

Verschiedene Pfahlsysteme und ihr Tragverhalten

Autor(en): **Andres, Franz / Müller, Hans Walter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **95 (1977)**

Heft 13

PDF erstellt am: **19.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73354>

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.

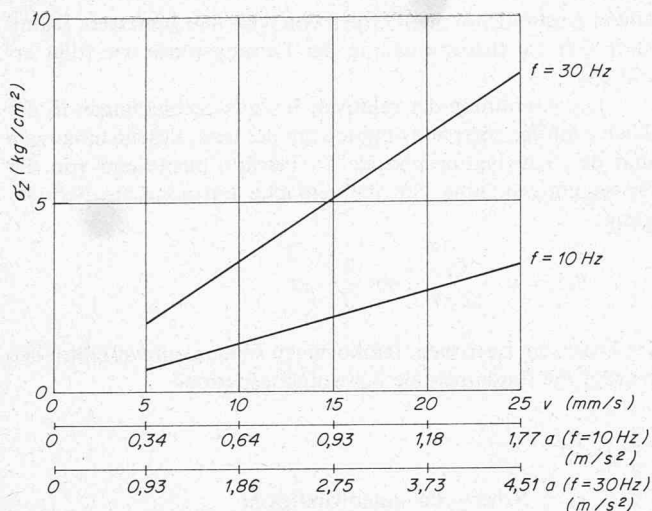


Bild 6. Diagramm der Zusatzspannungen

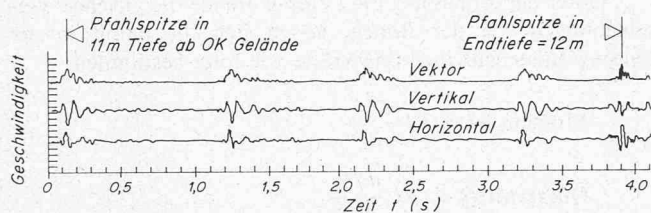


Bild 7. Messstreifen (Geschwindigkeit: ein Teilstrich auf der Ordinate = 1 mm/s).

Max. Vertikalgeschwindigkeit	$v_z = 4 \text{ mm/s}$
Max. Horizontalgeschwindigkeit	$v_r = 5 \text{ mm/s}$
Max. vektoriell addierte Geschwindigkeit	$v_v = 5 \text{ mm/s}$
Frequenz $f = 12 \text{ Hz}$	

nicht erwartet werden, dass die Beanspruchung der Leitung theoretisch genau vorausgesagt werden kann.

Aufgrund der Voruntersuchungen wurde ein Diagramm erstellt, aus welchem in Funktion von Geschwindigkeit und Frequenz der an der Leitung angreifenden Schwingungen die in den Leitungsrohren erzeugten Zusatzspannungen abgelesen werden können (Bild 6).

Im Zuge der ständigen Überwachung während der Rammarbeiten wurden einzelne Muffen der Leitung im interessierenden Bereich oberflächlich freigelegt. Es wurde jeweils auf der dem Rammort nächstgelegenen Muffe ein Geophon zur Messung der Schwingungswerte in 3 Dimensionen installiert. Von jeder Pfahlrammung bei Pfeiler B wurden Zeit/Geschwindigkeit-Diagramme aufgenommen (Bild 7). Die beobachteten Maximalwerte sind die folgenden:

v_{max} (vekt. add.)	= 15 m/s
a_{max}	= 93 m/s ²
f_{max}	= 25

Die erzeugten max. Zusatzspannungen in den Rohren betrugen somit 4 kg/cm² und erreichten knapp 20 Prozent der bei Nenndruck bis Zero compression ausnützbarer Spannungsreserve. Die laufend durchgeführten Verschiebungsbeobachtungen zeigten keinerlei signifikante Werte. Als Pfähle kamen 12 m lange konische vorgespannte Schleuderbetonpfähle $\varnothing 35/17 \text{ cm}$ der Firma Losinger zur Anwendung. Die Pfähle wurden mit einer Freifallramme bis zum Festsitzen in der kompakt gelagerten Moräne gerammt (Bild 8).

Die Daten der Ramme sind folgende:

Bärgewicht:	5 to
Schlaghöhe:	50 cm
Schlagfrequenz:	ca. 50 Schläge pro Minute
Rampolster:	aus Holz

Die maximalen Erschütterungen an der Leitung traten während des Festschlagens der Pfähle in der Moräne auf.

