



Gemäß DIN 1054 und Eurocode 7 soll durch Probelastungen die Tragfähigkeit sowie das Setzungsverhalten von einzelnen Pfählen für ein bestimmtes Bauwerk zuverlässig ermittelt werden. Wir bieten dazu ein umfangreiches Instrumentarium an, welches diesen Anforderungen entspricht und damit eine vergleichbare und wissenschaftlich gültige Auswertung der Ergebnisse sicherstellt, wie sie in der DIN 1054 gefordert wird.

Die **Tragfähigkeit** Q eines Druckpfahles setzt sich gemäß Abb. 1 zusammen aus

- der am Pfahlfuß in den Untergrund eingetragenen Pfahl-Fußkraft Q_s und
- der über Reibung dem Einsinken entgegenwirkenden Pfahl-Mantelkraft Q_r .

Bei Zugpfählen wirkt nur die Pfahl-Mantelkraft.

Die Tragfähigkeit eines Druckpfahles in Abhängigkeit von der Setzung s ergibt sich somit aus

$$Q(s) = Q_s(s) + Q_r(s)$$

bzw.

$$Q(s) = A_F \sigma_s(s) + \Sigma \Delta A_m \cdot \tau_m(s)$$

mit

$$A_F = \text{Pfahl-Fußfläche} = \pi r^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\sigma_s = \text{Pfahl-Spitzendruck [MN / m}^2\text{]}$$

$$A_m = \text{Pfahl-Mantelfläche im tragfähigen Boden [m}^2\text{]}$$

$$A_m = 2r \pi l_o \text{ (} l_o = \text{Kraft-Eintragungslänge)}$$

$$\tau_m = \text{Mantelreibung [MN / m}^2\text{]}$$

Je nach Überwiegen des einen oder anderen Tragfähigkeitsanteiles wird von "Spitzen-druckpfählen" oder von "Reibungspfählen" gesprochen.



Neben der Ermittlung der Tragfähigkeit eines Pfahles ist üblicherweise die Bestimmung des **Setzungsverhaltens** der zweite Gegenstand einer Probebelastung. Wenn nämlich bei einer Probebelastung der Druckpfahl "merkbar" versinkt bzw. ein Zugpfahl sich "merkbar" hebt, so ist die Grenzlast Q_g erreicht. Die Sicherheit h eines Pfahles wird auf diese Grenzlast Q_g wie folgt bezogen:

$$\eta = Q_g / Q_{zul}$$

Die Grenzlast Q_g ist in der Last-Setzungs- bzw. Hebungslinie an der Stelle festgelegt, wo sich im Kurvenverlauf die "merkbar" Setzungen bzw. Hebungen einstellen. Bei Pfählen größeren Durchmessers, bei denen die Versuchslast, welche mindestens das zweifache der späteren Bauwerkslast betragen soll, häufig nicht bis zu einer Grenzbelastung Q_g führt, genügt es nach DIN 1054, die Probebelastung nur bis zu derjenigen Pfahlkopfsetzung durchzuführen, die der vierfachen Setzung im Gebrauchszustand entspricht. Andere Normen empfehlen in solchen Fällen bei Bohrpfählen eine Grenzsetzung von 2,0 cm und 0,025 d (in cm) bei Rammpfählen.

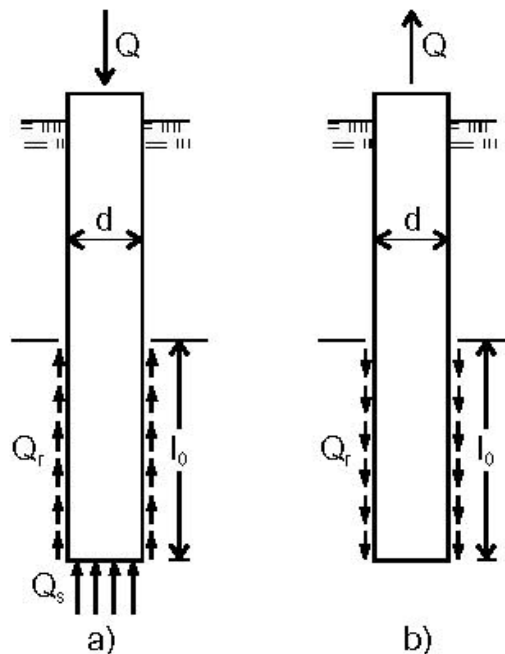


Abb. 1 Tragfähigkeit Q eines Druckpfahles (a) und eines Zugpfahles (b)



