

# Neuere Pfahlgründungen

Autor(en): **Schnitter, Gerold**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **79 (1961)**

Heft 2

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-65446>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Neuere Pfahlgründungen

DK 624.154.001

Von Prof. Gerold Schnitter, ETH, Zürich<sup>1)</sup>

### Einleitung

Der Anwendungsbereich von Pfählen ist ausserordentlich vielseitig. Sie dienen in erster Linie zur Gründung von Hoch-, Tief- und Wasserbauten zwecks Uebertragung von Lasten auf tiefer gelegene, tragfähige Bodenschichten (eigentliche Pfahlgründungen). Ausserdem werden sie aber auch verwendet als Zugpfähle zur Verankerung von Spundwandbauwerken, Freileitungsmasten, unter Auftrieb stehenden Bauwerkteilen wie z. B. der Sohle von Schleusenkamern, von Klärbecken, Strassenfahrbahnen usw. Bekannt ist auch ihre Anwendung bei provisorischen Bauten wie Gerüsten, Hilfsbrücken, Baugrubenaussteifungen usw.

Die Bedeutung von Pfahlgründungen hat in den letzten Jahren zugenommen, und zwar vornehmlich aus folgenden drei Gründen: Die auf die Gründung zu übertragenden Bauwerkslasten steigen dank den modernen Grossbauten im Brücken- und Hochbau an. Wie das Wasser, wird auch der gute Baugrund allmählich zur Mangelware. Wirtschaftliche Notwendigkeiten zwingen den Konstrukteur und den Unternehmer zu neuen Lösungen.

Allgemein werden unterschieden: schwebende oder schwimmende und stehende Pfahlgründungen.

### Schwebende Pfahlgründung

Bei ihr wird die Bauwerkslast nicht auf den tiefer gelegenen, tragfähigen Baugrund übertragen, sondern auf wenig tragfähige Schichten in der Hoffnung, eine allgemeine Lastenübertragung auf den Baugrund durch Reibung an den Pfahlschäften zu erzielen. Offenbar verzichtet diese Gründungsart auf das Wesentliche einer Pfahlgründung, welche doch gerade ihren Sinn darin findet, Lasten auf tiefer liegende, tragfähige Schichten abzugeben. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass schwebende Pfahlgründungen in der Vergangenheit zu Misserfolgen geführt haben. Die so gegründeten Bauwerke erlitten Setzungen, die von den Erstellern nicht erwartet wurden. Schwebende Pfahlgründungen sollten deshalb nach Möglichkeit vermieden werden. Ist dies nicht möglich, so ist nachzuweisen, dass auf der Höhe der Pfahlspitzen die dort auftretende Bodenpressung durch die vorhandene Bodenschicht mit genügender Sicherheit aufgenommen werden kann, und dass dabei auftretende Setzungen keine unzulässigen Werte erreichen. Einer schwebenden Pfahlgründung ist in vielen Fällen eine Flachgründung vorzuziehen. Letztere ist dann am Platze, wenn es gelingt, die zusätzliche Belastung des Baugrundes durch das Bauwerk möglichst gering zu halten. Dies kann durch die Erstellung eines oder mehrerer Untergeschosse erreicht werden, bei welchen das Gewicht der ausgehobenen Bodenmassen ungefähr jenem des neu zu erstellenden Bauwerkes entspricht. Es können auch Bodenverbesserungen vorgenommen werden, z. B. durch Verdichtungspfähle, die früher oft angewendet wurden, oder durch den Einsatz neuartiger Rüttler, wie z. B. jener der Firma Keller, Frankfurt a. M.

Die weiteren Betrachtungen beziehen sich nur noch auf stehende Pfahlgründungen.

### Stehende Pfahlgründung

Bei ihr sitzt die Pfahlspitze genügend tief in einer tragfähigen Schicht. Je nach Umständen handelt es sich dabei

<sup>1)</sup> Vortrag, gehalten am 11. November 1960 in Solothurn vor der Schweiz. Gesellschaft für Bodenmechanik und Foundationstechnik. Auch die weiteren Vorträge dieser Tagung werden anschliessend hier veröffentlicht.

um Fels, Moräne, Kiessand, Sand, Silt oder gar um leicht tonige Sande bis Silte. Nach der Herstellung können zwei wichtige Pfahlarten unterschieden werden: Rammpfähle und Bohrpfähle.

### Rammpfähle

Bis vor wenigen Jahren unterschied man Fertigpfähle aus Holz, Stahl oder Eisenbeton und Ortspfähle aus Beton. Letztere wurden nach verschiedenen Verfahren hergestellt. Grundsätzlich unterschieden sich diese Verfahren vornehmlich dadurch, wie das Mantelrohr abgeteufelt, wie die Ausbildung einer Fussverbreiterung (Zwiebel) zur Erhöhung der Pfahlaufstandsfläche bewerkstelligt und wie der Beton eingebracht und verarbeitet wird, ohne dass er mit dem Grundwasser in Berührung kommt. Einzelne dieser Verfahren und die dafür angewandten Geräte haben sich dank den damit gemachten langjährigen Erfahrungen ausserordentlich vervollkommen. Der Durchmesser solcher Pfähle betrug im Maximum etwa 60 cm, die Länge 20÷25 m, die Tragfähigkeit je nach Baugrund rd. 80 bis 120 t.

Bei den gerammten Fertigpfählen beschränkten sich die Abmessungen: Querschnitt und Länge, ebenfalls auf ähnliche Ausmasse. Bei den Fertigpfählen aus Eisenbeton war das Gewicht vor allem durch die Schwierigkeit beim Transport und beim Aufhängen an der Ramme durch die Gefahr der Rissbildung beschränkt. Insbesondere bei Pfählen für Bauten in Meerwasser sind Risse zu vermeiden.

Bei sämtlichen gerammten Pfählen sollte das Gewicht des Pfahles in einem richtigen Verhältnis zum Gewicht des Rammjärens stehen. Nach einer alten Rammeisterregel wurde das Verhältnis des Gewichtes des Rammjärens zum Gewicht des Pfahles möglichst zu 1 oder noch grösser gewählt. Bei den schwereren Pfählen bedingt dies sehr grosse Bärgegewichte oder ein Abweichen von dieser erwähnten Regel. Tatsächlich werden heute Pfähle gerammt, bei welchen das besagte Verhältnis nur noch 0,5 beträgt. Es lässt sich mit Hilfe einer Arbeitsgleichung und der bekannten Gesetze des Stosses nachweisen, dass der Wirkungsgrad des Rammstosses um so höher liegt, je grösser das besagte Verhältnis ist. Gleichermassen lässt sich zeigen, dass bei Einhaltung eines konstanten Produktes Rammjärbärgegewicht  $\times$  Fallhöhe, der Wirkungsgrad besser wird bei grösserem Bärgegewicht und kleinerer Fallhöhe als bei kleinerem Bärgegewicht und grösserer Fallhöhe. Ausserdem wird dabei auch die Beanspruchung des Pfahlkopfes geringer. Schwerere Pfähle werden deshalb mittels Freifall- und Dampfzylinderjären eingerammt und nicht mit Schnellschlaghämmern.

