

Prüfung nach dem Pfahlfusspressverfahren

Von Dr. Ulrich Vollenweider, Beratender Ingenieur ETH/SIA/ASIC, Zürich

Vorwort

Das Pfahlfusspressverfahren ist ein neues und in wirtschaftlich-technischer Hinsicht vielversprechendes Verfahren zur Prüfung und Beurteilung der Tragfähigkeit grosskalibriger Bohrpfähle von 2 MN bis über 20 MN Traglast. Bei den SBB-Viadukten Neugut und Weidenholz wurde dieses Verfahren 1985 zur Prüfung der Tragfähigkeit von Fundamentpfählen eingesetzt. Bei der Versuchsdurchführung ergaben sich allerdings, als Folge einer ungenügenden Dichtigkeit der Pfahlfusspressen, einige Schwierigkeiten. Seither konnte das Verfahren sowohl in messtechnischer als auch in verfahrenstechnischer Hinsicht weiterentwickelt werden und darf heute als ausgereiftes Verfahren zur Prüfung grosskalibriger Bohrpfähle betrachtet werden. Mit dem vorliegenden Beitrag sollen das Prüfverfahren selbst und die Ergebnisse der Pfahlbelastungsversuche beim SBB-Viadukt Neugut diskutiert und besprochen werden.

Einleitung

Der Einsatz von Grossbohrpfählen und Schlitzwandpfählen als Tragelemente im Grund- und Tiefbau hat in den vergangenen Jahren eine grosse Entwicklung und starke Verbreitung erfahren. Die Pfahldurchmesser sind zunehmend grösser geworden, und die nutzbaren Pfahllasten haben entsprechend zugenommen. Heute werden bereits Grossbohrpfähle mit einem Durchmesser $D \geq 2,5$ m und einer Traglast $P \geq 20$ MN angeboten. Der Einsatz von Pfählen grosser Traglast bleibt zudem nicht mehr nur auf reine Standpfähle mit gesichertem Tragverhalten beschränkt. Grosslastpfähle werden zunehmend auch als Reibungspfähle mit hauptsächlich Lastabtragung über den Pfahlmantel ausgeführt.

Dem technischen Fortschritt in der Herstellung grosskalibriger Bohrpfähle stehen aber einige gewichtige Nachteile entgegen. Die Möglichkeit, die Traglast und das Setzungsverhalten von Grosslastpfählen mit mehr als ca. 5 MN Gebrauchslast prüfen zu können, ist aus Kostengründen beschränkt. Die Bemessung solcher Pfähle ist kaum ein ernsthaftes Problem im Falle von Standpfählen mit Einbindung in harter Moräne oder Fels, jedoch erheblich problematischer im Falle von Reibungspfählen

mit Lastabtragung über den Pfahlmantel.

Es zählt zur Regel der Baukunde, im Falle von Unsicherheit das Tragverhalten der Pfähle durch Belastungsversuche zu prüfen. Zur Prüfung solcher Pfähle wurde als Ergänzung und/oder als Ersatz für den konventionellen Pfahlbelastungsversuch das nachfolgend beschriebene Pfahlfusspressverfahren entwickelt. Durch den Einbau und die Aktivierung einer am Pfahlfuss eingebauten Presse kann eine Aussage über das Setzungsverhalten und die Traglast des Pfahles gewonnen werden. Das Verfahren ist speziell zur Prüfung von Reibungspfählen mit hoher Gebrauchslast geeignet. Im Vergleich zum konventionellen Pfahlbelastungsversuch mit Ballast oder Abspannverankerung sind die Kosten für einen Pfahlfusspressversuch vergleichsweise bescheiden.

Beim SBB-Viadukt Neugut wurden zur Klärung des Tragverhaltens der schwimmend fundierten Pfähle neben zwei konventionellen Pfahlbelastungsversuchen drei Pfahlfusspressversuche ausgeführt. Basierend auf diesen Versuchen erfolgte die definitive Bemessung der Pfahlfundamente. Zur Gründung der Pfeilerfundamente wurden Bohrpfähle mit Durchmesser 0,9 bis 1,18 m, mit einer Pfahllänge von 12 bis 20 m und einer Gebrauchslast ($G + 0,7 P$) von 2,5 bis 5,4 MN ausgeführt. Die Lastabtragung erfolgt dabei vornehmlich über Mantelreibung in den eiszeitlichen und späteiszeitlichen Seeablagerungen. Bezüglich Beschreibung von Baugrund, Bauwerk und Pfahlbemessung wird auf die in der gleichen Publikation erscheinenden Beiträge verwiesen.