Als **Belastungsvorrichtung** bei Probebelastungen werden im Regelfall hydraulische Pressen eingesetzt, die sich gegen ein Widerlager abstützen, welches häufig als "Pilz" oder "Stuhl" bezeichnet wird (s. Abb. 2). Der Pilz ist entweder über Anker oder über Zugpfähle in einem Abstand von mindestens 2,5 m bzw. dem Vierfachen des Pfahldurchmessers im Baugrund verankert. In selteneren Fällen kommen auch Totlasten als Widerlager zum Einsatz. Das Pressenwiderlager ist mindestens auf das 1,1fache der höchsten Prüflast auszulegen.

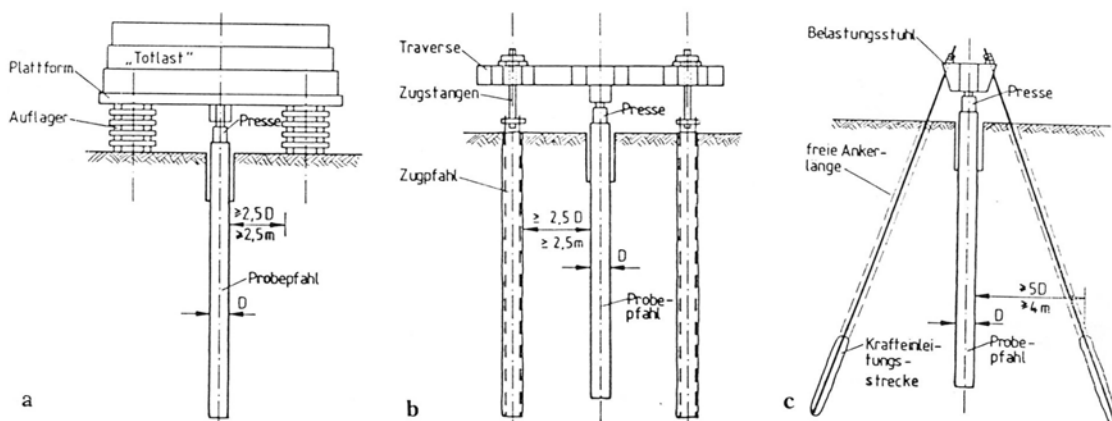


Abb. 2 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Durchführung eines Vertikal-Belastungsversuches und Mindestabstände zwischen der Belastungseinrichtung und dem Probe-pfahl für: a) Auflager von Totlasten, b) Zugpfähle, c) sternförmig angeordnete, gespreizte Verpressanker (nach Arbeitskreis 5, DGEG, 1993)

Die Hydraulikzylinder HP 100/200 mit einer effektiven Kolbenfläche von 228,59 cm² erzeugen bei einem maximalen Öldruck von 450 bar eine wirksame Kraft von

$$Q = (A \cdot p) / 100$$

bzw.

$$\begin{aligned} Q &= (228,59 \times 450) / 100 \text{ kN} \\ &= 1,028.65 \text{ kN} \end{aligned}$$



Es können z. B. fünf solcher Zylinder zu einer Zylindergruppe zusammengeschaltet werden, welche 5 MN Versuchslast aufbringen kann, wobei auch Gruppen von drei Zylindern oder auch mehr als fünf Zylindern möglich sind. Der Kolbenweg dieser Zylinder beträgt 200 mm.

Der Öldruck in den Zylindern wird vorteilhafterweise über ein elektrisch betriebenes Hydraulik-Antriebsaggregat mit einer Mindestleistung von 1 l/min erzeugt, welches die Zylinder bei größeren Pfahlkopfverschiebungen mit genügend Drucköl versorgen kann, so dass eine Lastkonstanthaltung, wie sie in den verschiedenen Versuchsphasen nach DIN 1054 vorgeschrieben ist, sichergestellt werden kann. Die Lastkonstanthaltung wird durch einen elektrischen Regelkreis erreicht, bei dem ein gewählter Öldruck mit dem Istdruck im Hydraulikkreis ständig verglichen und nachgeregelt wird.

