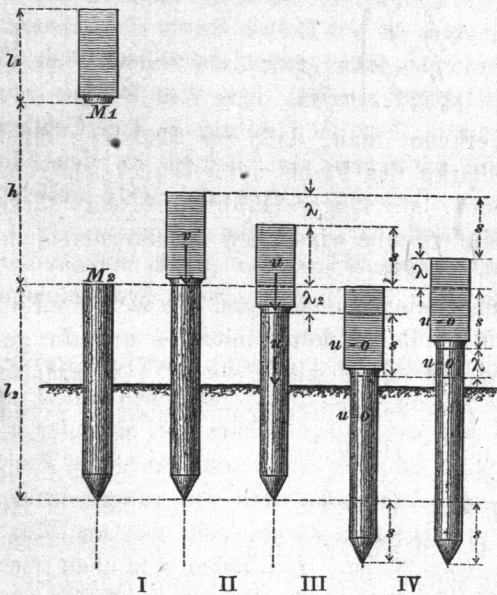


und damit ein dichtes Schließen zu erreichen, während hinten Verankerungen zur Verhinderung seitlicher Schwankungen dienen; hier befindet sich auch ein Flaschenzug, um beim Einsetzen einer neuen Bohle das Rammgerüst mit dem Apparat zurückziehen zu können.

**B. Theoretische Erörterungen.**

**§ 5. Wirkung der Rammen und Tragfähigkeit der Pfähle.** Beim Aufschlagen des Rammklotzes auf den Pfahlkopf wird zunächst eine Kompression beider Körper eintreten und das Eindringen des Pfahls erst dann beginnen, wenn die Kompression einen dem Rammwiderstande  $P$  entsprechenden Druck erzeugt hat. Von diesem Augenblicke an wird eine Geschwindigkeitszunahme für den Pfahl eintreten, während die Geschwindigkeit des Rammklotzes noch weiter abnimmt, so lange bis das Maximum der Kompression eintritt, wo beide Körper gleiche Geschwindigkeit angenommen haben. Da der Rammklotz und der Pfahl beide als elastische Körper anzusehen sind, so wird während des weiteren Eindringens eine Wiederausdehnung beider Körper eintreten, bis die Kompressionskraft wieder auf den Wert  $P$  zurückgegangen ist. Die Kompression hört erst vollständig auf, wenn die Geschwindigkeit beider Körper  $= 0$  geworden, also ein weiteres Eindringen des Pfahls nicht mehr stattfindet.

Fig. 5.



Diesen Betrachtungen entsprechend kann man während eines Schlages vier Perioden, vergl. nebenstehende Figur, unterscheiden.

- I. Fallen des Rammklotzes bis zur Berührung mit dem Pfahlkopfe.
- II. Kompression des Rammklotzes und des Pfahls bis zum Beginn des Eindringens des letzteren.
- III. Eindringen des Pfahls.
- IV. Rückgang des Rammklotzes und des Pfahls aus der Kompression.

Die Größe der Kompression ist abhängig von der Härte der Körper und zwar ist, wenn  $H_1$  die Härte des Rammklotzes und  $H_2$  die Härte des Pfahls bezeichnet, die Kompression des ersteren:  $\lambda_1 = \frac{P}{H_1}$  und die Kompression des letzteren:

$\lambda_2 = \frac{P}{H_2}$ , also die ganze Kompression:  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = P \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right)$  und die zu diesem Zusammendrücken erforderliche Arbeit:

$$L = \frac{P \lambda}{2} = \frac{P^2}{2} \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right), \dots \dots \dots 1.$$

wobei der Rammwiderstand nur an der Spitze des Pfahls wirkend gedacht und die Reibung an dem Umfange unberücksichtigt geblieben ist.

