**Zeitschrift:** IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

**Band:** 26 (1966)

**Artikel:** Ein praktischer Weg zur Bestimmung der Rammspannungen in Stahlbeton-Rammphählen

**Autor:** Széchy, K.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-20894

**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:** 02.07.2025

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

# Ein praktischer Weg zur Bestimmung der Rammspannungen in Stahlbeton-Rammpfählen

*A Practical Method for the Determination of Pile-driving Stresses in the Case of Reinforced Concrete Piles*

*Un moyen pratique de déterminer les contraintes de battage des pieux en béton armé*

K. SZÉCHY
Prof. Dr., Budapest

Wenn man die Ursachen des häufig vorkommenden Zugrundegehens der vorgefertigten Stahlbetonpfähle während des Rammvorganges untersucht, stößt man zuerst auf zwei grundlegende Mängel unserer Kenntnisse. Es sind nämlich weder die Rammbeanspruchungen im Pfahlkopf und im Pfahlschaft noch die Festigkeit derselben gegen dynamische Schläge genau nachweisbar. Deshalb ist die Bemessung dieser Pfähle auch noch heute hauptsächlich auf praktische Erfahrungen angewiesen. Diese Erfahrungen können natürlich nicht alle Umstände erfassen, und es kommt sehr häufig vor, daß unter geänderten Rammverhältnissen die Stahlbetonpfähle versagen, d. h. der Pfahlkopf zerbröckelt und der Pfahlschaft Risse erleidet.

Glanville und seine Mitarbeiter bestimmten 1935 durch ausführliche Untersuchungen die im kritischen Querschnitt des Pfahls (Kopf, Spitze) auftretenden Spannungen. Es gelang ihnen die Wirkung vieler Faktoren zu klären, von denen sich als die wichtigsten für die Größe der Spannungen das Gewicht des Rammbären, die Fallhöhe, die Elastizität der Rammhaube sowie die Querbewehrung des Pfahlkopfes und der Spitze ergeben hatten. Die im Kopf auftretenden größten Beanspruchungen wurden durch die vom Schlag verursachten Schwingungen theoretisch bestimmt und in Dimensionierungskurven zusammengefaßt. Dabei muß aber außer diesen Faktoren noch ein Stoßfaktor $k$ aufgenommen werden, der die Elastizität der Rammhaube ausdrückt. Dieser Wert ist aber auch mit den zur Verfügung gestellten Hilfsmitteln und Richtwerten ziemlich unsicher und kann zu großen Abweichungen

von der Wirklichkeit führen, weil auch die theoretischen Ausgangsbedingungen Annäherungen enthalten.

In der Baupraxis oft auftretende Schlagbeschädigungen veranlaßten den Verfasser, die während des Einrammens meßbaren tatsächlichen Formänderungen für eine genauere Bemessung zu verwenden. Bekanntlich sind ja die Formänderungen innerhalb des Elastizitätsbereiches den Spannungen proportional.

Geht man von der grundlegenden Energiegleichung aus, so muß die Gleichheit der Rammarbeit mit der Eindringungsarbeit (genauer: Formänderungsarbeit) zu Grunde gelegt werden. Mit den bekannten Bezeichnungen ist also

$$Q h \alpha = c P e, \tag{1}$$

worin $Q$ das Gewicht des Rammbären, $h$ die Fallhöhe und $\alpha$ die Rammverluste (Reibung, Exzentrizität, Stoß usw.) bedeutet, während $P$ die im Pfahl auftretende Kraft, $e$ die Eindringung (Formänderung) und $c$ die dabei auftretenden Verluste bedeutet. Werden die Verluste zum Faktor $\alpha/c = \beta$ zusammengefaßt und beachtet man, daß die durch den Schlag eintretende Verformung aus zwei Teilen, nämlich aus der bleibenden Eindringung des Pfahls $e_m$ und aus der elastischen Verformung des Pfahles und des Baugrundes $e_r$ besteht, dann kann die Gleichung (1) folgendermaßen angeschrieben werden:

$$\beta Q h = P (e_m + \tfrac{1}{2} e_r)$$

und

$$P = \frac{\beta Q h}{e_m + \frac{1}{2} e_r}. \tag{2}$$

Auf die Einwirkung des Rammschlages gerät der Pfahl aus der Lage 1 der Fig. 1 in die Lage 3 und gelangt dann nach Beendigung des Schlages in die Lage 2.