Die neuere Entwicklung geht nun deutlich in Richtung der Verwendung von Pfählen grösseren Querschnittes und grösserer Länge. Der gerammte Pfahl kann diese Entwicklung nur teilweise mitmachen. Möglichkeiten dazu bietet der *Massivpfahl aus Spannbeton*, bei dem die erwähnte Rissgefahr, dank künstlicher Einführung einer Druckkraft durch Vorspannung, weitgehend eliminiert ist, oder der Hohlpfahl, ebenfalls aus Spannbeton und je nach Beanspruchung nachträglich mit Beton ausgefüllt. Dabei muss allerdings der Pfahlbeton, entsprechend seiner höheren Beanspruchung durch Vorspannung und beim Rammen, besonders guter Qualität sein.

Ein Beispiel liefert der zur Gründung einzelner Pfeiler der im Bau begriffenen Brücke über die Bucht von Maracaibo<sup>2)</sup> verwendete und in Bild 1 dargestellte, gerammte

<sup>2)</sup> Siehe Projektbeschreibung in SBZ 1960, H. 42, S. 670.

Hohlpfahl. Die Pfähle wurden dabei, entsprechend der notwendigen Pfahlhöhe, vor dem Rammen aus vorfabrizierten Pfahlstücken von 5,00 m Länge zusammengesetzt. Ihre Abmessungen betragen: Aussendurchmesser 91,5 cm, Innendurchmesser 66,1 cm, Mantelstärke 12,7 cm, Herstellung nach dem Vacuum-Verfahren<sup>3)</sup>. Die Länge variiert zwischen 20 und 60 m entsprechend der Wassertiefe, den Bodenverhältnissen und der aufzunehmenden Last. Zulässige Tragkraft 200 bis 300 t, Untergrund aus siltigem Sand. Betongüte: Pfahlzylinder aus Beton mit einer 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit von 550 kg/cm<sup>2</sup>, Füllbeton mit einer 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit von 300 kg/cm<sup>2</sup>. Bewehrung: Vorspannung Sigma-Stahl 145/160, Querschnittsfläche 14 bis 21 cm<sup>2</sup> zuzüglich einer Spiralarbewehrung aus  $\varnothing$  7 mm, Ganghöhe 8 cm, und einer schwachen Längsbewehrung. Die Pfähle werden senkrecht oder bis höchstens 5:1 geneigt eingerammt. Vor dem Anbringen des Rammpfahles an den Mäkler wird das Fussstück auf etwa 1,40 m Länge mit Beton ausgefüllt, so dass für die Rammung ein unten geschlossener, aber stumpfer Pfahl verwendet wird.

### Bohrpfähle

Bis vor wenigen Jahren wurden die Bohrpfähle durch Abteufen eines Rohres in den Baugrund, Entfernen des Bodenmaterials und Betonieren des dadurch geschaffenen Hohlraumes hergestellt. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich wiederum vornehmlich in der Art und Weise, wie der Beton eingebracht und wie das Wasser vom Bohrloch ferngehalten wird. Bei den Bohrpfählen spielt die Beschaffenheit des Bodens und vor allen Dingen die Lage des Grundwassers eine bedeutende Rolle. Das Wasser sollte vom Bohrloch ferngehalten werden, damit der Beton im Trocknen eingebracht werden kann. Diese Forderung wird leider nicht von allen Bohrpfahlssystemen erfüllt. Ähnlich wie bei den Rammpfählen bemühte man sich, die Tragfähigkeit dadurch zu erhöhen, dass der Pfahlfuss vergrößert wurde. Die verwendeten Durchmesser variierten von 40 bis 60 cm und die Längen waren eher beschränkt. Damit war auch die Tragfähigkeit derartiger Pfähle eher bescheiden — um die 50 bis 60 t. Der Vorteil der Bohrpfähle liegt darin, dass bei ihrer Herstellung geringere Erschütterungen entstehen, weniger Lärm erzeugt wird und kleinere Bauhöhen notwendig sind. Als Nachteil muss erwähnt werden: die Lockerung des Bodens beim Bohren und Herausziehen des Rohres im Gegensatz zur verdichtenden Wirkung beim gerammten Pfahl. Letzteres trifft allerdings nur zu in kohäsionslosen Böden, in bindigen tritt auch beim Rammen keine Verdichtung, sondern eine

<sup>3)</sup> Die innere Rohrleitung hat eine gewellte Oberfläche, um einen guten Verband zwischen dem Füllbeton und dem Pfahlrohr zu sichern.

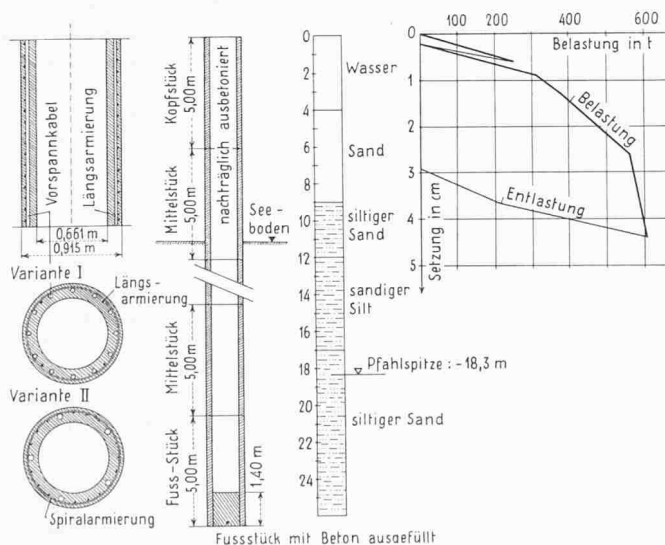


Bild 1. Konstruktion des Rammpfahles  $\varnothing$  0,915 m (beachte stumpfen Pfahlfuss!). Rechts das Belastungs-/Setzungsdiagramm

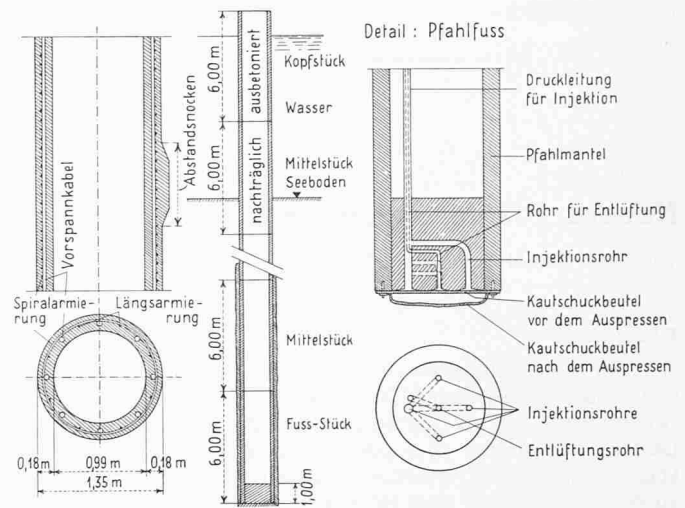


Bild 2. Konstruktion des Bohrpfahles  $\varnothing$  1,35 m (beachte Vorkehrungen für Spitzeninjektion)

