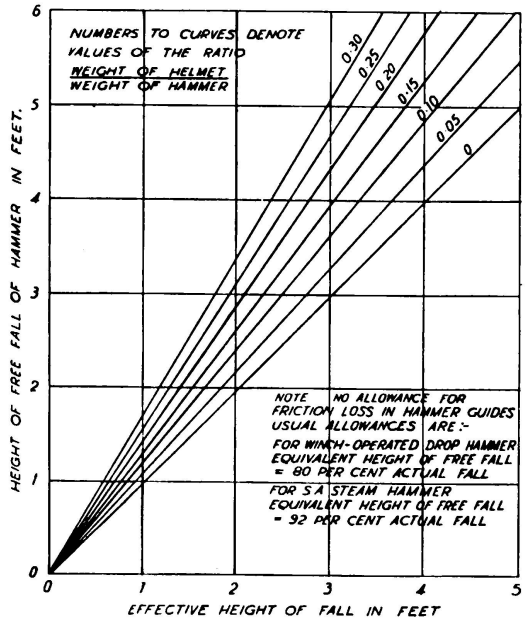


Fig. 19.

Umwandlung von wirksamer Fallhöhe des Rammbärs.

Die Indexzahlen der Kurven bezeichnen die Verhältnisse: $\frac{\text{Schlaghaubengewicht}}{\text{Rammbärgewicht}}$.

Bemerkung: Ohne Berücksichtigung von Reibungsverlusten an den Führungen des Rammbärs. Übliche Berücksichtigungen sind:

Für Winden betätigte Rammbären: Äquivalent der freien Fallhöhe = 80% der wirklichen Fallhöhe.
Für einfach wirkende Dampframmbären: Äquivalent der freien Fallhöhe = 92% der wirklichen Fallhöhe.

Die Verwendung eines schweren Rammbärs hat aber auch noch einen andern Vorteil von ebenso großer Bedeutung wie seine Energiewirkung. Sowohl Theorie wie praktische Tatsache zeigen, daß, wenn die Fallhöhen so eingerichtet werden, daß dieselbe maximale Spannung am Kopf erzeugt werden soll, das Eindringen mit dem Gewicht des Rammbärs wächst.

Die Steifigkeit des Kissens hat, wie schon gezeigt wurde, einen großen Einfluß auf die Spannung; ihre Wirkung auf das Eindringen des Pfahls ist ebenso beträchtlich, jedoch mit dem wichtigen Unterschied, daß das Eindringen in viel größerem Maße von den Bodenverhältnissen abhängt.

Innerhalb des untersuchten Bereiches zeigte sich, daß die Energiewirkung des Rammbärs dann am größten ist, wenn eine Packung großer Steifigkeit zur Ver-

wendung kommt, wobei der Wirkungsgrad bei zunehmendem Rammwiderstand zunimmt. Als Beispiel sei erwähnt, daß der Energiewirkungsgrad von einem 480 Pfund und einem 980 Pfund schweren Rammbär beim Rammen eines 15 Fuß langen Pfahles durch weichen Lehm praktisch derselbe blieb, trotzdem eine Packung von vier $^1/_4$-zölligen Filzen durch eine solche von 24 Filzen ersetzt wurde. Beim mittleren Rammwiderstand jedoch und bei Verkleinerung der Steifheitskonstanten zeigt sich eine bemerkenswerte Abnahme des Energiewirkungsgrades. Außerdem wurde beim Rammen der letzten Stufen der 50 Fuß langen Pfähle für den Lots Road-Bau beobachtet, daß bei Gebrauch von Packungen, bestehend aus 12 und 24 Filzlagen, die Eindringung für eine bestimmte Fallhöhe sich als größer erwies bei 12 Filzlagen als bei 24 Filzlagen.