Bauherr:	Schweizerische Bundesbahnen, Kreis II
Projektierender Ingenieur und Bauleitung:	Ingenieurbüro Weber & Angehrn, Solothurn

Adressen der Verfasser: J. Stöcklin, dipl. Ing. ETH, Sektionschef Tiefbau, SBB, Kreis II, Luzern; F. Werder, dipl. Ing. ETH, SBB, GD, Bern, vormals Marti AG, Bern; P. Friedli, dipl. Ing. ETH, Geotechnik, Kreuzbühlstrasse 8, 8008 Zürich.



Bild 8. Rammen der Pfähle

Verschiedene Pfahlsysteme und ihr Tragverhalten

Von Franz Andres und Hans Walter Müller, St. Gallen

Ein bekanntes Textilwerk im Vorarlberg verfügt im unteren Rheintal über grössere Landreserven, die in den nächsten Jahren etappenweise zwecks Werkerweiterung überbaut werden sollen. Allgemein ist bekannt, und an den bestehenden Bauten lässt sich auch erkennen, dass der Untergrund, bestehend aus jungen Verlandungssedimenten, bis in grosse Tiefen als stark zusammengedrückt anzusehen ist und vermutlich Pfahlgründungen verlangt. Zur Vorabklärung gelangten deshalb einige verrohrte Kernbohrungen bis auf eine Tiefe von 30 m zur Ausführung.

Geologische und bodenmechanische Gesichtspunkte

Der Schichtaufbau, wie auch die Lage des Grundwasserspiegels gehen aus dem Profil der Kernbohrung KB4 hervor, die mit den anderen drei Bohrungen mehr oder weniger identisch ist (Bild 1).

Bereits nach Abschluss der ersten Sondierbohrung stand fest, dass das Bauvorhaben relativ schwierige erdbaumechanische Probleme aufgeben wird. Aus der «siltig»-torfigen Verlandungsserie wurden deshalb ungestörte Bodenproben mit dem Kolbenentnahmegerät gewonnen und im Erdbaulabor auf

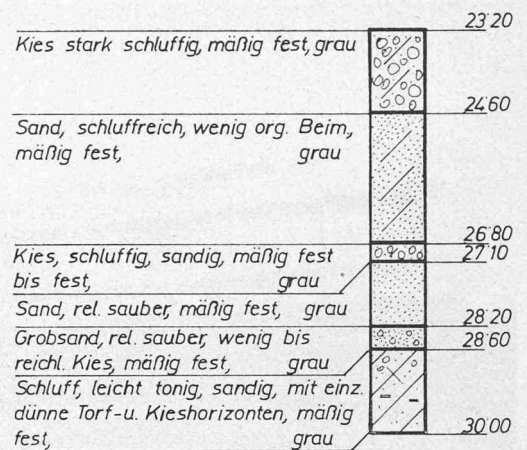
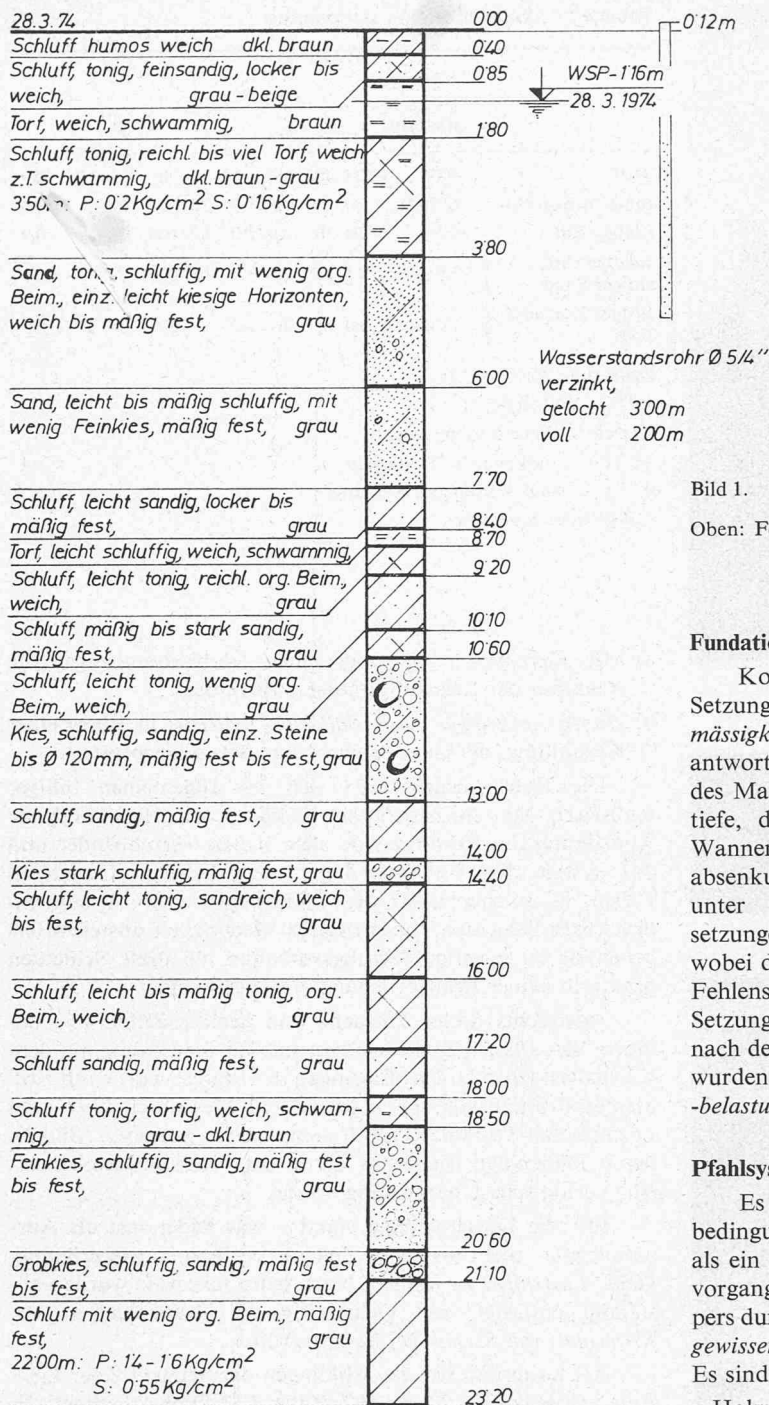