Verdrängung des Bodens auf. Aus diesen Gründen sind bei sonst gleichen Bedingungen bei gebohrten Pfählen grössere Setzungen als bei gerammten Pfählen zu erwarten, oder anders ausgedrückt, bei gleichem Querschnitt und gleicher Pfahlhöhe darf die zulässige Tragkraft eines Rammpfahles höher eingesetzt werden als jene eines Bohrpfahles bei gleich gross angenommenen Setzungen, sofern nicht besondere Massnahmen die erwähnte Auflockerung aufheben. Daraus ergibt sich, dass der gebohrte Pfahl im allgemeinen teurer zu stehen kommt als der gerammte Pfahl. Deshalb war das Anwendungsgebiet des gebohrten Pfahles bis vor wenigen Jahren beschränkt auf gewisse Spezialfälle.

Die erwähnte Tendenz, tiefer gründen und grössere Lasten ohne Vermehrung der Pfahlzahl, sogar unter Verminderung derselben, aufnehmen zu können, führte zu dem besagten Bedürfnis, grosskalibrige Pfähle herzustellen. Dabei ist ausserdem auf die Bedeutung der Pfahlkopfplatten hinzuweisen. Bei hohen Säulenlasten und dementsprechend grösserer Pfahlzahl und bei Anwendung der üblichen Pfahltypen würden sich ausnehmend grosse und kostspielige Pfahlkopfplatten ergeben, die bei Verminderung der Pfahlzahl ganz bedeutend kleiner werden können. Dies führte zur Entwicklung von Bohrpfählen grossen Durchmessers, bis 1,50 m, und Belastungen bis 800 t pro Pfahl. Solche Pfähle können ausserdem nun nicht nur axial beansprucht werden, sondern sind fähig, auch Momente zu übertragen<sup>4)</sup>. Früher wurden solche Gründungen als Röhrengründungen bezeichnet, weil sie ähnlich einem Brunnen abgeteuft werden.

Es haben sich auch hierfür in wenigen Jahren verschiedene Verfahren entwickelt. Dabei werden unterschieden:

*Verfahren ohne Verrohrung*, bei welchen die Bohrlochwandung während des Bohrvorganges durch eine Dickspülung (Bentonitsuspension) standfest gehalten wird (z. B. nach Icos-Veder).

*Verfahren mit Verrohrung*, bei welchen ein Bohrrohr mittels einer speziell dafür konstruierten Maschine abgeteuft und der Boden mittels eines Spezialgerätes gelöst und gefördert wird (z. B. Benoto). Wesentliche Unterscheidungsmerkmale liegen im System der Rohrabteufung, in der Gewinnung und Förderung des Bodenmaterials (Meissel, Greifer, Saugpumpe usw.) und im Einbringen des Betons (z. B. Pressbeton-Bohrpfähle System Hochstrasser-Weise).

In den nachfolgenden Referaten werden einzelne dieser Systeme genauer behandelt, weshalb, um Doppelspurigkeiten zu vermeiden, nicht näher darauf eingetreten wird.

<sup>4)</sup> In diesem Fall dient die Vorspannung auch dazu, die aus den Biegemomenten entstehenden Zugspannungen zu kompensieren.

Lediglich als Beispiel einer dem Referenten durch seine Mitarbeit als Experte des Bauherrn im einzelnen bekannten Grossausführung sei auf die *Fundation der Hauptpfeiler* der bereits erwähnten *Brücke von Maracaibo* hingewiesen (Bild 2). Die Totallast eines der Hauptpfeiler beträgt 39000 t, wovon 25700 t auf den Ueberbau einschl. Verkehrslast (825 t) und 13300 t allein auf die Pfahlkopfplatte entfallen. Diese Last sowie die horizontalen Kräfte quer und längs der Brücke, aus Wind usw., werden durch 62 Bohrpfähle auf den Baugrund, bestehend aus Grob- und Feinsand bis Silt, übertragen.

Die Pfahlherstellung geht folgendermassen vor sich: ein stählernes Mantelrohr von 1,50 m Innendurchmesser wird je nach der Wassertiefe (15 bis 20 m) und den Baugrundverhältnissen bis auf eine Tiefe von maximal 54 m unter Wasserspiegel mittels einer Salzgitter-Saugbohranlage abgeteuft. Anschliessend wird in das Bohrloch ein Betonhohlpfahl entsprechender Länge eingefädelt. Dieser wird am Lande aus einzelnen Elementen von 6 m Länge auf einem Montagebett verbunden und zusammengespannt. Die Fugenflächen werden mit einem Kunstharzkleber hoher Druckfestigkeit verklebt. Die Schüsse werden mittels 8 bis 10 Spanngliedern von max. 35 t Spannkraft zusammengespannt. Die Spannbündel bestehen aus 10 Drähten Sigma oval-gerippt, je Draht 40 mm<sup>2</sup> Querschnittsfläche, Stahl 145/16C.

Die einzelnen Rohrschüsse werden stehend nach dem Vakuum-Verfahren hergestellt, wobei wiederum die innere Rohrleitung mit gewellter Oberfläche ausgeführt wird. Der erstklassige Beton besitzt eine 28-Tage-Druckfestigkeit von 550 kg/cm<sup>2</sup>. Er dient als Schutz gegen die stark korrodierende Wirkung des Meerwassers (in der Bucht von Maracaibo werden stählerne Pfähle in kürzester Zeit durch Korrosion zerfressen, so dass die Oelgesellschaften für die Abstützung der Bohrtürme nur mit Betonpfählen arbeiten können). Die Abmessungen des Hohlpfahles betragen: Aussendurchmesser 1,35 m, Innendurchmesser 0,99 m, Wandstärke 18 cm.

Nach dem Versetzen des Pfahles wird dessen unterster Teil ausbetoniert, nachdem man den Fuss mit einem Kautschukbeutel versehen und 4 Injektionskanäle eingebaut hat. Hierauf wird der Pfahl mit Beton der Güteklasse 300 ausbetoniert und das stählerne Mantelrohr gezogen. Gleichzeitig wird dabei der Zwischenraum zwischen diesem und dem Pfahlschaft mit Hilfe von 3 Injektionsrohren mit Zementmörtel injiziert. Die sorgfältige Durchführung dieser Injektionen ist besonders wichtig, da von ihrer Güte die Höhe der Mantelreibung abhängt (Bilder 3 u. 4: beachte unterschiedliche Setzung: Pfähle 1 und 4, wobei beide ohne Spitzeninjektion und Pfahl 4 dazu mit unvollständiger Mantelinjektion ausgeführt wurden).