Zu Beginn des Rammens sind die Werte $e_m$ groß, also wird die im Pfahl auftretende Kraft $P$ bei gleichbleibender Rammarbeit ($Q h$ = konst.) gering sein. Bei fortschreitendem Einrammen nehmen die bleibenden Setzungswerte $e_m$ ab, und die Kraft $P$ nimmt zu. Wird die Kraft $P$ größer, so nimmt aber auch die elastische Verformung $e_r$ zu, vorausgesetzt, daß die freie Verformungslänge ($l$) auch konstant bleibt, weil nach Hooke

$$e_r = \frac{P l}{E F} = \frac{\sigma l}{E} \tag{3}$$

ist.

Die Länge $l$ ist aber nicht konstant, weil bei fortschreitender Pfahleindringung die ständig wachsende Reibung die freie Verformung hindert. Die sogenannte aktive Länge nimmt also dadurch ständig ab. Außerdem muß berücksichtigt werden, daß die über der Bodenoberfläche meßbare elastische

Verformung nicht nur die des Pfahls ($e_{rc}$), sondern auch die des Bodens ($e_{rt}$) unter der Pfahlspitze enthält. Es ist also

$$e_r = e_{rc} + e_{rt}. \tag{4}$$

Bemerkt sei, daß die auf Grund der Formel (3) berechnete elastische Verformung des Pfahls prinzipiell geeignet ist, die im Pfahl auftretenden Spannungen $\sigma$ zu berechnen, weil man von Gleichung (3) folgenden Ausdruck ableiten kann:

$$\sigma = \frac{e_{rc} E}{l}. \tag{5}$$

Beim Einrammen von Pfählen ist es ganz natürlich, daß zu Beginn die Eindringungen groß sind und dementsprechend die durch den Ausdruck (2) bestimmbaren Pfahlkräfte klein bleiben. Mit der Abnahme der Eindringungen

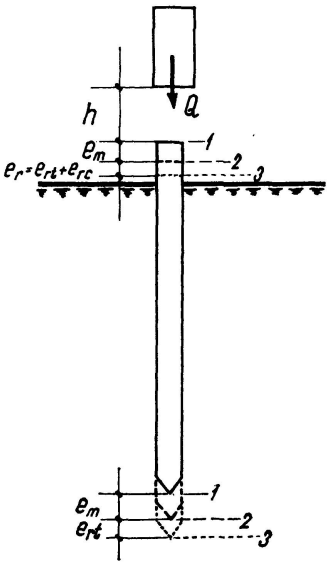


Fig. 1.

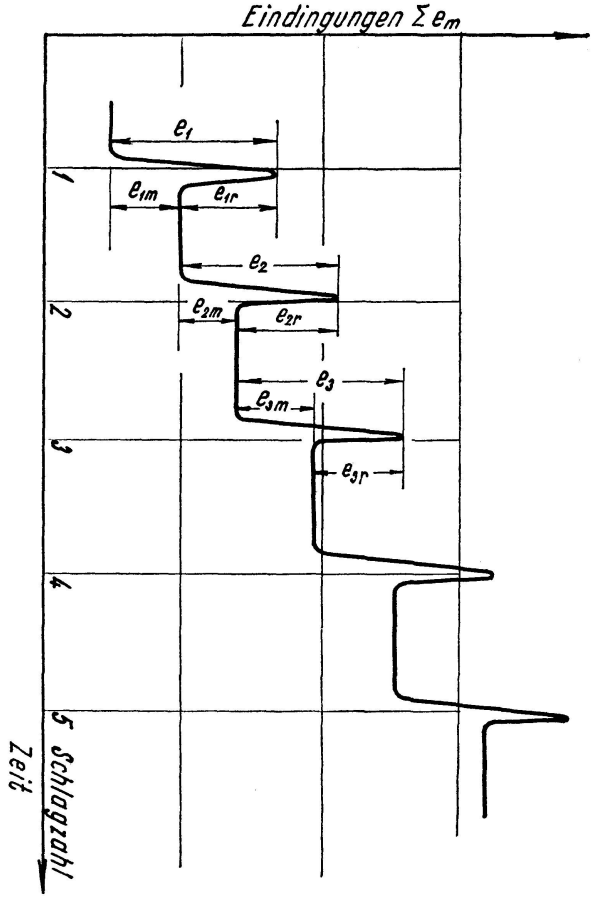


Fig. 2.