Bild 1. Links: Profil der Kernbohrung KB 4

Oben: Fortsetzung

Fundationstechnische Folgerungen

Konventionelle Flachfundationen sind infolge der grossen Setzungsempfindlichkeit des Untergrundes sowie der *Unregelmässigkeiten im Schichtverlauf* – wie erwartet – nicht zu verantworten. Es wäre einzig eine Plattenfundation unter Wahrung des Massenausgleichsprinzips denkbar, wobei allerdings eine tiefe, durchgehende Unterkellerung der Gebäude, isolierte Wannenkonstruktionen und eine temporäre Grundwasserabsenkung notwendig würden. Man war sich daher einig, dass unter den gegebenen geologisch-geotechnischen Voraussetzungen nur eine *Tiefgründung* in Frage kommen kann, wobei die technischen Möglichkeiten einer Pfähligung – infolge Fehlens einer eindeutigen Pfahltragschicht – primär durch das Setzungsverhalten bestimmt würden. Zur Klärung der Frage nach dem zweckmässigsten und wirtschaftlichsten Pfahlsystem wurden im geotechnischen Gutachten *Proberammungen und -belastungen* verschiedener Pfahltypen vorgeschlagen.

Pfahlsysteme und -längen

Es war zu erwarten, dass unter den gegebenen Untergrundbedingungen ein sog. «*Verdrängungspfahl*» bessere Resultate als ein Bohrpfahl ergeben würde, weil aus dem Herstellungsvorgang zumindest in der nächsten Umgebung des Pfahlkörpers durch die Verdrängungswirkung im allgemeinen mit einer gewissen *Verbesserung der Bodeneigenschaften* zu rechnen war. Es sind dies:

- Holzpfähle
- Eisenbetonfertigungspfähle
- Ortsbetonrammpfähle.

Beim *Eisenbetonpfahl* wurde die *konische Version mit rundem Querschnitt* gewählt, dem ein besonders gutes Tragverhalten nachgerühmt wird. Zudem konnte ihm ein *Holzpfehl* von praktisch denselben Abmessungen gegenübergestellt werden: Zopf-Ø 22 cm, Stamm-Ø 33 cm.

Der gerammte *Ortbetonpfahl* System «Delta» wies ein Rammrohr von Ø 47 cm auf. Der Zwiebeldurchmesser dürfte etwa 70–80 cm erreicht haben.

Diese Pfähle wurden auf die *erste Kiesschicht* (10,60 bis 13,00 m) aufgesetzt.