Nun wird der Pfahlfuss mit Hilfe des Kautschukbeckens ausinjiziert; er legt sich dabei an das ihn umgebende Erdreich satt an. Es hat sich gezeigt, dass durch diese Injektion die Primärsetzung des Pfahles ganz wesentlich kleiner wird (Bild 4: beachte unterschiedliche Setzung der beiden Probepfähle, Pfahl 1 ohne, Pfahl 2 mit Spitzeninjektion). Selbstverständlich darf der Injek-

tionsdruck höchstens so hoch gewählt werden, dass der Pfahl sich gerade zu heben beginnt. Damit besteht die Möglichkeit, sich gegebenenfalls Rechenschaft über die Grösse der Mantelreibung zu verschaffen. Die Belastung pro Einzelpfahl beträgt total 750 t (aus Eigengewicht und Verkehr 625 t) ohne Pfahlgewicht und negative Mantelreibung.

### Spezialfälle

In neuerer Zeit sind auch Pfahltypen entwickelt worden, die insbesondere für Spezialfälle zur Anwendung kommen, z. B. für Zugpfähle bei den eingangs erwähnten Verankerungen. Unter diesen ist auf den MV-Pfahl hinzuweisen.

### Tragfähigkeit einer Pfahlgründung

Bei der Beurteilung der Tragfähigkeit einer Pfahlgründung muss zuerst auf die Tragfähigkeit des Einzel-

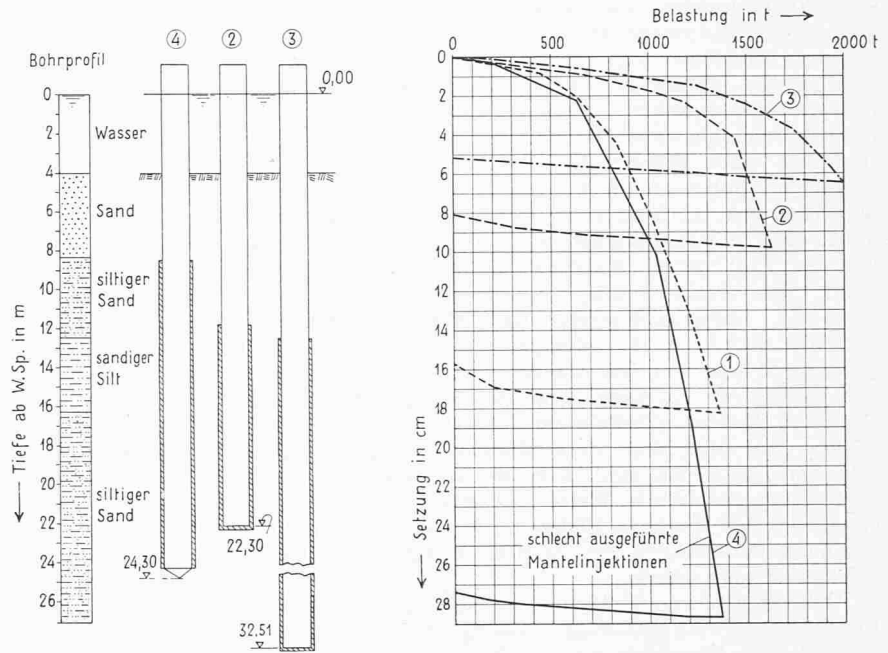


Bild 3. Bohrprofil und Länge der Bohrpfähle 4, 2 und 3 ( $\varnothing$  1,35 m), sowie Belastungs-/Setzungsdiagramme (beachte Einfluss der Mantelinjektion Pfähle 1 und 4, siehe auch Bild 4, und Einfluss der Spitzeninjektion Pfähle 2 und 3 gegenüber 1 und 4)

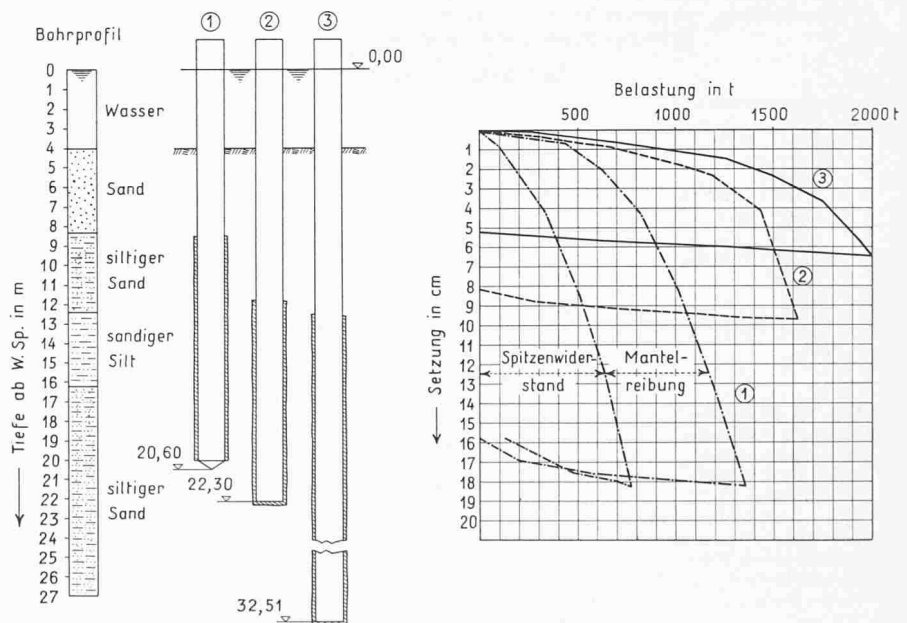


Bild 4. Bohrprofil und Probebohrpfähle 1, 2 und 3 ( $\varnothing$  1,35 m), sowie Belastungs-/Setzungsdiagramme (beachte Verhältnis Spitzenwiderstand zu Mantelreibung mit zunehmender Pfahlbelastung)

pfahles eingegangen werden. Das Zusammenspiel der Kräfte und Formänderungen aus Pfahl und Boden ist äusserst komplex und bis heute ist noch kein befriedigendes Verfahren bekannt, das dieses Zusammenspiel rechnerisch erfasst. Notwendigerweise müssen wesentliche vereinfachende Annahmen getroffen werden, die in einzelnen Fällen zu unrichtigen Schlüssen führen können. Verschiedene Methoden sind bekannt, um die Tragfähigkeit eines Einzelpfahles abzuschätzen.

In einfachen Verhältnissen, bei welchen die Natur des Baugrundes bekannt ist und Vergleiche mit ausgeführten Pfahlgründungen mit hinreichender Genauigkeit gezogen werden können, dürfen *Erfahrungswerte* gute Dienste leisten.