Der Pfahlfusspressversuch

Prüfsystem

Am Pfahlfuss eines Bohrpfahles, allenfalls auch eines grosskalibrigen Ramppfahles, wird eine hydraulische Presse eingebaut (Bild 1) mit dem Ziel:

- Über die Messung der Pfahlfusssetzung während des Pressvorgangs das Last-Setzungsverhalten und die Tragfähigkeit des Pfahlfusses (Spitzenwiderstand) zu bestimmen.

- Über die Messung der Pfahlkopfhhebung während des Pressvorgangs das Last-Setzungsverhalten und die Tragfähigkeit des Pfahlschaftes (Mantelreibung) zu bestimmen.
- Über genaue Deformationsmessungen oder Betondruckmessungen im Pfahlschaft während des Pressvorgangs Hinweise auf die Lastabtragung und die Integrität des Pfahlbetons (innere Tragfähigkeit) zu erhalten.

Als Presse kann eine konventionelle hydraulische Presse mit Pendelplatte Verwendung finden. Die maximale Presskraft sollte, wenn möglich, der zulässigen Normalkraft des zu prüfenden Pfahles entsprechen. Der maximale Presshub sollte minimal ca. 150 mm betragen. Je nach Verwendung des Versuchspfahles wird die Pfahlpresse und der Pfahlfuss nach Abschluss des Versuches ausinjiert.

Mit dem so beschriebenen Pfahlfusspressversuch kann, bei sorgfältiger Messung der Verschiebungen von Pfahlkopf und Pfahlfuss, das Last-Setzungsverhalten des Pfahles, getrennt nach Spitzenwiderstand und Mantelreibung, bestimmt werden. Die so gewonnenen Daten sind aber nicht direkt auf den zu beurteilenden Bauwerkspfeiler übertragbar. Entgegen der Beanspruchung durch die Bauwerksbelastung wird beim Pfahlfusspressversuch der Pfahl nicht in, sondern aus dem Boden gedrückt. Beim Belastungsversuch wirkt die Mantelreibung in entgegengesetzter Richtung, und im Bereich des Pfahlfusses wird im Baugrund ein im Vergleich zum Bauwerkspfeiler unterschiedlicher Spannungszustand erzeugt. Bei der Beurteilung des Traglast- resp. Setzungsverhaltens und bei der Festsetzung von Bemessungswerten ist daher der speziellen Versuchsbedingung Rechnung zu tragen.

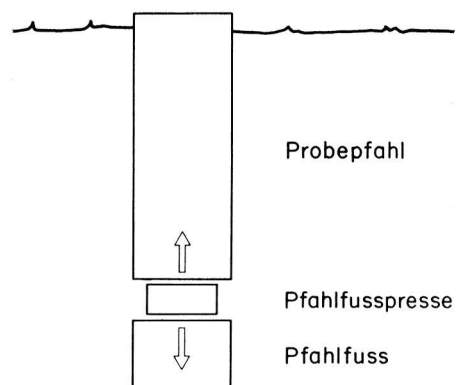


Abb. 1
System Pfahlfusspressverfahren

Messsystem

Während des Pressvorgangs ist eine genaue Messung der auftretenden Verschiebungen erforderlich, um eine klare Last- als auch Zeitverschiebungsbeziehung zu erhalten. Insbesondere ist es unerlässlich, die lastabhängigen absoluten Verschiebungen von Pfahlkopf und Pfahlfuss zu kennen. Zur Kontrolle und zur Ermittlung der Lastabtragung in den Baugrund sollten wenn möglich auch die Deformationen (Stauchung) des Pfahlschaftes gemessen werden können. Das Deformationsspiel von Pfahlfuss und Pfahlkopf wird mittels Extensometermessungen erfasst. Die absoluten Verschiebungen werden über eine geodätische oder fotoelektrische Pfahlkopfvermessung erfasst, und die Pfahlstauchungen können über Mehrfachextensometer, besser aber über Gleitmikrometer oder Betondruckmessgeber gewonnen werden (Bild 2). Zur Kontrolle

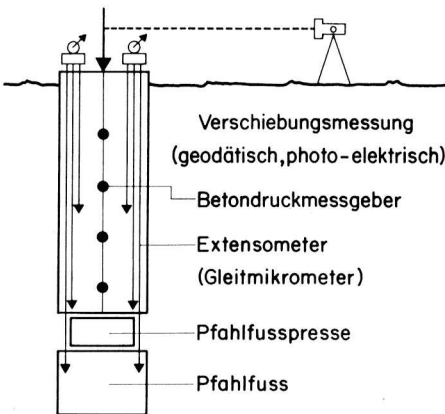


Abb. 2
Messtechnik Pfahlfusspressverfahren

und zur Elimination von möglichen Verkippungen sollten die Verschiebungen in mindestens zwei, besser aber vier Querschnittspunkten gemessen werden. Eine unmittelbare Auswertung und Analyse der Messresultate ist erforderlich, um den Pfahlbelastungsversuch in Anpassung an die erzeugten Verschiebungen steuern zu können.