Dem Bohrpfahl fiel eine inferiore Rolle zu, da unter den gegebenen Untergrundverhältnissen ein ungünstiges Tragverhalten zu erwarten war. Dessen positive Eigenschaften wie Lärmarmut, Durchfahren von Hindernissen usw. fielen im vorliegenden Falle nicht ins Gewicht. Um eine abgerundete Vergleichsmöglichkeit zu erhalten, wollte man auf diese Pfahlart

ihre Bodenkennziffern untersucht. Die Entnahme strukturell ungestörter Bodenproben aus den inkohärenten Bodenarten (Silt-Sand-Kies) war praktisch nicht möglich. Die in der Tabelle den rolligen Bodentypen zugeordneten Kennziffern stellen daher lediglich *geschätzte Mittelwerte* bzw. *Erfahrungswerte* dar (Tabelle 1).

Die mit Hilfe des Oedometers an den tonig-torfigen Proben ermittelten *Zusammendrückungsmoduli* sind erwartungsgemäss *sehr niedrig* ausgefallen und lassen auf eine *extrem hohe Setzungsempfindlichkeit* der Verlandungssedimente schliessen. Ähnlich ungünstig sind auch die Stabilitätseigenschaften des Baugrundes zu taxieren, indem es sich bei den organogenen Schichtgliedern um ein ausgesprochenes $\Phi = 0$ -Material handelt, das bei kurzfristiger Belastung zum Aufbau hoher Porenwasserspannungen neigt und damit ein erhöhtes Grundbruchrisiko bedingt.

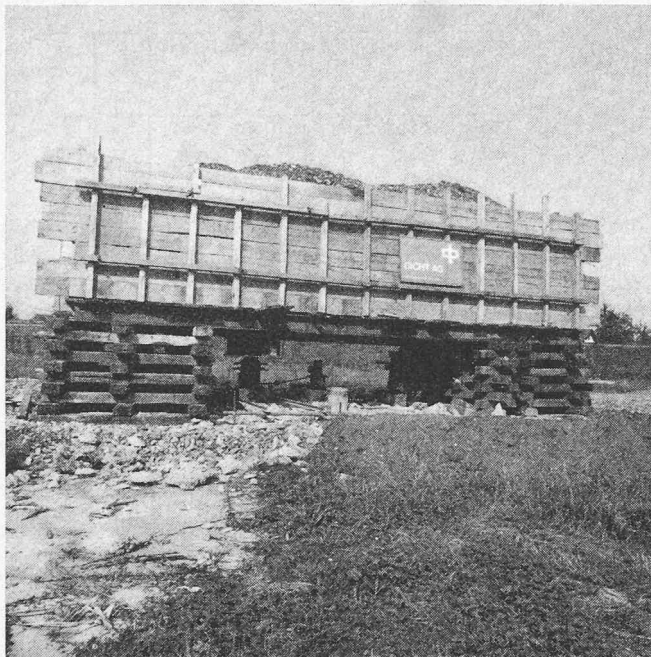


Bild 2. Behälter mit Kiesballast (200 t)

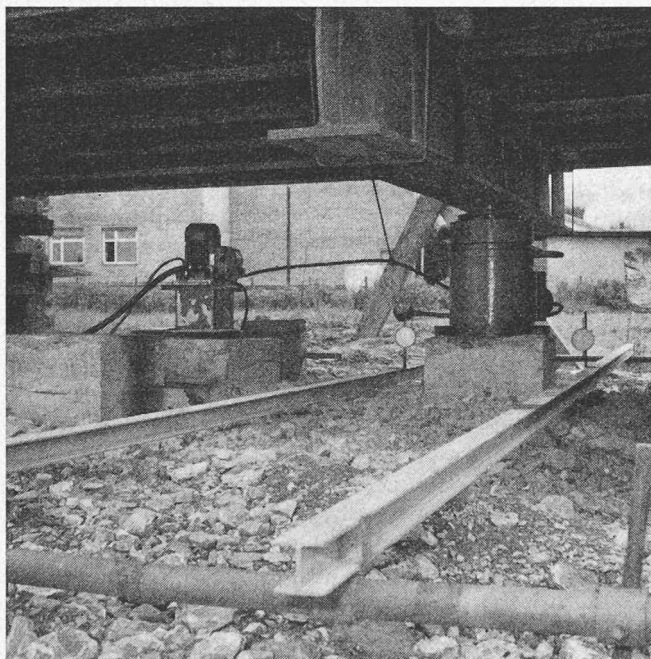


Bild 3. Belastungs- und Messeinrichtung

nicht verzichten, ohne allerdings grosse Erwartungen an den Belastungsversuch zu knüpfen.