Ist  $v$  die Geschwindigkeit des Rammklotzes im Momente des Aufschlages und  $u$  die Geschwindigkeit desselben beim Beginn des Eindringens des Pfahls, so muß bis

dahin eine Arbeit verrichtet sein, welche einer lebendigen Kraft von  $M_1 \left( \frac{v^2 - u^2}{2} \right)$  entspricht, es gilt also die Gleichung:

$$L = \frac{P^2}{2} \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) = M_1 \cdot \left( \frac{v^2 - u^2}{2} \right) \dots \dots \dots 1^a$$

oder es muß

$$u = \sqrt{v^2 - \frac{P^2}{M_1} \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right)} \dots \dots \dots 2.$$

sein. Eindringen des Pfahls ist also nur möglich, wenn der Ausdruck unter dem Wurzelzeichen positiv ist, also wenn

$$M_1 v^2 > P^2 \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) \dots \dots \dots 3.$$

oder da  $v = \sqrt{2gh}$  und  $M_1 = \frac{G_1}{g}$ , so ergibt sich als Bedingung für die Möglichkeit des Eindringens, daß

$$\left. \begin{aligned} h &> \frac{P^2}{2G_1} \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) \\ G_1 &> \frac{P^2}{2h} \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 4.$$

sein muß, wobei  $G_1$  oder  $h$  um so kleiner sein können, je größer die Härte des Holzes ist.

Bezeichnen  $F_1$  den Querschnitt des Rammklotzes und  $F_2$  denjenigen des Pfahls, ferner  $E_1$  und  $E_2$  die bezüglichen Elasticitätsmodul, so ist  $H_1 = \frac{F_1 E_1}{l_1}$  und  $H_2 = \frac{F_2 E_2}{l_2}$ , demnach:

$$\left. \begin{aligned} h &> \frac{P^2}{2G_1} \left( \frac{l_1}{F_1 E_1} + \frac{l_2}{F_2 E_2} \right) \\ G_1 &> \frac{P^2}{2h} \left( \frac{l_1}{F_1 E_1} + \frac{l_2}{F_2 E_2} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 4^a.$$

Aus diesen Bedingungsgleichungen erkennt man, daß zur Erzielung einer günstigen Wirkung der Rammmaschine die Stärke des Pfahls unter Berücksichtigung der Elasticität des Holzes zu wählen ist und daß längere Pfähle größere Stärke erhalten müssen als kürzere, selbst wenn die zu überwindenden Rammwiderstände für beide gleich groß sind.

In dem Augenblicke, wo der Pfahl um  $s$  eingedrungen und ein weiteres Eindringen nicht mehr stattfindet, ist die Arbeit des Rammklotzes mit  $G_1 h$  und die gemeinschaftliche Arbeit des Rammklotzes und des Pfahls mit  $(G_1 + G_2) s$  verbraucht durch die Arbeit  $\left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) \frac{P^2}{2}$  zur Kompression beider Körper und durch die Arbeit  $P s$  zum Eintreiben des Pfahls; es muß demnach stattfinden:

$$G_1 h + (G_1 + G_2) s = \frac{P^2}{2} \left( \frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2} \right) + P s$$

oder da  $(G_1 + G_2) s$  als sehr klein vernachlässigt werden kann:

$$P = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \left\{ \sqrt{2 \frac{H_1 + H_2}{H_1 H_2} G_1 h + s^2} - s \right\} \dots \dots \dots 5.$$

Der Rammklotz wird ausnahmslos aus sehr hartem Material gefertigt und die Länge desselben ist verhältnismäßig gering; man kann daher die Zusammendrückung desselben unberücksichtigt lassen und erhält:

$$\left. \begin{aligned} P &= H_2 \left\{ \sqrt{\frac{2 G_1 h}{H_2} + s^2} - s \right\} \\ P &= \frac{F_2 E_2}{l_2} \left\{ \sqrt{\frac{2 G_1 h l_2}{F_2 E_2} + s^2} - s \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 5^a.$$

Dieser Wert von  $P$  giebt die Tragfähigkeit eines Pfahles an, der bei dem letzten Schlage noch um  $s$  eingedrungen ist.