Diese Tatsache ist sehr wichtig im Hinblick auf die Tragfähigkeit eines Pfahles, wie sie mit Versuchsschlägen festgestellt wird. Es ist allgemein bekannt, daß keine Tragfähigkeitsformel existiert, die allgemeine Anwendung finden könnte, und daß der Erfolg einer Formel in der Hauptsache abhängig ist von richtigen Annahmen über die Boden- und Rammverhältnisse. Es ist ohne Zweifel von Vorteil, wenn die Zahl der Faktoren, welche Annahmen unterliegen, verringert werden kann. Da der Energiewirkungsgrad eines Schlages mit der Abnahme des $\frac{k}{A}$-Wertes sich verringert, mit Ausnahme des Falles geringen Pfahlwiderstandes, so ist es von größter Bedeutung, daß die bei Versuchsschlägen zur Verwendung kommenden Packungen so gut als möglich einheitlicher Natur sind. Der Gebrauch einer einheitlichen Packungsart für solche Zwecke wäre offensichtlich das Erwünschte, aber wie die Verhältnisse gegenwärtig liegen, ist es schwierig eine Packungsart vorzuschlagen, die vereinheitlicht werden könnte. Da eine solche Packung noch nicht gefunden ist, erscheint es besser, stark verdichtetem Material gegenüber neuen Packungen den Vorzug zu geben. Stark verdichtetes Packungsmaterial gestattet für eine gegebene Fallhöhe ein maximales Eindringen, außerdem sind solche Packungen weniger von der Natur des Materiales abhängig als neue Packungen.

Das größte Eindringen bei gegebener maximaler Kopfspannung ergibt sich bei Verwendung von Packungen mit geringer Steifigkeit. Es ist klar, daß das so sein muß speziell beim Rammen mit kleinem Rammwiderstand, da der Energiewirkungsgrad praktisch unverändert bleibt durch die Steifigkeit der Packung, während jedoch die Maximalspannungen am Kopf davon abhängig sind. In Fig. 20 ist die Wirkung für mäßig hartes Rammen dargestellt und obschon keine Versuchserfahrung für Rammen mit großem Rammwiderstand vorliegt, deutet die Theorie darauf hin, daß auch in diesem Falle ein maximales Eindringen für eine gegebene Kopfspannung bei Gebrauch einer Packung mit dem niedersten $\frac{k}{A}$ Wert erreicht wird.

Von besonderer Wichtigkeit ist auch die Beobachtung, daß der Wirkungsgrad des Rammens speziell beim Rammen mit großem Widerstand zunimmt mit der erreichten maximalen Kopfspannung, in andern Worten beim Rammen mit großem Widerstand erzeugen Fallhöhen, die geringer als eine gewisse Höhe sind, kein bleibendes Eindringen. Beim Rammen eines 50 Fuß langen Pfahles für den

Lots Road-Bau, nach dem der Pfahl 41 Fuß 6 Zoll eingedrungen war, ergaben sich bleibende Eindringungen unter Verwendung desselben Pfahlkissens, für Fallhöhen von 24, 36 und 48 Zoll von bzw. 0,04, 0,10 und 0,19 Zoll.

Es ist daher von bedeutender Wichtigkeit, daß beim Rammen mit großem Widerstand zur Erzielung eines fortlaufend guten Eindringens der Pfahlkopf unbeschädigt bleibt, da nämlich die Maximalspannung, die ein beschädigter Pfahlkopf ohne zunehmende Zerstörung aushalten kann, bedeutend geringer ist als beim unbeschädigten Pfahlkopf.

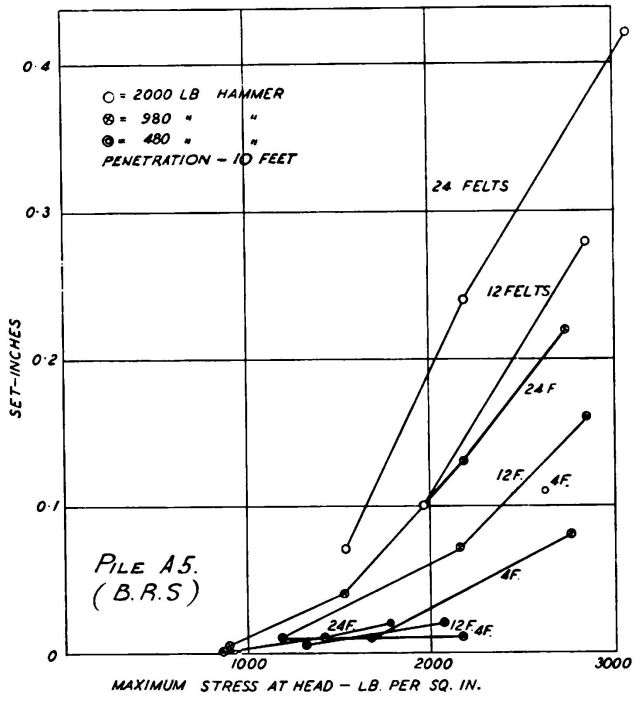


Fig. 20.