Die Wahl fiel auf einen Pfahldurchmesser von 70 cm, um eine ähnlich grosse Aufstandfläche wie die Fusszwiebel des Delta-Pfahles zu erhalten. Von einem Abstellen auf die oberste Kiesschicht erhoffte man sich wenig und führte ihn auf die tiefere Kieslage (18,50–20,60 m) mit einer Pfahllänge von rund 18,60 m.

Zum Vergleich wurde daneben ein zweiter Delta-Pfahl gleicher Länge mit Fusszwiebel hergestellt.

Belastungseinrichtung und -resultate

Grundsätzlich bieten sich zwei Möglichkeiten, um an einem Pfahl vertikale Druckbelastungen zu erzeugen:

Tabelle 1. Kennziffern der Bodenarten

	USCS-Klassifikation	w	γ	M_e	Φ'	c'
Torf	PT	200–400	1,0–1,1	5–10	~20	0
tonig-toniger Silt	CL-OL	30–50	1,5–1,7	20–50	20–24	0,1
toniger Silt	CL	20–30	1,9–2,0	50–100	26–28	0,1
sandiger Silt	SM-ML	15–25	2,0–2,1	~200	32–34	0
siltiger Sand						
siltiger Kiessand	GM-ML	10–15	2,1–2,2	~500	34–36	0
Kies						

Bedeutung der Symbole:

w (%): Wassergehalt

γ (g/cm³): Feuchtraumgewicht

M_e (1,0 — e) (kg/cm²): Steifeiziffer

Φ' (°): Winkel der inneren Reibung

c' (kg/cm²): Kohäsion

a) Mit *Zugpfählen*, die über einen Verbindungsträger die Reaktion der Belastungspresse aufnehmen;

b) Durch *Aufbringen eines Ballastes*, meistens in Form einer Kiesfüllung, als Gegengewicht zur Belastungspresse.

Die erste Lösung lässt sich im allgemeinen billiger realisieren. Man muss sich aber im klaren sein, dass bei dieser Anordnung die Resultierende aller Kräfte verschwindet und das System den Untergrund gar nicht belastet. Gerade in Fällen, in welchen unter den Pfahlsitzen noch zusammen-drückbare Schichten von grösserer Mächtigkeit anstehen, ergeben sie zu günstige Setzungsverhalten, da diese Schichten praktisch keiner Beanspruchung ausgesetzt sind.

Angesichts dieser Tatsache und gemäss Ziffer 4.52 der Norm SIA 192 [1] entschied man sich für die Lösung mit dem Kiesballast (Bild 2). Das Einsinken des Pfahles wurde mit zwei diametral am Pfahlkopf angebrachten Messuhren über zwei Leichtmetall-Tastbalken auf 1/100 mm genau gemessen (Bild 3), deren Höhenlage wiederum durch ein Präzisionsnivelllement eine periodische Überprüfung erfuhr.

Für die Durchführung stand – was leider fast als Ausnahme gilt – mehr als genug Zeit zur Verfügung, was erlaubte, *kleine Laststufen* zu wählen. Nach jeder Laststufe wurde vollständig entlastet, um gleichzeitig die Brauchbarkeit des *Kriteriums von Széchy* [2] zu überprüfen.

Als Kriterium für das Abklingen der Setzung einer Laststufe wurde das der Norm 192 (Ziffer 4.57.5) übernommen. Es liess sich aber nur etwa in der Hälfte aller Fälle anwenden. Als Grund dürfen die bei kleinen Einsenkungen immer gewichtiger werdenden *Streuungen der Messwerte* angesehen werden, die aus der labilen Bodenoberfläche resultieren. Die Zeit-Setzungslinien machten gänzlich unmotivierte Sprünge, die mit dem Abklingen nichts zu tun hatten, sondern von *Eigenbewegungen des Untergrundes* herrührten.

Wie zu erwarten war, erfolgte das *Abklingen der Setzungen sehr langsam*. Es dauerte mehr als 6 Monate, bis alle Belastungen durchgespielt waren! Mit dieser Feststellung seien besonders all jene angesprochen, die heute noch glauben, Probebelastungen an Pfählen innert ein paar Tagen mit verlässlichen Resultaten über die Bühne bringen zu können.

Die Beurteilung der «zulässigen Tragkraft» nach den Sicherheitskriterien gegenüber Grundbruch war in keinem der Fälle anwendbar, weil die Krümmung der Druck-Setzungslinien zwar stetig zunahm, aber nie eine vertikale Tangente erreichte.