Durch Umformung kann man diesen für  $P$  gefundenen Ausdruck auf die Form

$$P = \sqrt{2 G_1 h \frac{F_2 E_2}{l_2} + \left( \frac{F_2 E_2 \cdot s}{l_2} \right)^2} - \frac{F_2 E_2 \cdot s}{l_2} \dots \dots \dots 6.$$

bringen, welche Formel von Weisbach aufgestellt wurde.<sup>15)</sup>

Redtenbacher giebt in seinen Resultaten für den Maschinenbau (1875. S. 329) für das Tragvermögen  $P$  von eingerammten Pfählen folgende Formeln:

$$P = F_2 \left\{ - \frac{s E_2}{l_2} + \left( G_1 + \frac{1}{2} G_2 \right) \frac{1}{F_2} + \sqrt{\frac{2 E_2}{F_2 l_2} \left[ \frac{G_1^2}{G_1 + G_2} h + (G_1 + G_2) s \right] + \left[ \frac{s E_2}{l_2} - \left( G_1 + \frac{1}{2} G_2 \right) \frac{1}{F_2} \right]^2} \right\}, \dots \dots \dots 7.$$

wenn der Pfahl beim letzten Schlage noch um  $s$  gezogen hat, und

$$P = \left( G_1 + \frac{1}{2} G_2 \right) + F_2 \sqrt{\frac{3 E_2}{F_2 l_2} \left( \frac{G_1^2}{G_1 + G_2} \right) h + \frac{1}{F_2^2} \left( G_1 + \frac{1}{2} G_2 \right)}, \dots \dots \dots 8.$$

wenn der Pfahl beim letzten Schlage nicht tiefer eingedrungen, also  $s = 0$  ist.

Für den letzteren Fall giebt Redtenbacher als zweckmäßiges Verhältnis zwischen dem Gewicht des Pfahls und dem des Rammklotzes:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{P^2}{4 E_2 F_2^2 \gamma_2 h} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{8 F_2 E_2 G_2 h}{l_2 P^2}} \right\}, \dots \dots \dots 9.$$

worin  $\gamma_2$  das Gewicht pro 1 cem Holz bedeutet.

Nach Rankine (Engng. 1878 II. S. 141.) gilt für die Tragfähigkeit eines Pfahls die Formel:

$$P = \sqrt{\frac{4 F_2 E_2 G_1 h}{l_2} + \frac{4 F_2^2 E_2^2 s^2}{l_2^2}} - \frac{2 F_2 E_2 s}{l_2} \dots \dots \dots 10.$$

Alle diese Formeln, die allerdings auf korrekten wissenschaftlichen Untersuchungen beruhen, dürfen jedoch nicht als für alle Fälle praktisch verwendbar angesehen werden, da man über viele der in Rechnung kommenden Faktoren nur ungenügende Kenntnis besitzt. Es ist unbeachtet geblieben, daß wegen der Reibung an den Läuferhaken die Fallgeschwindigkeit nicht entsprechend der Fallhöhe zunimmt und daß der Rammwiderstand nicht bloß an der Spitze des Pfahls wirkt, sondern unter Umständen sogar die Reibung am Umfange des Pfahls hauptsächlich den Rammwiderstand ausmachen kann und auf die Art der Kompression von wesentlichem Einflusse ist, da je größer die Reibung desto mehr die relative Zusammenrückung von dem oberen Teile des Pfahls nach dem unteren zu allmählich abnehmen wird. Welchen erheblichen Einflusse die Reibung an dem Umfang auf die Größe des Rammwiderstands hat, geht daraus hervor, daß die zum Ausziehen aufzuwendende Kraft das Gewicht der Pfähle je nach der Bodenart mehr oder minder, aber stets erheblich überschreitet. Als eine wesentliche Ungenauigkeit ist auch zu beachten, daß die bekannten Elasticitätsmodelle durch einfache Experimente nach der Härte des Materials durch Druck bestimmt sind, während der Schlag selbst bei derselben Kraftäußerung ganz anders und zwar zerstörender auf das Holz einwirkt als ein allmählich eintretender Druck. Es kommt noch hinzu, daß die

<sup>15)</sup> Nach Versuchen bei den Bauten der Berliner Stadteisenbahn hat sich ergeben, daß diese Weisbach'sche Formel sehr brauchbare Resultate giebt. Siehe Zeitschr. f. Bauw. 1880, S. 270.