Pfahlfussausbildung

Bei der Prüfung des Last-Setzungsverhaltens eines primär auf Mantelreibung tragenden Pfahles nach dem Pfahlfusspressverfahren kommt der Ausbildung des Pfahlfusses besondere Bedeutung zu. Die Presskraft zur Erzeugung der Pfahlmantelreibung muss als Reaktionskraft über den Pfahlfusswiderstand erhalten werden. Da im allgemeinen bei einem schwimmenden Pfahl der Pfahlfusswiderstand erheblich geringer ist als der entsprechende Pfahlmantelwi-

derstand, ist beim vorgeschlagenen Pfahlprüfverfahren der Pfahlfuss zur Erzeugung eines genügenden Widerstandes als kurzes Pfahlelement auszubilden. Eine solche Pfahlfussverlängerung ist aber auch aus Gründen der Belastungszentrierung resp. zur Verhinderung von Pressverkippungen erforderlich. Im allgemeinen genügt eine Pfahlfusslänge von ca. 2 bis 3 Pfahldurchmessern. In speziellen Fällen, wie zum Beispiel in stark unterschiedlichen Baugrundverhältnissen im Bereich von Pfahlmantel und Pfahlfuss, kann auch eine wesentlich längere Pfahlfussausbildung erforderlich werden. Zur Erzeugung einer ausreichenden Reaktionskraft sind meist recht grosse Pfahlfussverschiebungen (50 bis 150 mm) erforderlich.

Belastungsversuch

Die Versuchsdurchführung des Pfahlfusspressversuches erfolgt in Anlehnung an den konventionellen Pfahlbelastungsversuch, wie er in der SIA-Norm 192 beschrieben ist. Zusammengefasst sind bei der Versuchsdurchführung im wesentlichen folgende Punkte zu beachten:

- Die maximale Presskraft sollte der zulässigen inneren Beanspruchung des Pfahles, minimal aber der Gebrauchslast des zu prüfenden Pfahles entsprechen.
 - Der Pfahl ist in gleichmässigen Laststufen von ca. 10 bis 15% der maximalen Prüflast P_p zu belasten.
 - In den einzelnen Laststufen ist die Last bis zur eindeutigen Bestimmung des Kriechmasses k , mindestens aber während 60 Minuten konstant zu halten. Die Deformationen sind in Zeitabständen 1', 2', 5', 10', 15', 30', 60'... zu messen.
 - Auf Lastniveau Gebrauchslast P_g (eventuell bereits tiefer) ist ein vollständiger Entlastungs- und Wiederbelastungszyklus einzuschliessen.
 - Auf einem höheren Lastniveau ist das Zeit-Setzungsverhalten bei konstanter Last während einer längeren Zeitdauer, mindestens aber während 12 bis 24 Stunden zu beobachten.
 - Die Messeinrichtung sollte folgenden Genauigkeitsansprüchen genügen:
Kraft:
absolut 2% P_p , relativ 0,5% P_p
Verschiebung:
absolut 0,2 mm, relativ 0,05 mm
Ablesegenauigkeit 0,01 mm
- Während der Versuchsdurchführung sind sowohl das Last-Setzungsverhalten als auch das Zeit-Setzungsverhalten aufmerksam zu verfolgen, und die entsprechenden Kurven sind gra-

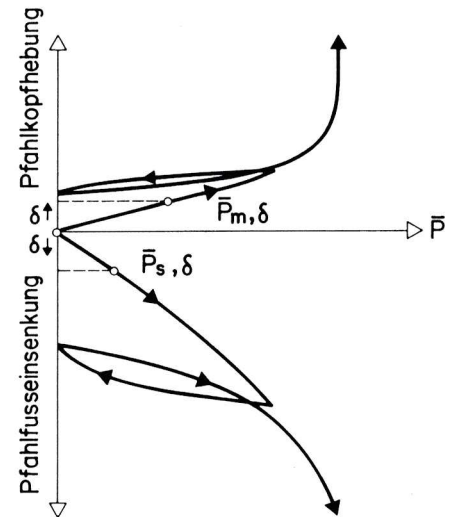


Abb. 3
Verschiebungsmessungen Pfahlfusspressverfahren

fisch aufzuzeichnen (Bild 3). Je nach Baugrund kann relativ plötzlich und ohne grosse Voranzeige die Traglast des Pfahlmantelwiderstandes erreicht werden. Im allgemeinen wird der maximale Pfahlmantelwiderstand bei einer Verschiebung von ca. 15 bis 30 mm, ausnahmsweise (steife, überkonsolidierte Böden) bereits bei 7 bis 15 mm erreicht. Zur Erreichung des maximalen Pfahlfusswiderstandes sind dagegen in der Regel wesentlich grössere Verschiebungen mit Füsseinsenkungen von 10 bis 20% des Pfahldurchmessers erforderlich.