Änderung des bleibenden Setzmaßes mit größter Kopfspannung eines 15 Fuß langen Pfahles.

Die günstigsten Rammverhältnisse.

Die günstigsten Rammverhältnisse können auf folgende zwei Arten umschrieben werden:

Sie können entweder diejenigen Verhältnisse sein, bei welchen ein größtes Eindringen bei geringstem Rammenergieaufwand erzielt wird, unabhängig von den im Pfahl erzeugten Spannungen. Die günstigsten Rammverhältnisse können auch dadurch gekennzeichnet sein, daß für die geringsten Spannungen im Pfahl ein größtmögliches Eindringen erzielt wird, unbekümmert um den Energieaufwand. Da aber in den meisten Fällen die Sicherheit des Pfahles gegen Bruch im Vordergrund steht und die aufgewendete Energie, innerhalb vernünftiger Grenzen, von kleinerer Wichtigkeit ist, so können als günstige Rammverhältnisse diejenigen angesehen werden, bei welchen die durch das Rammen erzeugten Spannungen auf ein Minimum herabgedrückt werden können.

Für den Bereich der untersuchten Verhältnisse hat es sich gezeigt, daß die günstigsten Rammbedingungen, dargestellt durch den Wert des Faktors $\frac{\text{Eindringung}}{\text{maximale Kopfspannung}}$ ohne Ausnahme dann auftraten, wenn der schwerste

Rammbär bei gleichzeitiger Verwendung eines Rammkissens mit kleinster Steifigkeit zur Verwendung kam. Es besteht Grund zur Annahme, daß diese Regel allgemein verwendet werden kann und daß sie im Prinzip unabhängig von der Bodenbeschaffenheit ist.

Unter gewissen Bedingungen für mäßigen und großen Rammwiderstand ergibt sich bei Anwendung eines Kissens bei geringer Steifigkeit ein Verlust an Energiewirkung. In ganz wenigen Fällen jedoch ist der Verlust an Energiewirkungsgrad von genügender Größe, um die Verwendung eines steiferen Kissens zu rechtfertigen, da nämlich für die meisten Pfähle der Spielraum an Festigkeit nicht groß genug wäre, um eine wesentliche Vergrößerung der Rammspannungen zuzulassen. Es scheint daher, daß Abänderungen in der Rammausrüstung zur Erzielung besserer Rammverhältnisse solcher Art sein sollen, um eine Vergrößerung der Schlagdauer und eine Verringerung des Maximalwertes der Spannung zu erzielen.

Der Spitzen-Spannungs-Messer.

Das Instrument dient zwei Zwecken, erstens um die Maximalspannungen am Kopf des Pfahles für eine bestimmte Rammstufe zu messen und zweitens durch das Aufleuchten der Neonlampe anzuzeigen, wenn die maximale Spannung am Kopf den vorgeschriebenen Wert übersteigt. Aus dem Maximalwert der Kopfspannung läßt sich folgendes ermitteln: 1. die Konstante $\frac{k}{A}$ der Packung und 2. der ungefähre Wert des Stoßkraft-Widerstandes des Betons, durch Messung der größten Kopfspannung bei größter Fallhöhe, die, ohne Zerstörung des Pfahlkopfes zu verursachen, angewendet werden kann.

Es ist ebenfalls klar, daß das Instrument als ein Warnungssignal verwendet werden kann bezüglich der Kopfspannung, speziell wenn es eingestellt ist, Spannungen anzuzeigen, die über einem vorgeschriebenen Werte liegen; dadurch wird ermöglicht, die Fallhöhe rechtzeitig zu verringern oder die Packung im Helm durch eine neue zu ersetzen.