steigt die Pfahlkraft fortschreitend an, und damit nimmt auch die elastische Verformung nach der Gleichung (2) ständig zu. Nach einer gewissen Grenze wird die bleibende Eindringung des Pfahls praktisch Null ($e_m \to 0$), womit die gesamte Rammarbeit in elastische Verformung umgewandelt wird. Damit erreichen auch die Pfahlkraft $P$ und die in dem Pfahlschaft entstehenden Spannungen ihren Höchstwert, weil auch die elastischen Verformungen prak-

tisch konstant bleiben. Bei fortgesetztem Einrammen kann die elastische Verformung des Geländes ($e_{rt}$) durch Bodenverdichtungen unter der Pfahlspitze ein wenig größer werden, was jedoch weder die Tragfähigkeit des Pfahls maßgebend vergrößert noch den Wert $e_r$ merklich beeinflußt.

Wird jedoch die Rammung weiter fortgesetzt, so wird die Zerstörung des Pfahls fortschreitend gefördert.

Hört die bleibende Eindringung des Pfahls auf und wird das Einrammen weiter fortgesetzt, so wird der Pfahl durch wiederholte Belastung auf Ermüdung beansprucht, ohne dabei seine Tragfähigkeit im Boden erhöhen zu können.

Die im Pfahl auftretende Durchschnittsspannung kann mit Hilfe des Ausdrucks (3) während des Einrammens theoretisch jederzeit durch direkte Messung kontrolliert werden, weil

$$\sigma = \frac{E\, e_{rc}}{l}$$

ist. Der Wert $\sigma$ muß in jedem Fall kleiner sein als $\sigma_H$, der die aus den Abmessungen und der Bewehrung des Pfahls berechenbare Grenzspannung darstellt.

Die Aufgabe besteht jedoch in der genauen Bestimmung der Werte $e_{rc}$ und $l$. Wie einleitend erwähnt, kann $e_{rc}$, also die elastische Verformung des Pfahls nicht direkt gemessen werden, weil nach dem Verfahren der Fig. 2 im Wert $e_r$ auch die elastische Verformung des Bodens $e_{rt}$ enthalten ist. Näherungswerte für $e_{rt}$ kann man aus verschiedenen Vorschriften und aus den Tabellen von Hiley entnehmen. Die Tabellen des Civ. Eng. Code of Practice Nr. 4, «Foundations», schreiben für die Art des Einrammens folgende Werte vor:

| Elast. Zusammendrückung des Bodens mm | Durchschnittspannung im Pfahl kg/cm² | | | |
|---|---|---|---|---|
| | leichtes Rammen 35 | mittleres Rammen 70 | schweres Rammen 105 | sehr schweres Rammen 140 |
| $e_{rt}$ | 0,13 | 0,25—0,50 | 0,38—0,64 | 0,13—0,38 |

Die große Streuung der Werte zeigt ihren annähernden Charakter.

Hinsichtlich der aktiven Länge des Pfahls bekommt man gleichfalls Näherungswerte; es ist nämlich klar, daß die Reibung des Bodens die freie Formänderung um so mehr behindert, je tiefer der Pfahl eindringt. Der Wert wird also immer kleiner sein als die gesamte Pfahllänge und wird den kleinsten Wert bei der größten Einrammtiefe annehmen. Nach Untersuchungen von Schenck und Fröhlich ändert sich die Längenabnahme zwischen der halben und der viertel Pfahllänge.

Das hier vorgeschlagene Verfahren eignet sich zur Vermeidung der oben

erwähnten Unsicherheiten und zur genaueren Bestimmung der elastischen Zusammendrückungen des Bodens und der aktiven Pfahllänge durch Messungen an den Arbeitsstellen.

Die elastischen Zusammendrückungen des Pfahles und des Bodens können voneinander getrennt werden, wenn die Summe der genannten elastischen Zusammendrückungen während des Einrammens über der Bodenoberfläche gleichzeitig an zwei verschiedenen Stellen gemessen wird (Fig. 3). Werden die gemessenen Werte $e_r'$ und $e_r''$, der Meßstellenentfernung entsprechend, bei den Längen $l_1$ und $l_2$ aufgetragen, so bekommt man zwei für die Verformung kennzeichnende Punkte. Die diese Punkte verbindende Gerade schneidet an der Ordinatenachse den Wert $e_{rt}$ aus, der die elastische Verformung des Bodens bezeichnet.