Gemessen wird die Versuchslast mit einer Kraftmessdose, welche elektrisch oder hydraulisch arbeitet, die aber in jedem Fall fernablesbar sein und den Anforderungen der Genauigkeitsklasse 1 entsprechen sollte. Zwischen Widerlager und Kraftmessdose ist zum Schutz derselben und der Zylinder eine Kugelkalotte angeordnet.

Die Vertikalverschiebungen des Pfahlkopfes werden an mindestens drei Punkten mit elektrischen Wegaufnehmern gemessen. An diesen Messpunkten sind zudem die Horizontalverschiebungen ebenfalls zu registrieren, um kontrollieren zu können, ob die Last im Pfahl zentrisch eingetragen wird. Die Wegaufnehmer sollten eine Messgenauigkeit von $\pm 0,01$ mm haben. Die Wegaufnehmer sind an einer Messbrücke fixiert, die verschiebungsfrei gelagert sein muss. Um dies sicherzustellen, ist in größerer Entfernung ein Festpunkt einzurichten, von dem aus ein Nivellement auszuführen ist. Das Nivellement sollte eine Messgenauigkeit von mindestens $\pm 0,3$ mm aufweisen, was mit einem selbstjustierenden Nivellier mit Planplattenmikrometer-Vorsatz im Regelfall auch problemlos zu erreichen ist.



Spitzendruck und Mantelreibung

Um die Mantelreibung zwischen Pfahl und Baugrund zu ermitteln, wird in möglichst vielen Tiefen des Pfahles seine Stauchung bzw. seine Dehnung gemessen. Wir bieten dazu drei verschiedene Möglichkeiten an (Abb. 3):

- Mehrfach-Stangenextensometer
- Gleitmikrometer
- Dehnungsaufnehmer

Das **Mehrfach-Stangenextensometer** mit Messgestängen, die in bis zu sechs unterschiedlichen Tiefen des Pfahles verankert sind, kann entweder bei der Herstellung des Pfahles in der Mittelachse des Bewehrungskorbes befestigt und einbetoniert werden oder in einem nachträglich abgeteuften Bohrloch eingesetzt und verpresst werden. Die Verschiebungen des Messgestänges werden mit elektrischen Wegaufnehmern mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,01$ mm registriert. Diese Ausführungsvariante setzt voraus, dass die Lastverteilerplatte in der Mitte einen Durchlass besitzt und dass drei oder mehr Hydraulikkolben zur Lastaufbringung eingesetzt werden, weil nur dann die Wegmessung in Pfahlmitte möglich ist.

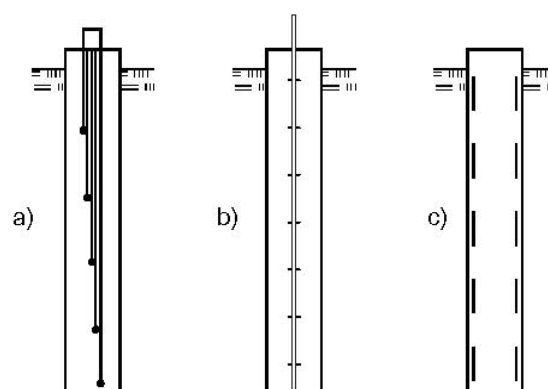


Abb. 3 Schematische Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten zur Pfahldehnungs- bzw. Pfahlstauchungsmessung
 a) Mehrfach-Stangenextensometer, b) Gleitmikrometer,
 c) Dehnungsaufnehmer (je drei Stück pro Messniveau)



Ein vergleichbarer Versuchsaufbau muss vorhanden sein, wenn statt des eingebauten Extensometermessgestänges eine mobile Extensometersonde (**Gleitmikrometer**) benutzt werden soll. Zu ihrem Einsatz wird im Pfahl ein Kunststoffrohr installiert, welches in Meterabständen Messringe besitzt. Die Abstandsänderungen dieser Ringe während der Belastung werden mit der Gleitmikrometersonde mit einer Ablesegenauigkeit von 0,001 mm bestimmt. Um die Sonde während des Versuches ein- und ausfahren zu können, muss die Pfahlkopfplatte einen Durchlass von mindestens 50 mm besitzen. Die Gleitmikrometer-Versuchsanordnung besitzt den großen Vorteil, dass die Stauchung oder Dehnung des Pfahles lückenlos von Meter zu Meter bestimmt werden kann. Üblicherweise wird bei jeder Belastungsstufe des Pfahlversuches eine Gleitmikrometer-Messung vorgenommen.