Die *Bodenmechanik* hat sich sehr früh bemüht, durch Versuch und rechnerische Ueberlegungen Methoden zur Abschätzung der Pfahltragfähigkeit zu entwickeln. Auf diese soll im folgenden etwas näher eingegangen werden.

Wir betrachten eine sogenannte Tieffundierung, d. h. eine solche, die einige Meter in den Boden eindringt, was bei einer Pfahlfundierung ja die Regel sein wird, im Gegensatz zu den sogenannten wenig tiefen oder Flachfundationen. Die im einzelnen voneinander abweichenden, in der Literatur erschienenen Formeln zur Berechnung der Tragfähigkeit eines Einzelpfahles lassen sich auf die grundsätzlichen Untersuchungen von Terzaghi, Caquot-Kérisel, Meyerhof usw. zurückführen, welche davon ausgehen, dass die totale Pfahltragfähigkeit aus der Summe der Tragfähigkeit der Pfahlspitze (Spitzenwiderstand) und der Reibung längs des Pfahlmantels (Mantelreibung) gebildet sei (Bild 5). Spitzenwiderstand und Mantelreibung werden getrennt berechnet für körnige, nicht bindige Böden mit grossem Winkel der inneren Reibung und kleiner bis vernachlässigbarer Kohäsion, und für bindige Böden mit im Gegenteil kleinen Winkeln der inneren Reibung und Kohäsion. Im Bild sind diese Zusammenhänge dargestellt. Für körnige Böden sind sich die verschiedenen Autoren über die numerischen Werte der Formeln einigermassen einig; bei den bindigen Böden trifft dies weniger zu, insbesondere hinsichtlich der Mantelreibung. Die Annahmen darüber streuen stark.

Die angegebene Methode gibt zu folgenden kritischen Bemerkungen Veranlassung. Bereits die Annahme, dass die zulässige Tragkraft aus der Summe von Spitzenwiderstand und Mantelreibung, dividiert durch die Sicherheit,

ermittelt werden könne, muss diskutiert werden. Es zeigt sich nämlich, dass dies nicht für jede Belastung  $P$  zutrifft, sondern nur für einen einzigen Fall Gültigkeit besitzt, z. B. für jenen der Grenzbelastung. Der Grund dafür liegt darin, dass das Verhältnis zwischen Spitzenwiderstand und Mantelreibung je nach der aufgetragenen Last ein anderes ist. Bei geringen Belastungen ist meistens die Reibung gross und der Spitzenwiderstand klein. Mit steigender Belastung ändert sich dies; bei der Grenzbelastung ist der Spitzenwiderstand verhältnismässig am grössten (Bild 4). Auf diese interessante Tatsache der Abhängigkeit des Verhältnisses von Spitzenwiderstand zu Mantelreibung von der Pfahlbelastung wurde in letzter Zeit auf Grund von durchgeführten Belastungsversuchen mehrfach hingewiesen. Es folgt daraus auch, dass der maximale Spitzenwiderstand und der maximale Reibungswiderstand sich nicht etwa gleichzeitig, d. h. bei gleicher Belastung  $P$  einstellen.

Bei Betrachtung der Formel für den Wert  $N_q$  (Bild 5) fällt sofort auf, dass der Tangens des Reibungswinkels als Exponent vorkommt. Dies will heissen, dass bereits geringe Aenderungen dieses Winkels der inneren Reibung den  $N_q$ -Wert und damit den Spitzenwiderstand ganz wesentlich ändern. Z. B. hat eine Aenderung von  $30^\circ$  auf  $35^\circ$  mehr als eine Verdoppelung der Tragfähigkeit zur Folge. Eine möglichst genaue Bestimmung des Winkels der inneren Reibung ist deshalb die Voraussetzung jeglicher Berechnung der Pfahltragfähigkeit auf Grund von bodenmechanischen Ueberlegungen. Der Untergrund muss längs des Pfahles und vor allem auch bis zu einer genügenden Tiefe unterhalb der Pfahlspitze mittels Bohrungen erschlossen sein, und die Bodeneigenschaften, insbesondere also der Winkel der inneren Reibung und gegebenenfalls die Kohäsion, müssen an ungestörten Bodenproben im Laboratorium bestimmt werden<sup>5)</sup>. Erschwerend tritt noch hinzu, dass durch den Vorgang des Einbringens des Pfahles dieser Winkel der inneren Reibung geändert wird. Dies trifft vor allem zu bei gerammten Pfählen in körnigen Böden; wie bereits erwähnt, wird dabei der Boden verdichtet. Bekanntlich hat jede Verdichtung eine Aenderung der Scherfestigkeit, d. h. eben eine Aenderung des Winkels der inneren Reibung zur Folge. Die Erhöhung der Scherfestigkeit in der Umgebung des Pfahles bewirkt eine beachtliche Erhöhung seiner Tragfähigkeit. Bei gebohrten Pfählen oder bei solchen in bindigen Böden ist diese Beeinflussung der Bodeneigenschaften geringer<sup>6)</sup>.

Sämtliche bis heute bekannten Formeln nehmen an, dass die Beiwerte  $N_q$  und  $N_c$  nur vom Winkel der inneren Reibung abhängig seien. Neuere Untersuchungen mit grossen Pfählen haben nun aber eindeutig gezeigt, dass die Grösse und Form des Pfahlquerschnittes auf diese Beiwerte einen ganz beträchtlichen Einfluss haben. Bild 6 veranschaulicht diese Verhältnisse anhand der Resultate einiger Probelastungen an Pfählen der Brücke in Maracaibo. In diesem Bild (nach einem Plan von Prof. Kérisel aufgezeichnet) sind eingetragen die Kurve nach Meyerhof und Caquot-Kérisel sowie die Ergebnisse von Probelastungen an Pfählen normaler Grösse und an jenen von Maracaibo. Es ist daraus deutlich ersichtlich, dass z. B. die Pfähle von Maracaibo einen  $N_q$ -Wert aufweisen, der ungefähr  $\frac{1}{2}$ -mal so gross ist wie jener, der sich nach den erwähnten Formeln ergeben sollte.

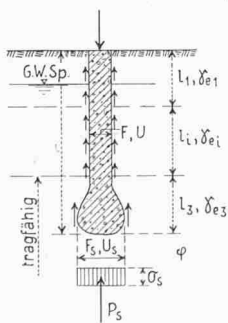
5) Bei aller Sorgfalt in der Entnahme der Proben und der Bestimmung der Scherfestigkeit im Triaxialapparat sind Streuungen in den Resultaten nicht zu vermeiden.

6) Siehe: *Compaction of sands and bearing capacity of piles*, Meyerhof, «Proceedings ASCE» Dez. 1959).