II. Zerstörungs-Versuche.

Außer den beschriebenen Versuchen wurden für eine große Zahl von 15 Fuß langen Pfählen Versuche bis zur Zerstörung durchgeführt. Zu diesem Zwecke wurden die Pfähle gegen einen schweren Betonblock gerammt unter Anwendung einer Packlage an der Pfahlspitze, um dadurch erwünschte Aufschlüsse über den Pfahlspitzenwiderstand zu erhalten. Die Pfähle waren 7 Zoll im Quadrat und der verwendete Rammbär hatte ein Gewicht von 980 Pfund. Die zur Untersuchung gelangenden Punkte waren die folgenden:

1. Größe und Verteilung der Eiseneinlagen.
2. Art des Zementes und Alter beim Versuch.
3. Zementmenge.
4. Lagerung.
5. Art der Zugschlagstoffe.

Eine vollständige Beschreibung dieser Versuche ist in den bereits erwähnten Veröffentlichungen zu finden. Die Schlußfolgerungen zu diesen Versuchen sind im folgenden Abschnitt enthalten.

Zusammenfassung der Schlußfolgerungen.

1. Spannungszustände.

Die vorliegende Arbeit hat theoretisch wie experimentell gezeigt, daß die Wellen-Theorie hinsichtlich der Fortpflanzung der Spannung beim Einrammen von Eisenbetonpfählen Gültigkeit hat. Die Zusammendrückung, hervorgerufen durch den Schlag, setzt sich nach unten durch den ganzen Pfahl fort, ausgehend vom Pfahlkopf, und wird unten an der Pfahlspitze wieder zurückgeworfen in Form von Druckspannungen beim Rammen in harten oder Zugspannungen beim Rammen in leichtem Boden. Die Spannung in irgend einem Punkte des Pfahles ist die Summe der Spannungen aus den herunter- und den aufsteigenden Spannungswellen. Die durch „hartes" (in schwer zu rammendem Boden) Rammen hervorgerufenen Druckspannungen können 3000 lbs/sqin. übersteigen.

Das „Rammkissen" am Pfahlkopf, d. h. die Rammjungfer zwischen Pfahl und Schlaghaube, und die Packung in der Schlaghaube, spielen eine wichtige Rolle in der Bestimmung der Spannungen; je weicher dieses „Kissen" ist, umso niedriger liegt der maximale Wert der Spannungen. Für ein Kissen mit linearer Spannung-Dehnung-Beziehung bedeutet die Steifheitskonstante $\frac{k}{A}$ diejenige Spannung am Pfahlkopf, welche die Einheits-Setzung erzeugt. Die Kissen haben gewöhnlich nur eine nicht-lineare Spannung-Dehnung-Beziehung; daher muß die Beziehung $\frac{k}{A}$ meistens ausgedrückt werden als: so und soviele lbs/sqin. Bei Spannungen von 3000 lbs/sqin. bewegen sich die Werte von $\frac{k}{A}$, in der Praxis von 10000 bis auf 40000 lbs/sqin. und für Spannungen von 2000 lbs/sqin. entsprechend von 6670 bis auf 26700 lbs/sqin.; die $\frac{k}{A}$-Werte sind ungefähr proportional den Spannungen. Die meisten zur Verwendung kommenden Packungsarten verdichten sich während des Rammens. Für Pfähle länger als 30′ ist die maximale Spannung am Pfahlkopf im allgemeinen unabhängig von den Bodenbedingungen an der Pfahlspitze.

Für sehr gute (leichte) Rammverhältnisse, d. h. für Rammen mit großen Hitzen (großen Setzungen) sind die Druckspannungen an der Spitze sehr klein und die Spannungswelle wird als Zug zurückgeworfen, welcher (letzterer) zusammengesetzt mit der herunterkommenden Druckwelle Zug hervorruft, der von null an der Spitze bis zu einem Maximum ungefähr in Pfahlmitte zunimmt. Soweit wurden keine Pfahlbrüche, hervorgerufen durch solche Zugspannungen, festgestellt. Mit dem Zunehmen des Widerstandes an der Pfahlspitze nehmen auch die Druckspannungen zu, die theoretisch bis zum doppelten Werte der größten Spannung am Kopf anwachsen können; Werte von 50 % mehr wurden jedoch gemessen.

Die Spannung am Fuß (Spitze) ist abhängig von der Bewegung der Pfahlspitze, d. h. von der Hitze (Eindringen), wie auf übliche Art gemessen, und der elastischen Bodenbewegung im Gebiete der Pfahlspitze. Zum Zwecke der Spannungsbestimmung wurden die gewöhnlichen oder endgültigen Hitzen (Eindringen) als „plastisch" und die Bodenbewegung als „elastisch" bezeichnet. Beide zu-

sammen wurden wie folgt benannt: (equivalent elastic set) Elastisches Eindringungs-Äquivalent. Elastisches Eindringungs-Äquivalent = doppelter Wert des plastischen Eindringens (endgültiges Eindringen auf übliche Weise gemessen) + elastisches Eindringen (oder Bodenbewegung).