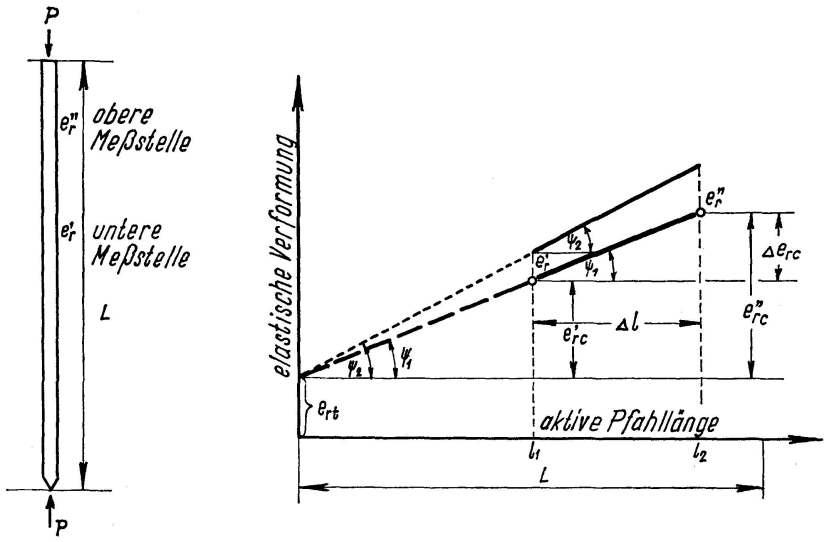


Fig. 3.

Für die Größe dieses Schnittpunktwertes ist es nicht gleichgültig, wie die Entfernungen $l_1$ und $l_2$ bestimmt werden. Für die hier angegebenen Berechnungen genügt es aber, wenn man mit dem Wert $\Delta l = l_1 - l_2$ arbeitet, weil die im Pfahl auftretende Durchschnittsspannung durch die Gleichung

$$\sigma = \frac{e_r'' - e_r'}{\Delta l} E$$

direkt berechnet werden kann. (Die tatsächliche Bestimmung der elastischen Zusammendrückung des Bodens kann somit umgangen werden.)

In der Tat kann man jedoch die Längenveränderung $e_r'' - e_r'$ nur mit sehr empfindlichen elektrischen Dehnungsmeßstreifen feststellen, und auch dann ist eine gewisse Meßlänge $\Delta l$ erforderlich, die am Ende des Rammvorganges — also eben dann, wenn die größten Rammwiderstände und damit auch die größten Rammbeanspruchungen zu erwarten sind — schon praktisch nicht mehr zur Verfügung steht.

Jedoch kann ein Kontrollverfahren auch mit einer einzigen Meßstelle entwickelt werden, das sich auf folgende theoretische Überlegungen stützt:

Mit der Annahme der Gültigkeit des Hookeschen und des Superpositions-Gesetzes ergibt sich die elastische Federung eines Pfahles mit quadratförmigem Querschnitt (Seitenlänge: $a$) unter einem Rammschlag zu

$$e_r = e_{rc} + e_{rt} = \frac{l\,P}{E\,a^2} + \frac{P\,a}{2\,a^2\,E_s},$$

wobei das zweite Glied nach Kögler die Zusammendrückung des homogenen Bodens mit großer Schichtmächtigkeit unter einer Quadratfläche angibt (vgl. K. SZÉCHY: Der Grundbau, I. Band, S. 318).

Dies wird zu

$$e_r = \frac{P}{a}\left(\frac{l}{E\,a} + \frac{1}{2\,E_s}\right), \tag{6}$$

worin $E$ die Elastizitätszahl des Betons und $E_s$ die Steifezahl des Bodens bezeichnet.