Elasticitätsmodell nur an verhältnismäßig dünnen Stäben ermittelt, also die Ungleichmäßigkeiten des Holzes, welche in ein und demselben Stamme vorkommen, nicht genügend berücksichtigt wurden.

Die angegebenen Formeln haben praktisch nur den Wert, daß sie bei Projektierungen Anhaltspunkte bieten, die den Bauenden in den Stand setzen, zur Lösung der Aufgabe von vorn herein annähernd die richtigen Mittel zu ergreifen. Durch die Ermittlung der vorteilhaftesten Dimensionen der Pfähle, des zweckmäßigsten Längenmaßes und der günstigsten Fallhöhe wird die Wahl der Rammmaschine erleichtert, wobei zu berücksichtigen ist, daß schwere Rammklötze zur Überwindung der Rammwiderstände am günstigsten wirken, doch kommen auch die Aufstellungs- und Umstellungskosten, sowie die Art und der Ort der Aufstellung als wesentlich mit in Betracht.

Da die obigen Formeln für den praktischen Gebrauch unbequem sind und aus den angegebenen Gründen doch niemals genaue Resultate ergeben können, so liegt es nahe, einfachere Formeln zu bilden, was besonders dadurch erreicht werden kann, daß bei deren Entwicklung die Elasticität unberücksichtigt bleibt, wie dieses im Nachstehenden geschehen möge.

Nach bekannten Gesetzen verhält sich beim Zusammenstoß zweier Körper die erteilte Beschleunigung für den einen Körper zu der bewirkten Verzögerung des anderen umgekehrt wie die Massen der Körper. Ist also die Geschwindigkeit, womit der Rammklotz den ruhenden Pfahl trifft =  $v$  und die nach erfolgter Kompression von beiden Körpern angenommene gemeinschaftliche Geschwindigkeit =  $u$ , so muß stattfinden:

$$\frac{u - 0}{v - u} = \frac{M_1}{M_2} \quad \text{oder}$$

$$u = \frac{M_1 v}{M_1 + M_2} = v \cdot \left( \frac{M_1}{M_1 + M_2} \right) \quad \dots \dots \dots 11.$$

Mit einer dieser gemeinschaftlichen Geschwindigkeit entsprechenden lebendigen Kraft  $\frac{M_1 + M_2}{2} u^2$  sind beide Körper zur Überwindung des Rammwiderstands behaftet. Setzt man hierin für  $u$  den gefundenen Wert ein, so erhält man für diese lebendige Kraft den Ausdruck:

$$L = \frac{M_1 v^2}{2} \cdot \left( \frac{M_1}{M_1 + M_2} \right), \quad \dots \dots \dots 12.$$

worin  $\frac{M_1}{M_1 + M_2}$  denjenigen Bruchteil angiebt, welcher von der ursprünglichen lebendigen Kraft des Rammklotzes zur Überwindung des Rammwiderstands übrig bleibt, während der verloren gegangene Teil auf das Hervorbringen von Formveränderungen und auf das Erzeugen von Schall- und Wärme-Schwingungen verwendet wird. Der angegebene Wert für  $L$  geht, wenn man statt der Massen die Gewichte und statt der Geschwindigkeit  $v$  die Geschwindigkeitshöhe einführt, über in

$$L = G_1 h \cdot \left( \frac{G_1}{G_1 + G_2} \right) \quad \dots \dots \dots 12^a.$$

Zu dieser mechanischen Arbeit kommt noch die von dem Gewicht des Rammklotzes und des Pfahls beim Eindringen ausgeübte mechanische Arbeit  $(G_1 + G_2) s$  hinzu, welche zusammen den Rammwiderstand  $P s$  überwinden, es gilt also:

$$P s = G_1 h \cdot \left( \frac{G_1}{G_1 + G_2} \right) + (G_1 + G_2) s$$

oder

$$P = \frac{h}{s} \cdot \frac{G_1^2}{G_1 + G_2} + (G_1 + G_2) \quad \dots \dots \dots 13.$$

Da hierin  $G_1 + G_2$  bei schwereren Rammarbeiten im Verhältnis zu dem Rammwiderstande sehr gering ist, so kann man

$$P = \frac{h}{s} \frac{G_1^2}{G_1 + G_2} \dots \dots \dots 13^a.$$

setzen, welche Formel sich noch auf

$$P = \frac{h}{s} G_1 \dots \dots \dots 13^b.$$

vereinfacht, wenn das Gewicht des Bären im Verhältnis zu dem des Pfahls sehr groß ist.