Die ungünstigen Bedingungen für die Pfahlspitze werden erhalten, wenn der gesamte Widerstand gegen Eindringen sich auf diesen Punkt zusammenzieht. Reibung an den Seiten des Pfahles hat nur einen geringen Einfluß auf die Spannungen am Pfahlkopf, kann jedoch von Wichtigkeit sein für das Herabmindern der Spannungen unter dem Boden.

Ein einfaches Verfahren zum Messen der Eindringungen hat sich als ausreichend und zufriedenstellend erwiesen und ist in Fig. 6 dargestellt. Die elastische Zusammendrückung des Pfahles bedingt eine Korrektur des elastischen Eindringens. Die elastische Zusammendrückung des Pfahles beträgt 0,004 Zoll per Fuß für die eingedrungene Länge des Pfahles bei einer Kopfspannung von 3000 lbs/sqin., und entsprechend 0,003 Zoll per Fuß bei 2000 lbs/sqin. Kopfspannung. Weitere Untersuchungen über die Größenordnung des elastischen und plastischen Eindringens, wie es in der Praxis vorkommt, werden noch benötigt.

Diagramm-Tafeln wurden hergestellt, welche erlauben, Spannungen im voraus zu bestimmen für eine große Anzahl von Möglichkeiten.

Die besten Ramm-Verhältnisse erhält man bei Anwendung des schwersten Rammbärs zusammen mit dem weichsten Kissen (kleinster Steifheitswert $\frac{k}{A}$); die Fallhöhe muß dabei so gewählt werden, daß die zulässige Spannung gerade erreicht wird (nicht überschritten wird). Es wird vorgeschlagen, daß als vernünftiger (zweckmäßiger) Minimalwert des Verhältnisses Bärgewicht zu Gewicht von 1 Fuß Pfahl als 30 anzunehmen ist. Damit erhält man für quadratische 12″, 14″, 16″, 18″ Pfähle ein entsprechendes Bärgewicht von $2^1/_4$, 3, $3^3/_4$ und $4^3/_4$ Tonnen (siehe Fig. 17).

Fast in allen Pfählen nahm „das elastische Eindringungsäquivalent" (equivalent elastic set) proportional zu mit dem Bär-Gewicht, und praktische Versuche zeigen, daß das plastische Eindringen (plastic set), (Eindringen auf herkömmliche Art gemessen), in größerem Maße zunahm.

Die Spannung am Kopf kann mit dem Spitzenspannungsindikator (Meßapparat) festgestellt werden, welcher am Rammbär befestigt wird und seine Verzögerung mißt. Dieses Instrument kann auch verwendet werden, um festzustellen, ob ein zum voraus festgelegter Wert überschritten wird.

Die Messung des elastischen und plastischen Eindringens erlaubt, die auf diese Weise erhaltenen Spannungs-Werte zur Feststellung der Spannung an der Pfahlspitze zu gebrauchen. Die Fig. 17, 18 und 19 können zu diesem Zweck gebraucht werden, wobei der Apparat auf 2000 lbs/sqin. oder beziehungsweise auf 3000 lbs/sqin. eingestellt ist.

2. *Praktische Betrachtungen.*

Um das Rammen von Pfählen auf eine wirklich wissenschaftliche Basis zu bringen, ist es notwendig, eine verbesserte Art von Schlaghauben-Kissen zu finden, welche gleichzeitig die Eigenschaft der Beständigkeit und eines konstanten niederen Steifigkeitsgrades besitzt. Bis jetzt wurde noch keine zufriedenstellende

Schlaghaubenpackung gefunden, es scheint jedoch im Bereiche der Möglichkeit zu liegen, daß an Stelle von Rammjungfer, Schlaghaube und Packung eine mechanische Vorrichtung gefunden werden kann, welche eine viel zufriedenstellendere Lösung darstellen würde.