Wenn man jetzt für $P$, d. h. für die dynamische Pfahlkraft den in Gl. (2) angegebenen Wert einsetzt, bekommt man

$$e_r = \frac{\beta\,Q\,h}{(e_m + e_r/2)\,a}\left(\frac{l}{E\,a} + \frac{1}{2\,E_s}\right) \tag{7}$$

und unter Berücksichtigung, daß im kritischen Fall die bleibende Setzung $e_m \to 0$ wird, erhält man daraus

$$e_r^2 = \frac{2\,\beta\,Q\,h}{a}\left(\frac{l}{E\,a} + \frac{1}{2\,E_s}\right). \tag{8}$$

Betrachtend, daß $e_r$ der durchschnittlichen Pfahlspannung $\sigma$ verhältnisgleich angenommen werden darf, beweist Gl. (8) auch theoretisch die schon von Glanville festgestellte Beobachtung, daß die Rammspannungen mit der Quadratwurzel der Fallhöhe $h$ zunehmen.

Man kann ferner von dem in Klammern stehenden Ausdruck mit der richtigen Annahme der Werte $l$, $\beta$ und $E_s$ auch auf die betreffenden Anteile $e_{rc}$ und $e_{rt}$ des gemessenen $e_r$-Wertes schließen. Die Annahme dieser Werte kann jedoch durch schrittweise Annäherung erleichtert werden, wenn man die Fallhöhen $h$ verändert und die entsprechenden $e_r$-Werte mißt. Z. B. mit drei verschiedenen $h$-Werten $h_1$, $h_2$ und $h_3$ erhalten wir drei voneinander unabhängige Werte $e_{r1}$, $e_{r2}$ und $e_{r3}$, die in die von der Grundgleichung (8) erhältlichen folgenden Gleichungen (9) bis (11) einsetzend, dürfen die $l$-, $\beta$- und $E_s$-Werte folgenderweise bestimmt werden:

$$l = \left(\frac{a\,e_{r1}^2}{2\,\beta\,Q\,h_1} - \frac{1}{2\,E_s}\right) E\,a\,, \tag{9}$$

$$\beta = \frac{a\,e_{r2}^2}{2\,Q\,h_2}\,\frac{1}{\dfrac{l}{E\,a} + \dfrac{1}{2\,E_s}}\,, \tag{10}$$

$$E_s = \frac{\beta\,Q\,h_3\,E\,a}{E\,a^2\,e_{r3}^2 - 2\,\beta\,Q\,h_3\,l}\,. \tag{11}$$

Als Ausgangswert darf $\beta$ mit 0,1, $l$ mit $^3/_4 l$ und $E_s$ mit 10 000 kg/cm² angenommen werden. Durch wiederholtes Probieren und Durchrechnung gelangen wir dann auf die richtigen $\beta$-, $l$- und $E_s$-Werte. Diese sollen dann in Gl. (8) eingesetzt werden, von der die elastische Verformung des Pfahles sich als

$$e_{rt} = \sqrt{\frac{2\,\beta\,Q\,h\,l}{E\,a^2}}$$

und die des Bodens als

$$e_{rt} = \sqrt{\frac{\beta\,Q\,h}{a\,E_s}}$$

ergibt bzw. sich im Verhältnis dieser zwei Ausdrücke vom gemessenen Gesamtwert $e_r$ trennen läßt.

Mit dem damit bestimmten Werte von $e_{rc}$ und $l$ ist jetzt aus Gl. (5) auch die durchschnittliche Rammspannung im Pfahlschaft erhältlich. Wird der Wert $\sigma$ in Abhängigkeit von der Eindringung des Pfahls aufgetragen, so bekommt man eine Kurve, die das Anwachsen der Spannungen $\sigma$ kennzeichnet. Mit Hilfe der Querschnittabmessungen und der Bewehrung erhält man die die Tragfähigkeit des Querschnittes kennzeichnende Grenzspannung, wodurch man gleichfalls die Tiefe bestimmen kann, in welcher man mit der Zerstörung des Pfahls rechnen muß. Weil die Spannungen $\sigma$ aus den während des Einrammens tatsächlich auftretenden Verformungen bestimmt wurden, enthalten sie auch die dynamischen Wirkungen. Die Verteilung dieser Spannungen ist jedoch in Richtung der Pfahllänge nicht gleichmäßig, sondern im Kopf größer als in der Pfahlschaft.