Schema (siehe Terzaghi, Caquot-Kérisel, Meyerhof etc)

2 Bodenklassen: a) körnige Böden Winkel der inneren Reibung  $\varphi$ , Kohäsion  $c \sim 0$   
b) bindige Böden effektiver Winkel der inneren Reibung  $\varphi'$ , Kohäsion  $c'$

$$P_{zul} = \frac{1}{\gamma} \cdot P_{tot} = \frac{1}{\gamma} \cdot (P_S + P_R)$$



#### Körnige Böden

$$\text{allgemeiner Ansatz } P_S = F_s \cdot \sigma_s = F_s \cdot K_s \cdot N_q \cdot \frac{1}{2} l_i \cdot \gamma_{ei}$$

worin  $K_s = 1,0$  dichte Lagerung

$K_s = 0,5$  lockere Lagerung

$$N_q = 10^3 \cdot \text{tg}^2 \varphi \quad (\text{halb experimentell bestimmter Wert.})$$

$$P_R = U \cdot l \cdot p_R$$

$$p_R = 0,5 \cdot \lambda_R \cdot \frac{1}{2} l_i \cdot \gamma_{ei} \cdot \text{tg} \delta$$

$$\delta = \text{Reibungswinkel Erde/Pfahl} = \frac{1}{2} \text{ bis } \frac{2}{3} \varphi$$

$$\lambda_R = 1,00 \text{ dichte Lagerung} \quad \left. \begin{array}{l} \lambda_R = 0,50 \text{ lockere Lagerung} \\ \text{bei Bohrpfählen gelten die halben Werte} \end{array} \right\} \text{Ramppfähle}$$

#### Bindige Böden

$$P_S = F_s \cdot \sigma_s = F_s \left[ K_s \cdot N_q \cdot \frac{1}{2} l_i \cdot \gamma_{ei} + N_c \cdot c \right]$$

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\text{tg} \varphi'} \quad \left( \begin{array}{l} \text{für } \varphi' = 0: \text{ mathematisch unbestimmt} \\ \varphi' = 0, N_c = 7,0 \end{array} \right)$$

$$P_R = U \cdot l \cdot p_R$$

$p_R$ : Angaben streuen stark, beim gerammten Pfahl im günstigsten Fall nach Meyerhof:  $p_R = c$  (obere Grenze  $10 \text{ t/m}^2$ )  
nach Skempton im Ton:  $p_R = (0,6 \div 0,25) c$ , wobei  $c$  beim Druckversuch mit unbehinderter Seitenausdehnung gleich der halben Druckfestigkeit anzunehmen ist

$F$  = Fläche des Pfahlschaftes  
 $U$  = Umfang des Pfahlschaftes  
 $F_s$  = Fläche des Pfahlfusses  
 $U_s$  = Umfang des Pfahlfusses  
 $l = \sum l_i$  = Pfahlhöhe  
 $\gamma_{ei}$  = Raumgewicht der Bodenschicht „i“ unter Berücksichtigung der Lage des Grundwasserspiegels  
 $P_S$  = Spitzenwiderstand  
 $P_R$  = Mantelreibung  
 $P_{tot}$  = Bruchlast  
 $\gamma$  = Sicherheit  
 $P_{zul}$  = zulässige Pfahllast

Bild 5. Berechnung der Tragfähigkeit eines Einzelpfahles

Wie gesagt, stösst die Abschätzung der Mantelreibung auf besonders grosse Schwierigkeiten. Die meisten Versuche zeigen, dass nicht mit einer mit der Tiefe linear zunehmenden Mantelreibung, wie es nach der klassischen Erddrucktheorie der Fall sein sollte, gerechnet werden darf. Die Mantelreibung ist bei gleichbleibenden Bodenverhältnissen längs des Pfahlschafes mehr oder weniger konstant und wird deshalb am besten auf dessen Länge konstant angenommen (Bild 4).

Aus der obigen Diskussion ergibt sich deutlich die Problematik der Berechnung der Pfahltragfähigkeit nach der angeführten Berechnungsmethode auf Grund bodenmechanischer Überlegungen und Kennwerte. Angesichts dieser Sachlage ist es verständlich, dass die Deutschen Baugrund-Normen, DIN 1054, die Ermittlung der zulässigen Belastung von Pfählen auf Grund von Erddruck-Beiwerten nicht zulassen. Trotzdem gibt, nach Ansicht des Referenten, diese Methode gute Richtwerte, nach welchen die Pfahltragfähigkeit abgeschätzt werden kann, und sie ist als solche wertvoll, speziell bei der Prüfung der neuen, grosskalibrigen und langen Bohrpfähle. Sie setzt allerdings eine sehr eingehende und gründliche bodenmechanische Untersuchung des Baugrundes voraus. Trotzdem darf keine Pfahlgründung nur mittels der erwähnten Methode errechnet werden. Pfahlbelastungsversuche sind unerlässlich.

#### Rammformeln

Die Bestimmung der Pfahltragfähigkeit und daraus der zulässigen Belastung von Rammpfählen aus Rammformeln ist nicht ratsam. Bei bindigen Böden kann aus dem Rammwiderstand überhaupt nicht auf die Tragfähigkeit geschlossen werden, aber auch bei körnigen Böden ist die Gleichsetzung des dynamischen Eindringungswiderstandes mit dem statischen Eindringungswiderstand nicht zulässig. Der beim Rammvorgang erzeugte Bodenwiderstand ist nicht vergleichbar mit jenem, der sich unter einer ruhenden Last einstellt. Das Verhältnis zwischen dem dynamischen und dem statischen Eindringungswiderstand schwankt für verschiedene Pfahlarten, Pfahlabmessungen und Baugrundverhältnisse. Rammformeln können deshalb nur zu Vergleichszwecken benützt werden, nicht aber dafür, die tatsächliche Grösse der statischen Tragfähigkeit zu bestimmen. Wird in einem konkreten Fall anhand von Probelastungen eine Rammformel «geeicht», so kann sie für diesen Fall nützliche Dienste leisten. Hingegen kann die Rammung von Pfählen, im Sinne einer Rammsondierung, dazu dienen, die relative Dichte eines Baugrundes abzutasten, insbesondere das Vorhandensein und die Lage einer tragfähigen Schicht und damit die Pfahllänge festzulegen.