Auf weitere theoretische Betrachtungen über das Rammen und namentlich über die Tragfähigkeit der Pfähle, sowie auf eine Vorführung und Erörterung der praktischen Erfahrungen einzugehen, muß verzichtet werden, da mit vorliegender Arbeit hauptsächlich die beim Rammen und bei den dazu gehörigen Nebenarbeiten in Frage kommenden Maschinen vorzuführen sind.

**§ 6. Verminderung des Rammwiderstands.** Handelt es sich nicht nur darum, Pfähle so weit einzutreiben, bis sie eine gewisse Tragfähigkeit erreicht haben, sondern müssen dieselben aus irgend welchen Gründen tiefer eingerammt werden, als es für die dauernde Belastung derselben erforderlich ist, so sind Mittel zu suchen, welche das Eindringen der Pfähle durch Verminderung der sich entgegenstellenden Hindernisse erleichtern. Vor allem sind Form und Größe des Querschnitts der Pfähle, die Gestaltung der Pfahlspitzen und die Beschaffenheit des Bodens von großem Einfluss auf die für das Eintreiben der Pfähle erforderliche Kraft. Unter sonst gleichen Umständen finden zwar dünne Pfähle geringeren Widerstand als solche von größerem Querschnitt, doch ist zu beachten, daß erstere beim Rammen sich eher seitlich ausbiegen, wodurch wesentliche Effektverluste entstehen oder gar das Zerknicken des Pfahls herbeigeführt wird. Für das Eindringen des Pfahls ist der Kreisquerschnitt am günstigsten, weil derselbe relativ den kleinsten Umfang hat und damit die geringste Reibungsfläche bietet.

Der für das Eindringen des Pfahls erforderliche Raum wird durch Verschiebung der Bodenteilchen gewonnen, wobei eine Kompression des unter dem Pfahle liegenden und des denselben umgebenden Erdreichs stattfindet. Die als Keil wirkende Pfahlspitze soll, soweit dies mit Rücksicht auf die Festigkeit derselben zulässig ist, thunlichst schlank genommen werden, um vermöge günstigerer Keilwirkung mit geringster Kraft die seitliche Verschiebung der Bodenteilchen zu bewirken. Würde man den Pfahl unten stumpf abschneiden, so würde zunächst nur Kompression der unterhalb des Pfahls anstehenden Erdmasse eintreten, infolge dessen die komprimierten Bodenteilchen durch seitliches Ausweichen sich Platz zu verschaffen suchen und weiterhin auch das umgebende Erdreich komprimieren würden. Diese indirekte Verschiebung des Bodens ist wesentlich ungünstiger, als wenn die Pfahlspitze den größten Teil desselben direkt seitwärts schiebt und daher die Kompression unter dem Pfahle nur in geringem Maße erfolgt. Beim Eindringen des Pfahls müssen die verdrängten Bodenteilchen an der Pfahlspitze entlang gleiten, was selbstverständlich am leichtesten geschieht, wenn die Flächen derselben glatt und hart sind.

Außer an der Pfahlspitze findet auch, wie bereits erwähnt, an der ganzen Oberfläche des Pfahls ein Reibungswiderstand statt; es ist daher mit Rücksicht auf leichtes Eindringen eine möglichst glatte Oberfläche der Pfähle erwünscht.