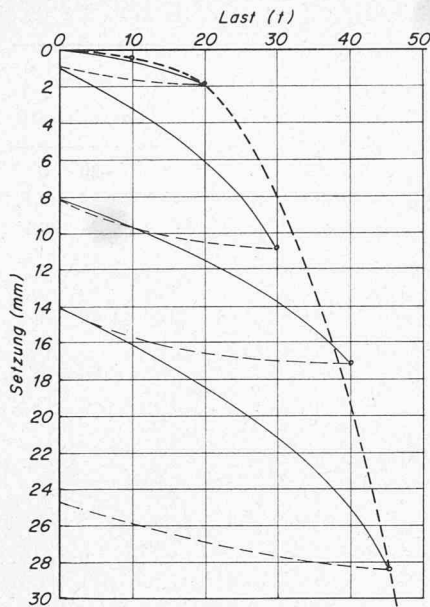
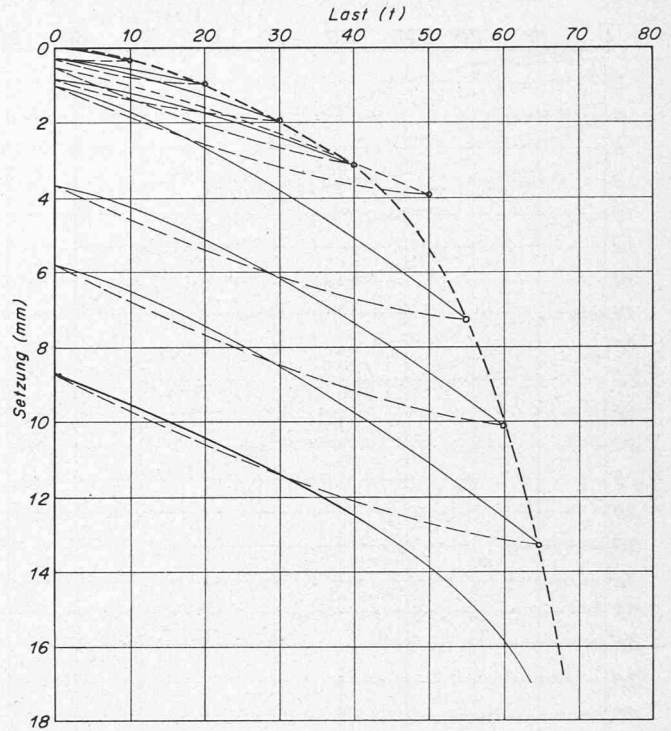


Bild 4 (oben). Belastungs-Setzungsdiagramm Betonfertigpfahl (konisch), $L = 10,60$ m

Bild 6 (rechts). Belastungs-Setzungsdiagramm Ort beton-Rammpfahl, $L = 10,60$ m



Die zulässige Setzung als Bewertungskriterium hat unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung zu erfolgen, die im vorhandenen Untergrund ohne Zweifel auftritt. Ohne Fundationsentwurf lässt sich auch bei Vorhandensein einer Druck-Setzungslinie des Einzelpfahles in dieser Richtung nichts Brauchbar-Verbindliches abschätzen.

Das Széchy-Kriterium wiederum ergibt keine stetigen Kurven, bei denen ein Extremwert ohne *Ausgleich* erkennbar wäre. Dagegen ist uns durch den von Széchy inspirierten Vergleich der bleibenden und elastischen Setzungen aufgefallen, dass bei allen untersuchten Pfählen die bleibenden Einsenkungen bis zu jenen Belastungen relativ klein bleiben, die wir «subjektiv als zulässige Tragfähigkeit empfanden». Es scheint uns denkbar, dass dieser Vergleich ein Kriterium darstellen könnte, um die zulässige Tragkraft in solchen Fällen zuverlässiger zu bestimmen.

Tragverhalten

Es wird repräsentiert durch die Kurven in Bild 4-8.

Schleuderbetonpfahl

Belastungsdauer: 18 Tage

Bis 20 t nur geringe Einsenkungen (2 mm). Nachher rasche Zunahme der Setzungen, vermutlich durch Überwinden der Mantelreibung. Stark plastisches Verhalten bei den einzelnen Laststufen.