#### Probelastung

Die sicherste Methode, um die Tragfähigkeit des Einzelpfahles zu bestimmen, ist der Belastungsversuch. Eine genaue Beschreibung all der Faktoren, welche bei einem Belastungsversuch beobachtet werden müssen, würde allein den Inhalt eines Vortrages ausmachen. Es wird im folgenden deshalb nur mehr stichwortartig auf einige Punkte hingewiesen; im übrigen werden andere Referenten im Verlaufe dieser Tagung Belastungsversuche einzeln besprechen. Eine sehr gute Zusammenstellung über die Art und Weise, wie Probelastungen für Pfähle durchzuführen sind, findet sich in den erwähnten Deutschen Baugrund-Normen, DIN 1054, im Abschnitt 5.4. Die Probelastung soll als Resultat die Lastsetzungslinie und die Zeitsetzungslinie ergeben. Zwischenentlastungen und Wiederbelastungen sind immer erwünscht. Die einzelnen Belastungsstufen sollen genügend

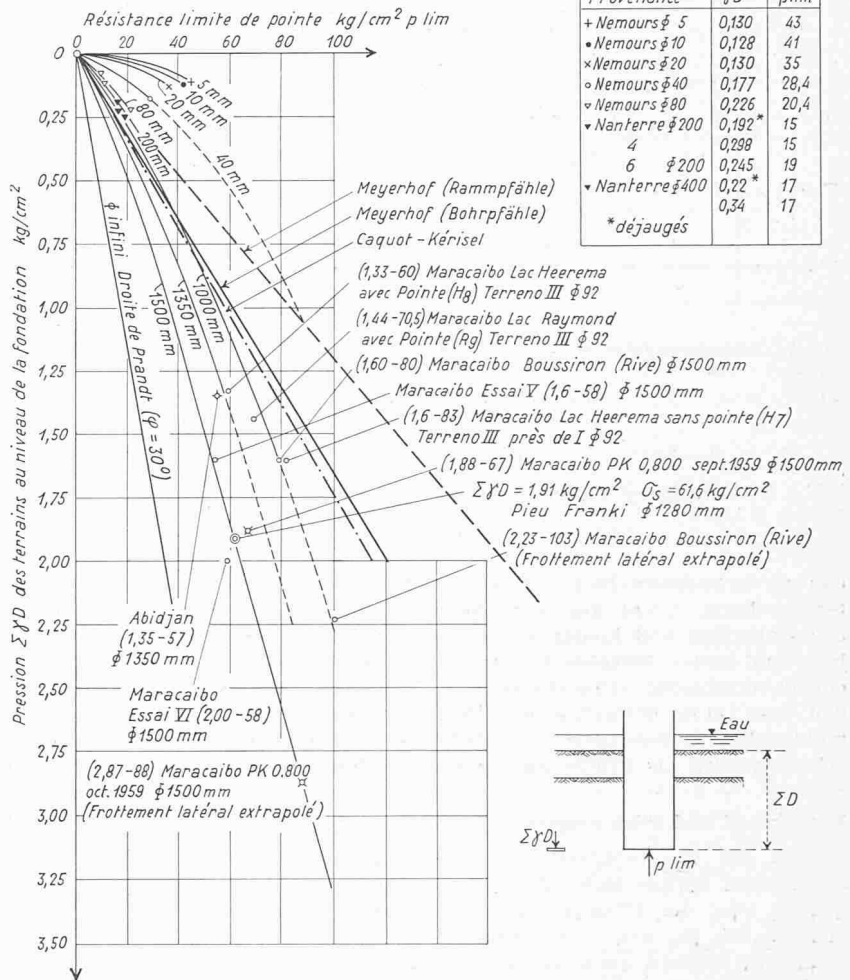


Bild 6. Spezifischer Spitzenwiderstand bei der Grenzbelastung in feinem Sand, in Funktion der Pfahllänge

lange aufgebracht sein, bevor weiter belastet wird. Darunter ist zu verstehen, dass erst dann wieder weiter belastet werden darf, wenn bei einer Laststufe die Setzung abgeklungen ist (Bilder 7 und 8). Es ergeben sich bei genauer Befolgung dieser Vorschrift ziemlich lange Zeiten für die Durchführung einer Probelastung. Aus der Lastsetzungslinie kann die plastische und die elastische Setzung ermittelt werden. Von letzterer ist die elastische Zusammendrückung des Pfahles selbst abzuzählen. Zu beachten ist, dass die Abstützung der aufgebrachten Last oder eventuell die Zugpfähle vom Probepfahl selbst genügend weit entfernt sein müssen, um denselben auf keinen Fall zu beeinflussen (Druckausbreitung). Das gleiche gilt selbstverständlich für die Messuhren zur Messung der Pfahleinsenkung. In dieser Beziehung ist die Verwendung von Präzisionsnivellierinstrumenten angezeigt. Schwierig ist oft die genaue Festlegung der eigentlichen Bruchlast oder besser Grenzbelastung. Für tonige Böden wird die Bruchlast nach Skempton definiert als jene Last, bei welcher die Setzungen erstmals zunehmen, ohne dass die Belastung weiter gesteigert wird. Bei körnigen Böden wird die Grenzbelastung in ähnlicher Weise als jene Belastung definiert, bei welcher das Versinken des Pfahles beginnt. Dieser Punkt ist aber im allgemeinen nicht genau bestimmbar, denn die Lastsetzungslinie zeigt keine vertikale Tangente. Zur Ermittlung dieses Versinkungspunktes sind verschiedene Verfahren vorgeschlagen worden. Die zulässige Pfahlbelastung darf zu 40 bis 50 % der Grenzbelastung angesetzt werden, je nach der Genauigkeit, mit welcher letztere mittels der Lastsetzungslinie bestimmt werden konnte.

Die zulässige Pfahlbelastung ist aber nicht nur, und dies soll ausdrücklich betont werden, von der Tragfähigkeit des Baugrundes abhängig, sondern vom Setzungsmass, welches

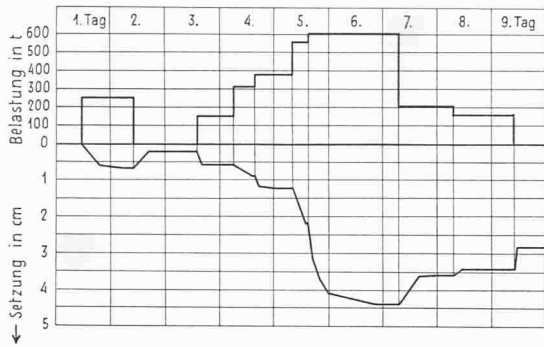


Bild 7. Zeitsetzungsdiagramm des Rammpfahles  $\varnothing$  0,915 Meter

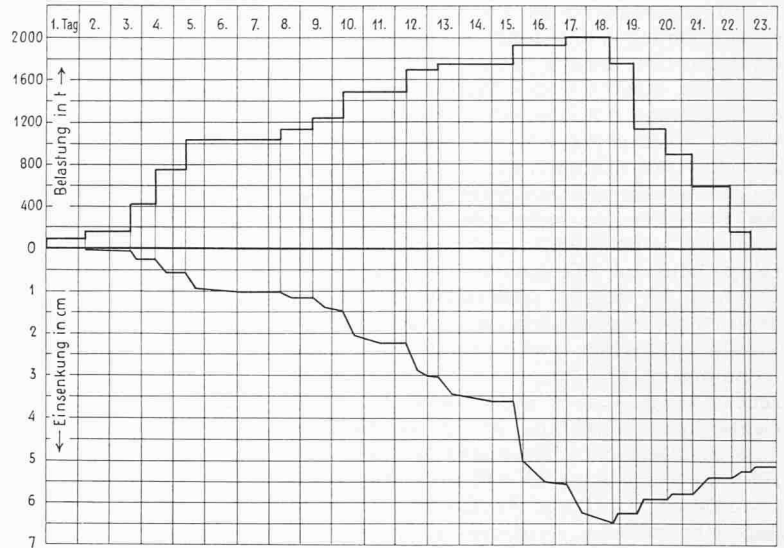


Bild 8 (rechts). Zeitsetzungsdiagramm des Probe-Bohrpfahles  $\varnothing$  1,35 m