Der Bereich der Sicherheit beim Rammen von Pfählen ist sehr oft so klein, daß die geringste Unachtsamkeit in der Herstellung der Pfähle wie auch beim Rammen selbst genügt, um den Pfahl zum Bruch zu bringen. Der Pfahlkopf soll sorgfältig hergestellt werden, alle seine von der Schlaghaube eingeschlossenen Flächen sollen genau eben sein und rechtwinklig zur Pfahlachse stehen. Es ist sehr wichtig, daß die Packung gleichmäßig auf den Pfahlkopf aufgelegt wird und daß die mit dem Pfahlkopf direkt in Berührung stehende Lage aus weichem, die ganze Kopffläche bedeckendem Material besteht. Der Fall des Rammbärs soll genau parallel sein zur Längsachse des Pfahles und der Schlag soll sich so konzentrisch wie nur möglich vollziehen.

Die Stoß-Festigkeit des Betons mag auf ungefähr 50 % der Druckfestigkeit herabsinken. Für eine Arbeits-Spannung von 3000 lbs/sqin. ist daher eine Beton-Druckfestigkeit von 6000 lbs/sqin. notwendig und entsprechend für 2000 lbs/sqin. eine solche von 4000 lbs/sqin.

Um eine größere Festigkeit als 6000 lbs/sqin. zu erhalten, dürfen keine Mischungen magerer als $1:1^1/_2:3$ (nominal) zur Verwendung kommen. Eine solche Mischung entspricht 1 cwt (112 lbs.) Zement auf $1^7/_8$ Kubik-Fuß Sand und $3^3/_4$ Kubik-Fuß Kies oder Schlagschotter. Die größte Sorgfalt muß bei der Auswahl der Zuschlagstoffe (Kies oder Schotter), sowie für die Menge des Wasserzusatzes und beim Lagern angewendet werden. [Es ist von Interesse zu bemerken, daß gemäß dem Code of Practice (Ausführungsvorschriften) für hochwertigen Beton $1:1^1/_2:3$ nur eine Bruchfestigkeit von 3300 lbs/sqin. verlangt wird.] Für leichtes Rammen, wo eine geringere Druckfestigkeit ausreichend erscheint, dürfte genügend Festigkeit auch mit sorgfältig hergestelltem Beton einer Mischung von 1 : 2 : 4 erzielt werden.

Die Behandlungsweise während des Lagerns hat einen bedeutenden Einfluß auf die Widerstandsfestigkeit gegen Stoß; deshalb sollten Pfähle so lange als praktisch möglich in feuchtem Zustande gelagert werden. Es ist empfehlenswert, daß die Lagerungszeit nicht weniger als 14 Tage betrage, es sei denn, daß günstige Rammverhältnisse vorliegen. Weitere Untersuchungen über die Stoßfestigkeit und die sie beinflussenden Faktoren werden noch benötigt.

Die Stoßfestigkeit wird durch die Längsbewehrung nur unwesentlich beeinflußt. Die Querbewehrung hingegen ist von größtem Einfluß auf die Stoßfestigkeit, besonders am Kopf und an der Spitze des Pfahles. Es wird empfohlen, daß die Enden des Pfahles für eine Länge von zweieinhalb- bis dreimal den äußern Durchmesser des Pfahles eine Quer-Bewehrung erhalten sollen, deren Volumen nicht weniger als 1 % des Bruttovolumens einer entsprechenden Länge des Pfahles beträgt. Der Durchmesser der Quer-Bewehrung darf der üblichen Eisenbeton-Praxis entsprechen und soll nicht weniger als $^3/_{16}''$ oder $^1/_4$ des Durchmessers der Hauptarmierungseisen sein; der größere der zwei Werte ist zu verwenden. Der kleinste Abstand zwischen den Querarmierungen an Kopf und Spitze soll immer noch so sein, daß ein leichtes Einfüllen des Betons gewährleistet ist. An einer auswärtigen Baustelle wurde beobachtet, daß das Verhalten der Pfähle

trotz der schweren Spiralarmierung von $2^1/_4$ % ein sehr gutes war, obschon vielfach die Überdeckungsschicht der Eisen sich in großen Flächen loslöste, ohne die Widerstandskraft der Pfähle bei weiterem Rammen merklich zu beeinflussen.

Vorgängig des Betonierens in die Schalung eingelegte Flacheisen-Kopfbänder erhöhten die Widerstandskraft des Pfahlkopfes beträchtlich.