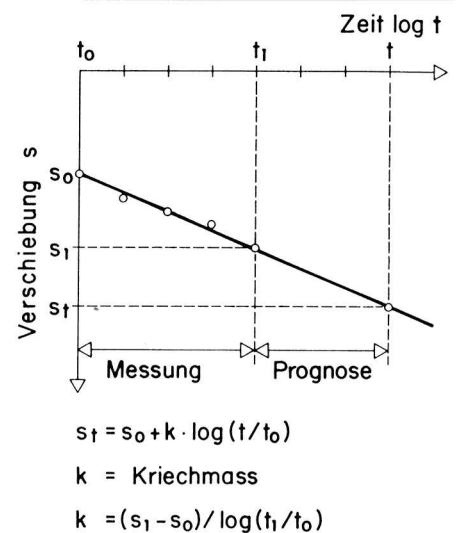


Abb. 4
Zeit-Verschiebungsbeziehung

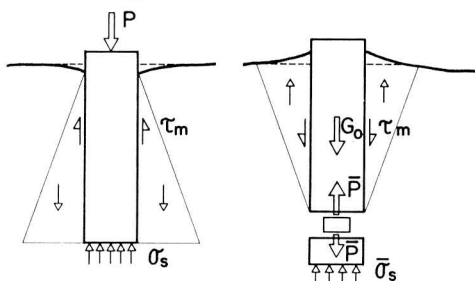
Prognose des Tragverhaltens

Mit dem beschriebenen Belastungsversuch wird das kurzfristige Belastungsverhalten eines Pfahles geprüft. Relevant für das zu errichtende Bauwerk sind dagegen die langfristig

zu erwartenden Pfahlsetzungen. Die Ermittlung der langfristig zu erwartenden Setzungen basiert auf der Annahme, dass sich unter konstanter Belastung die Zeit-Setzungskurve im halblogarithmischen Masstab als Gerade approximieren lässt (Bild 4). Dies ist eine Annahme, die sich allgemein im Grundbau (Dämme, Anker, Pfähle, Fundamente) durch viele Versuche einigermaßen zuverlässig bestätigt findet. Um das langfristige Setzungsverhalten abschätzen zu können, ist mit der Versuchsdurchführung das lastabhängige Kriechmass k zu bestimmen. Die Ermittlung der langfristigen Verschiebungen kann nach der in Bild 4 angegebenen Zeit-Setzungsbeziehung abgeschätzt werden. Bei der Prognose der Bauwerksetzung ist dem Einfluss der Pfahlgruppenwirkung Rechnung zu tragen.

Überlegungen zum Tragverhalten

Mit dem Pfahlfusspressversuch soll Kenntnis über das Tragverhalten eines Bauwerkspfahles gewonnen werden. Nun ist aber das Tragverhalten des Presspfahles nicht direkt mit dem Tragverhalten des entsprechenden Bauwerkspfahles vergleichbar, da es sich bei Versuchs- und Bauwerksbelastung um unterschiedliche Belastungszustände handelt (Bild 5).



$$P = P_m + P_s$$

$$P_m = \int \tau_m \cdot dF$$

$$P_s = \sigma_s \cdot F_s$$

Bauwerkspfahl

$$\bar{P} = \bar{P}_m + G_0 = \bar{P}_s$$

$$\bar{P}_m = \int \tau_m \cdot dF$$

$$\bar{P}_s = \bar{\sigma}_s \cdot F_s$$

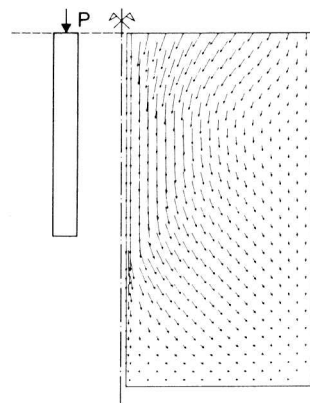
Pressfusspfahl

Abb. 5
Tragverhalten Bauwerkspfahl-
Versuchspfahl

Beim Pfahlfusspressversuch wird der Pfahlschaft nach oben, beim Bauwerkspfahl nach unten gedrückt. Beim Presspfahl wird in der Ebene der Pfahlpresse eine gewisse Baugrundtension erzeugt, während umgekehrt beim Bauwerkspfahl in der gleichen Ebene eine Spannungserhöhung eintritt. Aus den erwähnten Gründen ist für die beiden Pfahlbelastungen ein unterschiedliches Tragverhalten zu vermuten. Zur