das zu gründende Bauwerk mit Sicherheit schadlos ertragen kann. Diese zulässige Setzung ist abhängig von der statischen und konstruktiven Ausbildung des Bauwerkes und seiner Zweckbestimmung und wird dementsprechend verschieden anzunehmen sein. Es muss betont werden, dass bei im übrigen gleichen Verhältnissen und gleichen spezifischen Belastungen grosskalibrige Pfähle sich mehr setzen werden als Pfähle kleineren Querschnittes.

#### Einzelpfahl und Pfahlgruppe

Ist die Tragfähigkeit des Einzelpfahles bekannt, so kann leider daraus nicht ohne weiteres auf jene der Pfahlgruppe oder der Pfahlgründung geschlossen werden. Wesentlich ist ja, wie eben erwähnt, nicht nur die Tragfähigkeit, sondern auch die Setzung des Pfahles oder der Pfahlgruppe. Es ist aber eine bekannte Tatsache, dass die Setzung einer Pfahlgruppe grösser ist als die eines Einzelpfahles bei gleicher Belastung je Pfahl. Dementsprechend ist die zulässige Belastung der Pfähle einer Gruppe geringer als die des Einzelpfahles, will man die für den Einzelpfahl angenommene Setzung nicht überschreiten. Aus dieser Tatsache und der Druckausbreitung im Baugrund ergeben sich gewisse Folgerungen. Die Pfähle einer Pfahlgruppe dürfen nicht zu nahe beieinander stehen. Ihr Axabstand sollte mindestens das dreifache des Pfahldurchmessers betragen, besser aber noch mehr. Neuere Versuche haben nämlich deutlich gezeigt, dass auch bei diesem Abstand die Pfähle sich noch gegenseitig wesentlich beeinflussen. Es scheint, dass je nach den Baugrundverhältnissen dieser Einfluss erst bei Axabständen von mehr als dem sechsfachen des Pfahldurchmessers vernachlässigbar wird. Ferner ergibt sich daraus eine von Fall zu Fall verschiedene grosse Verringerung der zulässigen Tragkraft des Pfahles in der Gruppe gegenüber jener, wie sie mittels einer Probelastung für den Einzelpfahl bestimmt wurde. Die erforderliche Abminderung ist in körnigen Böden am geringsten, in bindigen Böden am grössten. Leider sind die diesbezüglichen Untersuchungen und Versuche noch nicht so weit fortgeschritten, dass heute schon genügend gesicherte Formeln vorliegen. Je nach Axabstand der Pfähle kann diese Abminderung aber bedeutend sein; im allgemeinen wird sie stark unterschätzt und entsprechend wird die aus der Setzung eines Einzelpfahles angenommene Setzung der Pfahlgruppe ebenfalls stark unterschätzt. Diese kann sehr wohl ein Vielfaches der Setzung des Einzelpfahles betragen.

#### Negative Mantelreibung

Zum Schluss muss noch auf folgenden Umstand hingewiesen werden. Setzen sich die oberen Bodenschichten rings um einen Pfahl mehr als der Pfahl selbst, so hängen sich diese Schichten infolge Reibung am Pfahl auf. Daraus

entsteht eine zusätzliche Belastung des Pfahles, die mit negativer Mantelreibung bezeichnet wird. Das selbe tritt ein, wenn nach Vollendung der Pfählung nachträglich Anschüttungen vorgenommen werden, die die unten liegenden Bodenschichten mehr zusammendrücken als die Pfähle. Die Berechnung der auf diese Art auf die Pfähle zusätzlich einwirkenden Belastungen hängt von der Scherfestigkeit der Bodenschichten ab. Zur Zeit sind darüber nur Vermutungen, aber noch keine eindeutigen, formelmässigen Ergebnisse vorhanden. Nötigenfalls sind spezielle konstruktive Massnahmen zu treffen, um die negative Mantelreibung möglichst auszuschalten. Zum Beispiel sind nur lotrechte Pfähle, grosse Pfahlabstände und glatte Pfähle zu verwenden (eventuell Verwendung dünner Stahlrohre oder gewisser Schmiermittel).

In diesem Zusammenhang soll auch noch auf die gefährliche Auswirkung solcher Anschüttungen bei weichen Bodenschichten auf Ortopfähle hingewiesen werden, die schon mehrfach zu Unfällen geführt haben.

Jede Pfahlgründung bedarf nicht nur einer sorgfältigen Vorbereitung, sondern vor allem auch einer sehr gewissenhaften Ausführung. Ihre fachgerechte Durchführung ist eine ausgesprochene Vertrauenssache und sollte vom Bauherrn bei der Vergebung als solche bewertet und durch die Auswahl des richtigen Unternehmers hervorgehoben werden.

#### Int. Studiengruppe für Flügelmesstechnik

DK 532.57

Eine solche Studiengruppe (englisch: International Current-Meter Group, ICMG) wurde von Ingenieuren ins Leben gerufen, die sich mit der Flügelmesstechnik zur Durchflussmessung befassen. Das Hauptziel der ICMG ist der Informationsaustausch über neue Messmethoden, sowie die Zusammenarbeit ihrer Mitglieder bei Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die Flügelmesstechnik ist eine der ältesten Methoden, die in nationalen und internationalen Abnahmeregeln zur Messung grosser Durchflussmengen festgelegt wurden. Besonders auf dem europäischen Kontinent, wo diese Messart zur Durchflussmessung in Wasserkraftwerken fast ausschliesslich Verwendung findet, wurden wertvolle Erfahrungen gesammelt. Schon lange sind sich die Fachleute bewusst, dass gewisse Probleme der Eichung und des Verhaltens der Flügel näherer Abklärung bedürfen. Es sind darüber seit langem in mehreren Ländern Untersuchungen im Gange, und es ist nun die Aufgabe der 1959 gebildeten ICMG, diese zu koordinieren. Unter dem Vorsitz von Prof. H. Gerber, Eidg. Technische Hochschule in Zürich, wurde von Fachleuten aus sieben Ländern ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm aufgestellt und eine Arbeitsaufteilung vorgenommen. Die Mitglieder der ICMG treffen sich alljährlich, um die Fortschritte festzustellen und die