Die Abhängigkeit der erzielten Eindringungen von der Art der Packung weist auf die Wichtigkeit der Bedingungen und der Natur der zu wählenden Packung hin, speziell wenn die Tragfähigkeit aus bestimmten Eindringungen ermittelt werden soll.

In Ermangelung einer Standard-Packung soll darauf gedrungen werden, daß zum mindesten die Packungen kompakt hergestellt werden, um dadurch ein größtmögliches Eindringen pro Schlag zu erzielen. Die bis anhin ausgeführten Versuche befassen sich nicht mit der Tragfähigkeit von Pfählen.

Wörterverzeichnis für die Figurentexte.

Englisch	Deutsch
A	A
across flats	zwischen zwei parallelen Seiten
amplifier	Verstärker
approximately	ungefähr
area of pile	Querschnittsfläche des Pfahles
area of pile head	Querschnittsfläche des Kopfes
B	B
ballast	Auflast, Kies
bearer	Träger, Unterlage
blue clay	Blauer Ton (Lehm)
board	Brett
brown clay	Brauner Ton
building Research Stn.	Institut für Bauforschung
C	C
calculated values for packing of 24 felts	Berechnete Werte für eine Packung aus 24 Filzlagen
camera	Photoapparat
cathode ray oscillograph	Kathodenstrahlen Schwingungsmesser
clamp	Klammern
chamfers	Abkantung (gebrochene Kante)
clay	Lehm, Ton
concrete in powdered state	Beton in Pulverform (pulvriger Form)
cover to main bars	Überdeckung der Hauptbewehrung
D	D
dia. bars	Durchmesser der Eisen
dia. helical binding	Durchmesser der Spiral-Bewehrungseisen
dia links	Durchmesser der Bügeleisen
distance from toe in feet	Abstand von der Spitze, in Fuß
drops	Fallhöhen

E	E
effective height of fall in feet	wirksame Fallhöhe, in Fuß
elastic	elastisch
electric axis	elektrische Achse
electrodes	Elektroden
equivalent elastic set	gleichwertiges elastisches Setzmaß
Excavation	Aushub
F	F
feet	Fuß (Füße)
felts	Filze
G	G
ground resistances (measured by energy in foot-tons used for one foot of penetration	Bodenwiderstand (gemessen durch Energie in Fuß-Tonnen, angewendet für 1 Fuß Eindringung)
H	H
hammer	Rammbär
hard cushion	hartes Kissen
head	Kopf
head-level when abandoned	Lage des Kopfes (Stellung) nach Einstellen des Rammens
heavy timber about 8 ft. long	schweres (Kant) Holzstück 8 Fuß lang
helical binding 2" pitch	Spiralarmierung mit 2 Zoll Abstand
height of free fall of hammer in feet	Freie Fallhöhe in Fuß
helmet weights range from 3—10 cwt.	Schlaghaubengewicht von 3—10 cwt.
I	I
Inches	Zoll
L	L
lb. per sq. in.	Pfund per Quadratzoll
length of pile	Länge des Pfahles
links at 2" pitch	Umschnürung mit 2 Zoll Abstand
loam	Lehm
London University pile	Pfahl der Universität London
longitudinal reinforcement	Längsbewehrung
Lots Road pile	Pfahl der Baustelle Lots Road
M	M
maximum compressive stress at head	größte Druckspannung am Kopf
maximum effective height of fall	größte wirksame Fallhöhe
maximum stress	größte Spannung
maximum stress at head	größte Spannung am Kopf
medium cushion	Kissen mittlerer Härte
milliceconds	Tausendstel Sekunde
minimum equivalent elastic set	kleinstes gleichwertiges elastisches Setzmaß
m. s. welded band ... thick	Flußstahlzwinge geschweißt ... stark
m. s. welded cap ... thick	Flußstahlkappe geschweißt ... stark
N	N
neon lamp	Neon - Lampe
no other rod visible	kein anderes Eisen sichtbar
new packing	neue Packung
O	O
octagonal pile	achteckiger Pfahl
old packing	alte Packung
optic axis	optische Achse
optic axis perpendicular to plane of paper	optische Achse rechtwinklig zur Ebene des Papiers
output	Leistung