Besonders dann, wenn die Probepfähle ins spätere Bauwerk integriert werden und eine Fortsetzung der Pfahldehnungs- bzw. Stauchungsmessungen erwünscht ist, empfehlen wir den Einsatz von Dehnungsaufnehmern, bei denen die Verschiebungen zwischen ein bis drei Meter langen Festpunkten durch hochauflösende Wegaufnehmer gemessen werden (z. B. Messweg ± 1 mm, Auflösung 0,002% d. M., Messgenauigkeit $\pm 0,002$ mm). Durch Aneinanderkopplung mehrerer Messelemente mit wasserdichten Steckverbindern können Ketten gebildet werden.

Die **Pfahlfußkraft** wird mit einem Druckkissen gemessen, welches auf der Unterseite des Bewehrungskorbes befestigt ist. Vor dem Einbringen des Druckkissens ist eine ca. 30 bis 40 cm dicke Sohlplatte zu betonieren, auf welche das Druckkissen aufgesetzt wird. Da der wirksame Durchmesser dieses Druckkissens kleiner sein muss als die Pfahlverrohrung, ist es erforderlich, die verbleibende Ringfläche bis zur Bohrlochwand mit einem Gummiring abzudecken, sodass zwischen Sohlplatte und dem Beton des eigentlichen Pfahles keine Betonbrücke entstehen kann, welche die Spitzendruckmessung verfälschen würde. Das Druckkissen, dessen Durchmesser den Pfahlabmessungen angepasst wird, ist mit Öl gefüllt. Die Druckerhöhung im Öl des Kissens infolge Pfahlbelastung wird mit einem piezoresistiven Druckaufnehmer erfasst.

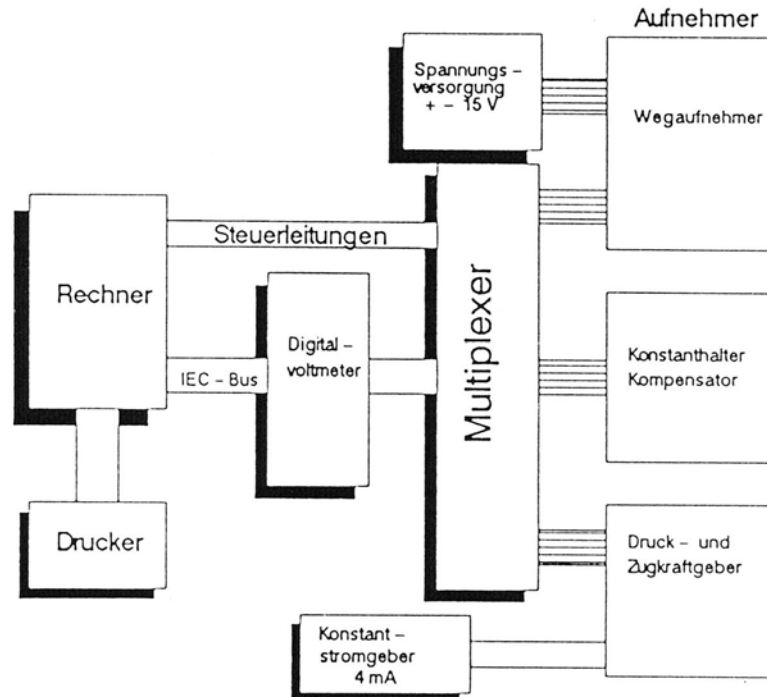


Abb. 4 Schema der Abfrage und Registrierung der Versuchsdaten während der Pfahlbelastung