Holzpfehl

Belastungsdauer: 13 Tage

Bei genau gleicher Geometrie wie beim Schleuderbetonpfahl sind zwar die Anfangssetzungen etwas grösser, die Druck-Setzungslinie läuft aber erheblich flacher. Bei 40 t ist die

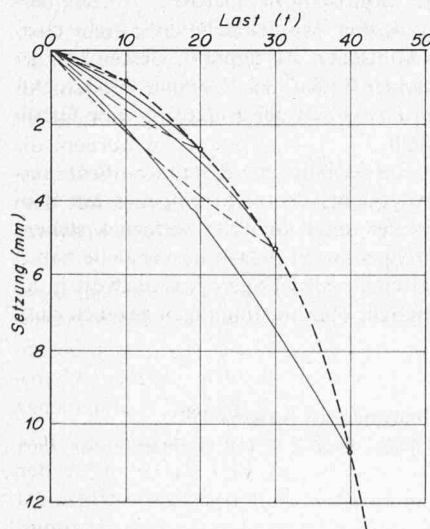


Bild 5. Belastungs-Setzungsdiagramm Holzpfehl, $L = 10,60$ m

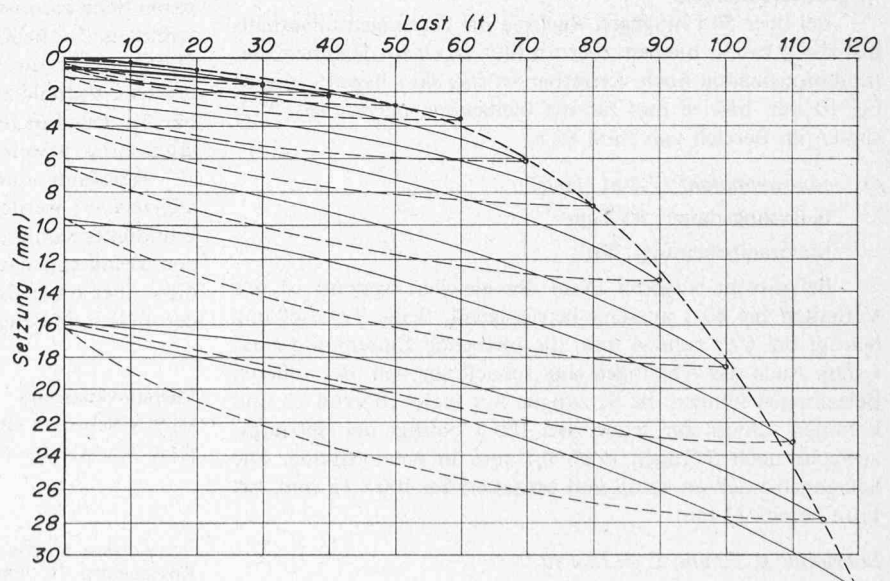


Bild 7. Belastungs-Setzungsdiagramm Ort beton-Rammpfahl, $L = 17,40$ m

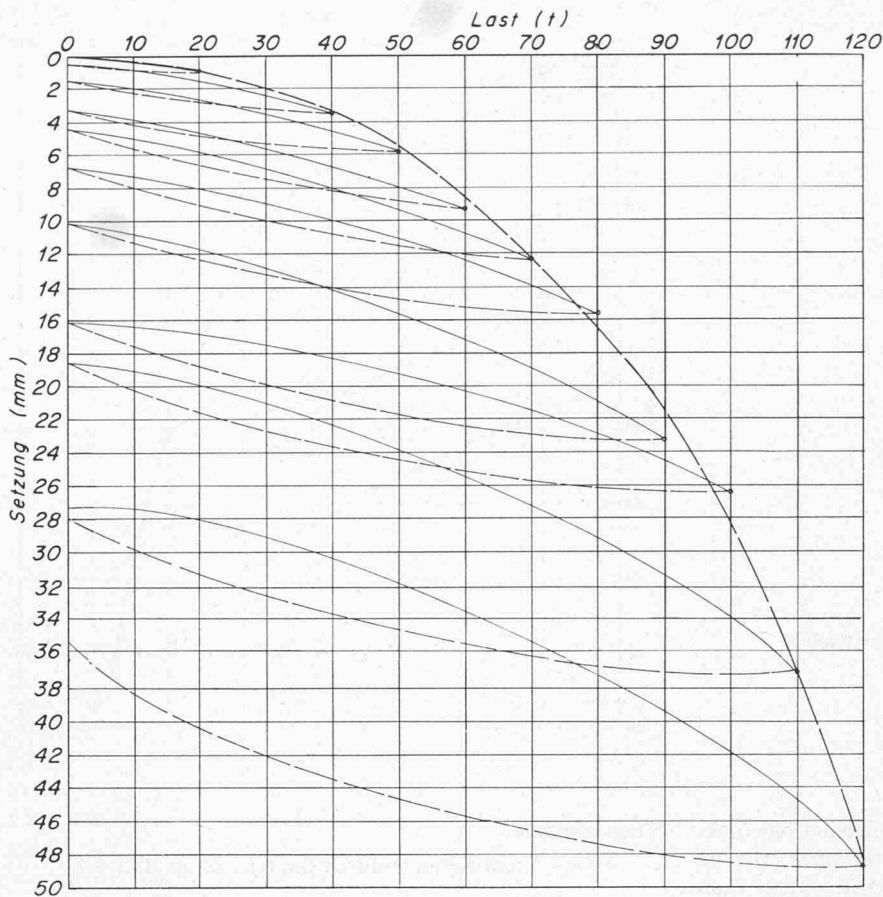


Bild 8. Belastungs-/Setzungsdiagramm Bohrpfahl, $L = 18,40$ m

Einsenkung fast nur die Hälfte (10,8 mm gegenüber 19,5 mm). Belastung und Entlastung verlaufen völlig elastisch, vermutlich bedingt durch das Phänomen des Festsaugens. Ein eindeutiger Pluspunkt für den Holzpfehl!

Ortbetonrammpfahl 10,6 m (kurz)

Belastungsdauer: 21 Tage

Der Pfahl verhält sich bis auf die Laststufe 50 t praktisch wie ein stehender Pfahl; die Setzungen sind für die schlechten Bodenverhältnisse sehr klein und vor allem verblüfft die Tatsache, dass die bleibenden Einsenkungen innerhalb eines Millimeters bleiben.

Bei über 50 t hingegen wachsen die Setzungen unverhältnismässig rasch, bleiben aber absolut in einem Rahmen, der fundationsmässig noch vertretbar ist (bei 60 t liegen sie noch bei 10 mm bzw. 6 mm für die bleibenden Setzungen). Versinken im Bereich von rund 65 t.

Ortbetonrammpfahl 17,4 m (lang)

Belastungsdauer: 43 Tage

Maximalbelastung: 120 t

Bei diesem längeren Pfahl des gleichen Systems ist das Verhalten bis 60 t äusserst befriedigend. Seine Totalsetzung beträgt bei 60 t rund 4 mm, die bleibende Einsenkung rund 1 mm. Auch das Abklingen geht schnell vor sich. Bei höheren Belastungen klingen die Setzungen nur mehr zögernd ab und kommen schwer zur Ruhe. Bei 100 t beträgt der Setzungszuwachs nach 5 Tagen noch 0,1 mm in einer Stunde. Die Setzungen wachsen stetig und erreichen bei 100 t 18 mm, bei 110 t bereits 23 mm.