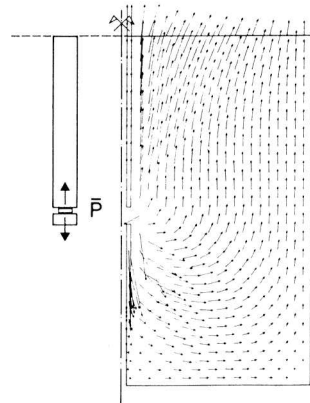
Klärung der Frage der Korrelation Versuchspfahl-Bauwerkspfahl wurden umfangreiche Vergleichsberechnungen ausgeführt.

Die Vergleichsberechnungen wurden mit einem FE-Programm unter Berücksichtigung eines elastisch-plastischen Materialverhaltens ausgeführt. Als massgebende Parameter wurden der Einfluss der Baugrundsteifigkeit (E-Modul), der Scherfestigkeit des Baugrundes (φ' , c') und der relativen Pfahlhöhe (L/D) untersucht. Mit der durchgeführten Berechnung soll nicht primär das Tragverhalten eines Pfahles untersucht werden, sondern eine Aussage über die relative Tragfähigkeit von Pfahlfusspresspfahl zu Bauwerkspfahl unter sonst gleichen Randbedingungen gewonnen werden. Bild 6 und Bild 7 zeigen die Verschiebungstrajektorien einer solchen vergleichenden FE-Berechnung. Die Lastabtragung P eines Pfahles er-



Pfahlkopfbelastung $P = 1000 \text{ kN}$
 $E = 10 \text{ N/mm}^2 \quad \varphi' = 20^\circ \quad c' = 0$

Abb. 6
FE-Vergleichsberechnung
Verschiebungstrajektorien Kopf-
belastung



Pfahlfussbelastung $P = 1000 \text{ kN}$
 $E = 10 \text{ N/mm}^2 \quad \varphi' = 20^\circ \quad c' = 0$

Abb. 7
FE-Vergleichsberechnung
Verschiebungstrajektorien Fuss-
belastung

trajektorien einer solchen vergleichenden FE-Berechnung. Die Lastabtragung P eines Pfahles er-

folgt über Mantelreibung P_m und Spitzenwiderstand P_s . Beide Lastanteile, wie auch die Lastaufnahme P selbst, sind deformationsabhängig. Mit dem Pfahlfusspressversuch können unabhängig voneinander die Mantelreibung \bar{P}_m und der Spitzenwiderstand \bar{P}_s in Funktion der Verschiebungen s bestimmt werden. Diese versuchsmässig gewonnenen Widerstandswerte \bar{P}_m und \bar{P}_s sind zur Bestimmung des Tragverhaltens des Bauwerkspfahles mit Hilfe von theoretisch-empirisch gewonnenen Korrelationsfaktoren k_m und k_s umzurechnen.

$$P = P_m + P_s \quad \text{Pfahllast-Grundgleichung}$$

$$P_m = k_m \cdot \bar{P}_m \quad \text{Korr. Mantelreibung}$$

$$P_s = k_s \cdot \bar{P}_s \quad \text{Korrel. Spitzenwiderstand}$$

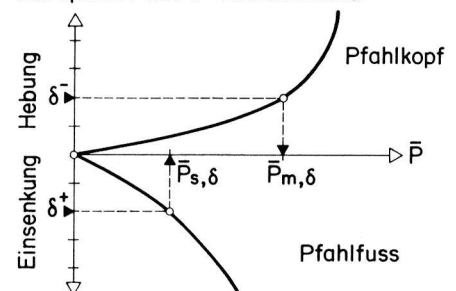
Aufgrund theoretischer Berechnungen (vergleichende FE-Berechnung), ausgeführter Belastungsversuche und anhand von Literaturangaben können zur Bestimmung des Tragverhaltens von Bauwerkspfählen folgende Korrelationsfaktoren als repräsentativ betrachtet werden:

- lange Pfähle ($L/D \geq 20$)
- weicher Boden ($E_s < 20 \text{ N/mm}^2$)
- $k_m = 1,0, k_s = 1,0$
- kurze Pfähle ($L/D \leq 20$)
- steifer Boden ($E_s \geq 50 \text{ N/mm}^2$)
- $k_m = 1,5, k_s = 1,0$

Die theoretische Berechnung ergibt für den Korrelationsfaktor des Spitzenwiderstandes k_s Werte von 1,0 bis 1,2. Die theoretischen Werte für den Korrelationsfaktor der Mantelreibung k_m variieren je nach Randbedingungen zwischen 1,2 und 2,0. Die Wertangabe für $k_m = 1,0 \div 1,5$ und für $k_s = 1,0$ darf als auf der sicheren Seite betrachtet werden. Die Berechnung der Tragfähigkeit des Bauwerkspfahles erfolgt nach der in Bild 8 angegebenen Beziehung.