Für die Berechnung der im Pfahlkopf auftretenden höheren Spannungen möge das Annäherungsverfahren angewendet werden, das auf Seite 73 des englischen Civil Engineering Code of Practice, Nr. 4, «Foundations», angegeben ist, falls man den Wert $\sigma$ mit dem Vergrößerungsfaktor $\eta$ multipliziert. Dessen Wert errechnet sich zu

$$\eta = \frac{2}{\sqrt{\dfrac{Q + k^2\,q}{Q + q}}} - 1\,.$$

Der unter dem Wurzelzeichen befindliche Ausdruck (der zweite Faktor der Hileyschen Formel) drückt die elastischen Stoßverluste aus. Es ist klar, daß

diese Energie die im Pfahlkopf auftretenden Spannungen vergrößert. (Der Stoßfaktor $k$ darf zwischen 0,25—0,40 angenommen werden.)

Die Kontrolle der Pfahlabmessungen und der Beanspruchungen kann jetzt mit Hilfe des Ausdruckes

$$\sigma_H \leqq \eta \sigma$$

durchgeführt werden.

Wird also die Kurve $\sigma$ obigem entsprechend aufgetragen, so bekommt man mit dem Schnittpunkt $\sigma_H/\eta = \sigma$ die Eindringungstiefe, über welcher mit der Zerstörung des Pfahls gerechnet werden muß (Fig. 4).

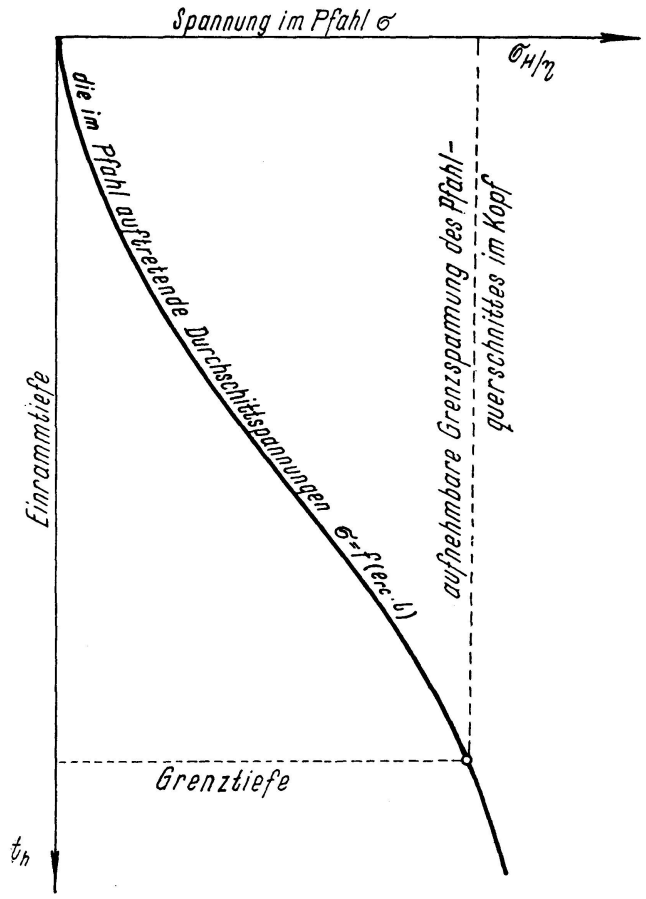


Fig. 4.

## Zusammenfassung

Die elastische Verformung eines Rammpfahles kann durch gleichzeitiges Messen an zwei Stellen des Pfahles in die Komponente des Bodens und jene des Pfahles aufgeteilt werden. Aus letzterer berechnen sich die auftretenden Rammspannungen. Der Vergleich mit den vom Pfahlquerschnitt tragbaren Grenzspannungen bestimmt die Rammtiefe, bei welcher die Zerstörung des Pfahles beginnt.

**Summary**

By simultaneous measurement in two places, it is possible to distribute the elastic deflection of a driven pile between two components — that of the soil and that of the pile itself. From the latter the stresses due to the pile-driving can be estimated. By comparing these stresses with those which the pile is capable of supporting in the limiting case, the hold of the pile corresponding to the commencement of its destruction can be determined.

**Résumé**

Par une mesure simultanée en deux endroits, on peut répartir la déformation élastique d'un pieu battu en deux composantes, celle du terrain et celle du pieu proprement dit. Cette dernière permet de déduire les contraintes dues au battage. En comparant ces contraintes à celles que le pieu peut supporter à la limite, on détermine la fiche du pieu correspondant au début de sa destruction.

Leere Seite
Blank page
Page vide