P	P
paper	Papier
penetration	Eindringung (Setzmaß)
piezo-electric strain gauge	Druck-elektrischer Spannungsmesser
pile	Pfahl
plastic	plastisch
position of upper portion: assumed length	Stellung des oberen Teiles: angenommene Länge
position of lower portion: assumed length	Stellung des unteren Teiles: angenommene Länge
position when pitched	Ursprüngliche Stellung
pressure-lb. per sq. in.	Druck — Pfund pro Quadratzoll
R	R
recording pencil	aufzeichnender (Blei) Stift
recorded values for packing of 24 felts	gemessene Werte einer Packung aus 24 Filzlagen
S	S
sand	Sand
scales	Maßstäbe
scale of inches	Zoll-Maßstab
set	Setzmaß, Eindringung
side of pile	Seite des Pfahles
soft cushion	weiches „Kissen“
straight edge	Richtlatte, Setzlatte
square pile	quadratischer Pfahl
T	T
time marker	Zeitmesser
third axis	dritte Achse
third (pressure) axis	dritte (Druck) Achse
toe	Pfahlspitze
toe-level when hard driving commenced	Lage der Pfahlspitze zu Beginn des schweren Rammens
ton	Tonne
total weight of pile	Gesamtgewicht des Pfahles
throughout	durchgehend
typical set record (enlarged)	typische Eindringungsmessung (vergrößert)
U	U
usual weight 5 cwt.	gewöhnliches Gewicht 5 cwt.
V	V
velocity of hammer at impact	Geschwindigkeit des Rammbärs beim Aufschlag
velocity of disturbance along pile	Geschwindigkeit der Störung längs des Pfahles
volt generator	Spannungserzeuger (elektrisch)
W	W
weight of hammer and helmet	Gewicht von Bär und Schlaghaube
weight of 1 foot of pile	Gewicht von 1 Fuß Pfahllänge
where	wo

Zusammenfassung.

Die Tiefbaufirmen stoßen im allgemeinen auf Schwierigkeiten, wenn sie nach niedergelegten Bedingungen Eisenbetonpfähle durch eine hart zu durchstoßende Schicht in der darunter liegenden Schicht zu vollständigem Aufsitzen rammen sollen. Dabei werden oft viele Pfähle nicht nur über dem Boden sondern

auch unter dem Boden zerstört. Die Abhandlung ist ein gekürzter Bericht über die von der Building Research Station unternommenen Untersuchungen, die den Zweck hatten, diejenigen Bedingungen zu finden, unter welchen beim Rammen die Möglichkeit von Pfahlbruch besteht. Die Untersuchungen vollzogen sich unter Beihilfe und Mitarbeit der Federation of Civil Engineering Contractors (Verband der Bauingenieur-Unternehmungen).

Die Untersuchungen benötigten die Messung von Spannungen, wie sie beim Rammen von Pfählen auftreten; dabei kam ein druckelektrisches Verfahren zur Anwendung. Eine Beschreibung des druckelektrischen Meßgerätes ist gegeben. Es wurde festgestellt, daß die erzeugten Spannungen nicht nur in großem Maße von den Bodenverhältnissen sondern auch von den Bedingungen für den Pfahlkopf abhängig sind, im besonderen von der Änderung und dem Zustand der Schlaghaubenpackung.

Das mathematische Verfahren zur Ermittlung der Spannungen für gewisse Schlaghaubenpackungen und Eindringungsverhältnisse ist kurz umschrieben. Die entwickelte Theorie zeigt eine ziemlich gute Übereinstimmung mit den Versuchsresultaten, nicht nur bei Versuchen in kleinem Maßstab, sondern auch bei Versuchen unter wirklich schwierigen Verhältnissen, typisch für ungünstige Bauverhältnisse. Es wird gezeigt, daß am Pfahlkopf oder auf der Pfahlspitze die größten Spannungen auftreten können. Tabellen zur Bestimmung dieser Spannungen an diesen zwei Stellen sind gegeben.

Die Schlußfolgerungen aus Versuchen bis zur Zerstörung von quadratischen Pfählen von 15 Fuß Länge und 7 Zoll Seitenlänge sind ebenfalls erwähnt. Außerdem werden Empfehlungen über die Herstellung und Behandlung von Eisenbetonpfählen vor dem Rammen gegeben.

Leere Seite
Blank page
Page vide