LAST VERSCHIEBUNGSKURVE

extrapoliert auf $t = \text{Nutzlastdauer}$



LAST - SETZUNGSBERECHNUNG

$$P_\delta = \bar{P}_m, \delta \cdot k_m + \bar{P}_s, \delta \cdot k_s$$

δ zulässige Setzung Bauwerkspfahl
 P_δ zulässige Nutzlast Bauwerkspfahl

Abb. 8
Tragfähigkeitsberechnung aus
Belastungsversuch

Belastungsversuche Viadukt Neugut

Beim SBB-Viadukt Neugut wurden drei Pfahlbelastungsversuche mit Pfahlfusspressen nach dem vorgängig beschriebenen Verfahren ausgeführt. Zwei Versuche (Pfähle 4.2 und 4.5) wurden in Ergänzung zu den konventionellen Pfahlbelastungsversuchen und der dritte Versuch (Pfahl 10.3.) als Ersatz für einen konventionellen Pfahlbelastungsversuch ausgeführt. Wegen undichter Pfahlpresen konnten die Versuche nicht im gewünschten Umfang ausgeführt werden. Obschon die Pressen vorgängig an der EMPA geprüft wurden, müssen sich als Folge zu grosser Pfahlfussverkippen kleinere Undichtigkeiten eingestellt haben. Die Leckverluste störten in der Folge die langfristigen Belastungsversuche zur Bestimmung des lastabhängigen Zeit-Setzungsverhaltens (Kriechmass) und verunmöglichten, dass der Pfahl 4.5 bis zur Bruchlast belastet werden konnte. Unbesehen dieser Schwierigkeiten erwiesen sich die durchgeführten Versuche als sehr wertvoll und dienten mit als Grundlage zur Bemessung der Bauwerksfundation. Das Ergebnis der drei Pfahlfusspressversuche wird nachfolgend kurz diskutiert..

PFAHLBELASTUNGSVERSUCH 1 PFAHL 10.3

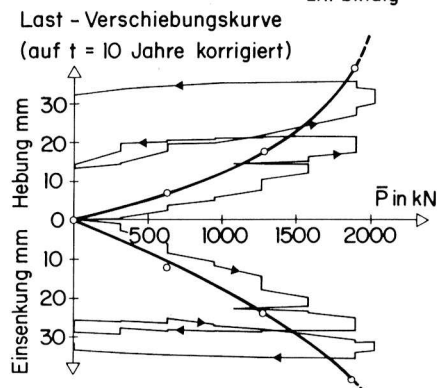
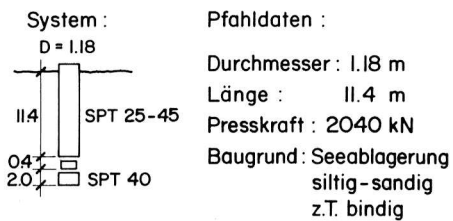


Abb. 9
Belastungsversuch Pfahl 10.3 vor Pfahlmantelinjektion

Versuch Pfahl 10.3

Der Pfahl 10.3 ist ein Bauwerkspfahl mit Durchmesser 1,18 m und 11,4 m Pfahlschaft- und 2 m Pfahlfusslänge. Der Baugrund, spätglaziale siltig-sandige Seeablagerungen mit bindi-

gen Zwischenschichten zeigte SPT-Werte von 25 bis 45 entlang dem Pfahlmantel und 40 am Pfahlfuss. Die Presskraft konnte in 7 Stufen auf maximal 2040 kN gesteigert werden (Bild 9). Bei dieser Last war aber die Grenzkraft des Pfahlmantels bereits um mindestens 100 kN überschritten. Das maximale Kriechmass auf Laststufe 30 bar (1909 kN) betrug 2,5 mm für den Pfahlmantel resp. 1,8 mm für den Pfahlfuss. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ergab für den Pfahl 10.3 ein ungenügendes Tragverhalten. Die errechnete Pfahllast bei einem Setzungsmass von $s = 20$ mm betrug unter Berücksichtigung des Kriecheinflusses und der Systemkorrelationsfaktoren ($k_m = 1,5 \cdot k_s = 1,0$) nur 3600 kN anstelle der geforderten 4400 kN. Infolge der ungenügenden Tragfähigkeit wurden beim Pfahl 10.3 nach dem Belastungsversuch Injektionen zur Verfestigung des Pfahlmantelbereiches ausgeführt. Nach diesen Sanierungsmassnahmen wurde am gleichen Pfahl ein erneuter Belastungsversuch (Bild 10) durchge-