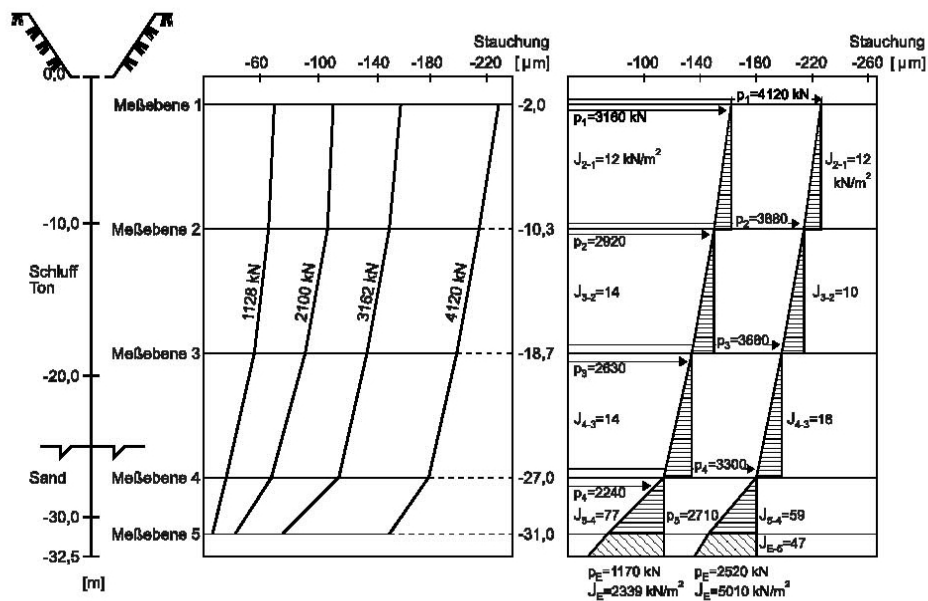


Abb. 5 Ergebnis einer Pfahlprobelbelastung, bei welcher die Lastabtragung mit Dehnungsaufnehmern gemessen wurde



Alle Versuchsdaten der Probebelastung werden gemäß Abb. 4 durch einen Rechner abgefragt und registriert. Die einzelnen Belastungsschritte werden je nach Verlauf des Versuches am Konstanthalter eingestellt und jede Belastungsstufe so lange belastet, bis die Setzungen auf 0,02 mm/min abgeklungen sind. In Abb. 5 ist das Ergebnis einer Pfahlprobebelastung wiedergegeben.

Ein Wort noch zur Genauigkeit der Messeinrichtungen: Die DIN 1054 schreibt im Anhang A vor, dass "sämtliche Messinstrumente und die Belastungsvorrichtung vor einer Versuchsserie zu eichen" sind, wobei wohl gemeint ist, dass die Mess- und Belastungsvorrichtungen von amtlicher Stelle zu kalibrieren sind (Eichen ist eine hoheitliche Aufgabe des Eichamtes).

Selbst die Vorstellung, vor einer Versuchsserie ein Kalibrieren aller genannten Mess- und Belastungseinrichtungen von einer amtlichen Stelle zu verlangen, scheint uns äußerst unrealistisch. Sollte der Ausschreibende dies wirklich wollen, so sollte er bedenken, dass ein solches Unterfangen die Lieferzeit um mehrere Wochen verlängert und dass sich die Lieferpreise der Messgeräte erheblich verteuern. (Das amtliche Kalibrieren einer Kraftmessdose kostet zur Zeit ca. 400,00 €, eines Wegaufnehmers ca. 300,00 €.) Wir schlagen im Gegensatz dazu vor, dass der Ausschreibende sich in unserem Werk von unserem Qualitätsstandard in Fertigung und Kalibrierung der von uns ausgelieferten Messeinrichtungen überzeugt und dort stichprobenweise Nachkalibrierungen durchführen lässt.

Nach unseren Erfahrungen schwankt die Qualität der **Ausschreibung** von Probebelastungen in erheblichem Maße. Gelegentlich werden Festlegungen bis ins kleinste Detail vorgenommen, an anderer Stelle beschränken sich die Ausschreibungen auf die lapidare Feststellung: "Es sind zwei Probebelastungen nach DIN 1054 auszuführen. Das Herstellen der Probepfähle wird gesondert berechnet."

Derlei Ausschreibungen geben den Bietern keine ausreichenden Kalkulationsmöglichkeiten. Die Vergleichbarkeit der abgegebenen Angebote ist nicht möglich und vielfach führen solche Ausschreibungen zu unliebsamen Streitigkeiten zwischen Auftraggeber und ausführender Firma, welche leicht vermieden werden können.