Die Größe des Reibungswiderstands an der Pfahloberfläche ist übrigens auch wesentlich abhängig von der Zeitfolge der Schläge, denn durch das Aufschlagen des

Rammklotzes wird teils wegen der nie genau centriscb erfolgenden Schläge, teils wegen der Elasticität des Materials der Pfahl in Vibration gesetzt und thatsächlich eine gröfsere Höhlung gebildet, als das Volumen des Pfahls beansprucht; erst nach einer gewissen Zeitdauer werden die umliegenden Bodenteilchen sich fest an die Pfahloberfläche wieder anlegen. Erfolgt nun der nächste Schlag, bevor diese Anlagerung eingetreten, so ist offenbar der Reibungswiderstand geringer. Also je mehr der Boden das Bestreben hat, sich horizontal auszugleichen d. h. je kleiner der Böschungswinkel ist, desto mehr wird man auf eine rasche Zeitfolge der Schläge Bedacht zu nehmen haben, z. B. bei nassem Sand, während bei festem Thon kein wesentlicher Nutzen dadurch erzielt wird.

Die rasche Aufeinanderfolge der Schläge kann übrigens auch ungünstig wirken, denn mit jedem Schlage nimmt der Pfahl vermöge seiner Elasticität eine gekrümmte Form an; erfolgt nun der nächste Schlag, bevor der Pfahl sich wieder gerade gerichtet hat, so wird er sehr ungünstig in Anspruch genommen und kann ein Zerknicken erfolgen. Bei der Wahl der Zeitfolge der Schläge ist also die Beschaffenheit des Materials, sowie die Form und Gröfse des Querschnitts des einzurammenden Pfahls in Erwägung zu ziehen.

Das Eindringen der Pfähle erfolgt mit um so geringerer Kraft, je leichter sich die einzelnen Bodenteilchen gegen einander verschieben, je weniger Zusammenhang zwischen ihnen besteht. Es ist daher unter geeigneten Verhältnissen vorteilhaft, dem Boden möglichst nahe der Spitze des Pfahls Wasser zuzuföhren, indem dadurch die vorhandenen Bindemittel der Bodenteilchen sich mehr oder weniger auflösen, eine leichtere Verschiebbarkeit derselben eintritt und die Reibung zwischen Boden und Pfahl vermindert wird. Man kann sogar mit geeigneten Vorkehrungen auch durch den Druck oder die Stofswirkung des Wasserstrahls die unter und um den Pfahl liegenden Bodenteilchen so vollständig beseitigen, dafs der Pfahl durch sein eigenes Gewicht oder mit nur geringer Belastung eindringt.

Bei allen Rammarbeiten kommt es darauf an, den Nutzeffekt, das ist die nützlich geleistete Rammarbeit im Verhältnis zur aufgewendeten motorischen Arbeit, möglichst günstig zu erhalten; dazu können vorstehende Betrachtungen wohl einen Anhalt gewähren, allgemeine Formeln zur Bestimmung des Rammklotzgewichtes, der Fallhöhe und der Zeitfolge der Schläge, welche erforderlich sind, um einen Pfahl bis zu einer gewissen Tiefe einzutreiben, lassen sich jedoch nicht angeben. Man wird daher in jedem einzelnen Falle diese Ermittlungen nach Erfahrungsergebnissen vornehmen müssen, über welche, soweit dies nicht bereits in Bd. 1, Kap. VII, des Handbuchs geschehen ist, im weiteren Verlaufe dieses Kapitels Mitteilungen gemacht werden sollen.

## C. Konstruktion, Betrieb und Leistung der Rammen.

### 1. Handrammen.

**§ 7. Hammer oder Schlegel.** Die einfachste Methode des Eintreibens kleiner Pfähle ist die mittels eines Hammers oder Schlegels, der zweckmäfsig aus Eichen- oder Buchenholz gefertigt wird. Das Gewicht darf in der Regel 12 kg nicht überschreiten, wobei der Hammerklotz etwa 0,3 m hoch und 0,2 m im Durchmesser oder im Quadrat stark genommen wird. Die Axe des 0,9 bis 1 m langen Stiels mufs genau durch den Schwerpunkt des Hammerklotzes gehen, weil sonst beim Herunter-