PFAHLBELASTUNGSVERSUCH 2 PFAHL 10.3

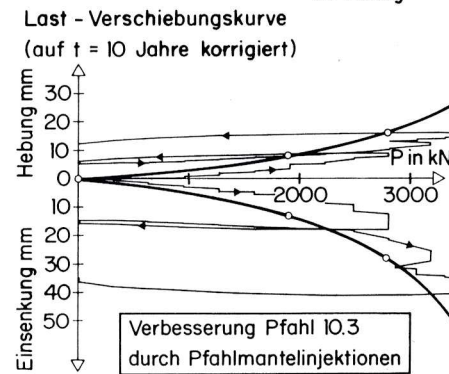
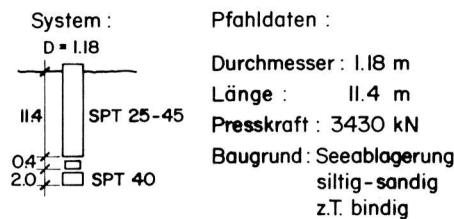


Abb. 10
Belastungsversuch Pfahl 10.3 nach Pfahlmantelinjektion

führt. Ein Vergleich mit dem Ergebnis des unsanierten Pfahles zeigt, dass durch die ausgeführten Pfahlmantelinjektionen eine wesentliche Verbesserung im Tragverhalten erreicht werden konnte. Die errechnete Pfahllast bei einem Setzungsmass von 20 mm beträgt nun 7900 kN anstelle der vormals erreichten 3600 kN. Für die Bruchlast wurde ein Wert von 11900 kN ermittelt.

Versuch Pfahl 4.2

Der Pfahl 4.2 war ein Versuchspfahl, der vorgängig der eigentlichen Pfahlungsarbeit ausgeführt und geprüft wurde. Der Pfahldurchmesser betrug 1,1 m, die Pfahllänge 23,2 m. Der Baugrund besteht aus spätglazialen siltig-sandigen Seeablagerungen mit SPT-Werten von 30 bis 50 entlang dem Pfahlmantel und 70 im Pfahlfussbereich.

Die Presskraft konnte in 7 Stufen bis auf maximal 2620 kN gesteigert werden (Bild 11). Bei dieser Last traten

PFAHLBELASTUNGSVERSUCH PFAHL 4.2

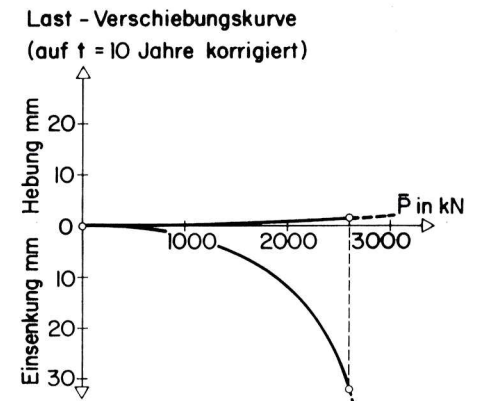
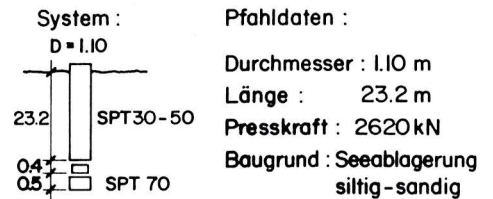


Abb. 11
Belastungsversuch Pfahl 4.2

grosse Pfahlfussverschiebungen auf, die eine weitere Laststeigerung verunmöglichten. Die maximale Pfahlhebung in der letzten Laststufe betrug dagegen nur gerade 1,6 mm. Der Pfahl hatte eine hohe Manteltraglast, aber nur eine eher bescheidene Pfahlfusstraglast. Die zulässige Gebrauchslast des Pfahles ($s = 20$ mm) wurde unter Berücksichtigung von Kriechen und Korrelation auf $P_{zul} = 10200$ kN, die Bruchlast $P_{br} \geq 16000$ kN errechnet. Der Pfahl war in bezug auf die erforderliche Belastung stark überdimensioniert.

Versuch Pfahl 4.5

Der Pfahl 4.5 war, wie der Pfahl 4.2, ein eigentlicher Versuchspfahl. Im Unterschied zum Pfahl 4.2 wurde am Pfahl 4.5 vorgängig des Pfahlfusspressversuches ein konventioneller Pfahlbelastungsversuch mit einer maximalen Prüflast von 7900 kN ausgeführt. Der Pfahldurchmesser beträgt 1,1 m, die Pfahllänge 18,3 m. Der Baugrund ist dem Baugrund bei

Pfahl 4.2 vergleichbar und besteht aus spätglazialen siltig-sandigen Seeablagerungen mit SPT-Werten von 15 bis 60 entlang dem Pfahlmantel und 60 am Pfahlfuss.