Bohrpfahl $\varnothing 70$ cm, $L = 18,4$ m

Belastungsdauer: 85 Tage

Wie erwartet, verhält sich der Bohrpfehl wesentlich ungünstiger als die Verdrängungspfähle. Die Setzungen wachsen stetig. Weder die grössere Länge noch der grössere Umfang fallen ins Gewicht.

Zusammenfassung

Bevorzugter in diesem Vergleiche – auch hinsichtlich der Kosten-Nutzen-Relation – bleibt eindeutig der *gerammte Ortbetonpfahl*. Es zeigt sich hier sehr schön, wie leistungsfähig dieses Pfählungsverfahren gerade in Verlandungsböden mit ihren stark wechselnden und zum Teil stark zusammendrückbaren Schichten ist. Der Bohrpfehl bei gleichem Spitzenquerschnitt und erheblich grösserer Mantelfläche enttäuscht eher. Dasselbe gilt für den konischen Fertigpfahl, dessen oft gepriesene Vorteile in weichen Böden hier in keiner Weise sichtbar werden. Für *leichte Lasten* hat der *Holzpfehl* seine Qualitäten unter Beweis gestellt.

Bestimmt dürfen die erhaltenen Resultate *nicht verallgemeinert* werden. Angesichts der recht eingehenden Baugrunduntersuchung und der unter keinerlei Zeitdruck stehenden, peinlich genau durchgeführten Belastungsversuche haben diese aber ohne Zweifel einen gewichtigen Aussagewert in all den Fällen, in denen ähnliche Randbedingungen gegeben sind.

Literaturverzeichnis

- [1] SIA-Norm 192 «Pfahlfundationen», Ausgabe 1975.
- [2] K. Széchy: «Der Grundbau», Band 2, 2. Teil, Springer Verlag, 1965.

Adresse der Verfasser: F. Andres, dipl. Ing. ETH, c/o Dicht AG, Rosenbergstr. 76, 9016 St. Gallen, und H. W. Müller, dipl. Ing. ETH, c/o Grundbauberatungs AG, Teufenerstr. 25, 9000 St. Gallen.