Die Presskraft konnte in 8 Stufen bis auf maximal 3440 kN gesteigert werden (Bild 12). Bei dieser Last betrug

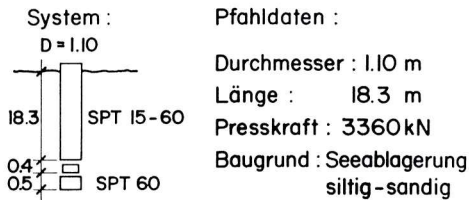
gen nach dem konventionellen Abspann- resp. Ballastverfahren kaum mehr realistisch sein dürfte.

Mit den Versuchen beim SBB-Viadukt Neugut wurden sowohl hinsichtlich der Versuchstechnik als auch der Pfahlbemessung wertvolle Erkenntnisse gewonnen. Bezüglich Versuchstechnik wurde erkannt, dass für eine optimale Versuchsdurchführung der Pressversuch eine Pfahlfusspresse mit Kipplatte, einen Pressfuss von minimal 2 bis 3 Durchmessern Länge und eine Prüftechnik, wie in Kapitel Belastungsversuch umschrieben, erfordert.

Bezüglich der Bemessung von Bohrpfählen mit Durchmessern von 0,9 m bis 1,2 m in einem Baugrund vom Typus des mittleren Glattales – spätglaziale siltig-sandige Seeablagerungen mittlerer bis hoher Lagerungsdichte – wurden für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ($s = 20$ mm) folgende Bemessungswerte als zulässig ermittelt:

Mantelreibung $\tau_m = 60$ kN/m²
 Spitzenwiderstand $\sigma_s = 1200$ kN/m²
 Die Versuche selbst ergaben Werte von ca. 100 bis 120 kN/m² für τ_m und 2100 bis 3400 kN/m² für σ_s . Zur Abdeckung von Unsicherheiten in der Versuchstechnik, im Baugrund und in der Pfahlerstellung sind als Bemessungswerte die versuchstechnisch ermittelten Werte um einen Faktor 1,5 bis 2,0 abzumindern. Die angegebenen Werte gelten aber nicht im Falle bindiger Seeablagerungen oder im Falle starker Störung der Pfahlfusssohle. Für letztere Verhältnisse sind die zulässigen Bemessungswerte noch weiter auf ca. 30 kN/m² für die Mantelreibung resp. 500 kN/m² für den Spitzenwiderstand zu reduzieren.

PFAHLBELASTUNGSVERSUCH PFAHL 4.5



Last - Verschiebungskurve
 (auf $t = 10$ Jahre korrigiert)

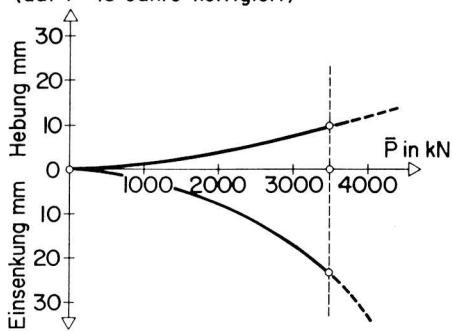


Abb. 12
 Belastungsversuch Pfahl 4.5

die Pfahlfusseinsenkung 15 mm und die Pfahlkopfhebung 8 mm. Wegen eines Lecks in der Pfahlfusspresse konnte keine weitere Laststeigerung mehr vorgenommen werden. Weder das Niveau der Gebrauchslast ($s = 20$ mm) noch das der Grenzlast wurde erreicht. Die entsprechenden Werte können für den Pfahl 4.5 mit $P_g > 11\,000$ kN und $P_{br} > 17\,000$ kN nur approximativ geschätzt werden.

Schlussfolgerungen

Der Pfahlfusspressversuch, als Verfahren zur Prüfung der Tragfähigkeit grosskalibrierter Bohrpfähle, darf als echte Alternative zum konventionellen Pfahlbelastungsversuch gelten. Gewiss liefert der konventionelle Versuch unter sorgfältiger Ausführung eine umfassendere Aussage über das Tragverhalten des Pfahles, hingegen sind für den Pfahlfusspressversuch nur ca. 20 bis 30% der Kosten eines konventionellen Versuches aufzuwenden. Theoretisch erscheint es auch möglich, Pfähle mit einer Gebrauchslast von über 10 MN nach dem Pfahlfusspressverfahren prüfen zu können, während ein Gleiches aus wirtschaftlichen Erwägungen