

Vergleichende Auswertung von Probelastungen der DB an Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund

COMPARATIVE EVALUATION OF DB LOADING TESTS ON LARGE BORED PILES IN COHESIONLESS SUBSOIL

von H.G. Kempfert *)

ZUSAMMENFASSUNG Die Ergebnisse von 6 Probelastungen an Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund mittlerer und großer Festigkeit werden vergleichend ausgewertet und mit den Tragfähigkeitsangaben der Vornorm DIN 4014 Teil 2, Ausgabe September 1977, in Beziehung gesetzt. An 5 Probepfählen wurden der Spitzendruck und die Mantelreibung im Versuch getrennt gemessen und konnten mit den Untergrundfestigkeiten verglichen werden. Die Versuchsergebnisse liegen deutlich über den Normwerten und liefern eine Grundlage für die Abschätzung der Tragfähigkeit von Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund großer bis sehr großer Festigkeit.

SUMMARY Results of 6 loading tests on large bored piles in cohesionless subsoil of medium and high strength are subjected to comparative evaluation and are related to the bearing capacity values given in the tentative standard DIN 4014, part 2, edition of September 1977. On 5 test piles, point pressure and skin friction were measured separately to allow a comparison with the strengths of the subsoil. Test results are clearly higher than standard values and yield a basis for assessing the bearing capacity of large bored piles in cohesionless subsoil of high to very high strength.

EINLEITUNG

Zur Bestimmung der vertikalen Tragfähigkeit von Großbohrpfählen gibt die Vornorm DIN 4014, Teil 2, Ausgabe September 1977, ein empirisch abgeleitetes Verfahren an, bei dem eine Last-Setzungslinie aus Tabellenwerten für den Spitzendruck und die Mantelreibung berechnet wird. Darüber hinaus kann die Tragfähigkeit auf der Grundlage von vergleichbaren Probelastungsergebnissen - die leider wegen der verhältnismäßig hohen Kosten selten vorliegen - bestimmt werden.

Grundlage der Tabellenwerte der Vornorm DIN 4014 Teil 2 für nichtbindige Böden waren die Ergebnisse von etwa 55 Pfahlprobelastungen. Der größte Teil davon stammte aus Versuchsreihen an Großbohrpfählen, die in Fein- und Mittelsanden mittlerer Festigkeit (Sondierspitzenwiderstand $q_s = 10$ bis 15 MN/m^2) hergestellt wurden (z.B. FRANKE/GARBRECHT 1977). Bei der z. Zt. laufenden Überarbeitung der Vornorm DIN 4014 Teil 2 werden die o.g. Tabellenwerte durch neuere Probelastungsergebnisse weiter empirisch abgesichert oder ggf. modifiziert.

Nachfolgend werden die Ergebnisse von 6 neueren im Rahmen von Baumaßnahmen der Deutschen Bundesbahn ausgeführten Probelastungen an Großbohrpfählen in nicht-

bindigem Untergrund mitgeteilt. Der Baugrund bestand dabei vorwiegend aus Kiessanden mittlerer und großer Festigkeit, für die bisher nur wenige gesicherte Erfahrungen im Hinblick auf die vertikale Tragfähigkeit vorlagen. Insofern ist es das Ziel dieses Beitrages, eine auf die Norm ausgerichtete Auswertung der Probelastungsergebnisse zusammenfassend mitzuteilen und im Hinblick auf die Überarbeitung der Vornorm DIN 4014 Teil 2, Ausgabe September 1977, allgemein zur Diskussion zu stellen.

Auf die Darstellung der Baumaßnahmen, die Anlaß zu den Probelastungen waren, eine ausführliche Beschreibung der Durchführung der Probelastungen und die speziell auf die Baumaßnahmen ausgerichtete Ergebnisauswertung wird im Rahmen dieses Beitrages verzichtet, da darüber besondere Veröffentlichungen in Vorbereitung sind (z.B. FORST/SIEMER 1982).

AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Bei den ausgeführten Probelastungen wurden - außer beim Versuch Oberstimm I - der Pfahlspitzendruck und der Dehnungsverlauf über die Pfahltiefe in mehreren Meßquerschnitten getrennt gemessen. Die Auswertung der Pfahlversuche erfolgte durch die mit der Pfahlherstellung und Belastungsdurchführung beauftragten Firmen derart, daß mit dem aus den Meßergebnissen abgeschätzten E-Modul des bewehrten Pfahl-

*) Dipl.-Ing. H.-G. Kempfert, Bundesbahn-Zentralamt München

betons die in den Meßquerschnitten noch wirksamen Pfahlkräfte über die gemessenen Verformungen errechnet wurden. Die Angaben zum Kraftverlauf in den Meßquerschnitten waren Grundlage der hier dargestellten Versuchsauswertung hinsichtlich Pfahlspitzendruck und Mantelreibung. Dabei wurde aus der Differenzpfahlkraft und der Pfahlumfangsfläche zwischen 2 Meßquerschnitten ein mittlerer Mantelreibungswert τ_m errechnet und mit den über diesem Bereich gemittelten Schlagzahlen der schweren Rammsonde pro 10 cm Eindringung \bar{n}_{10} in Beziehung gesetzt. Um möglichst wenig Annahmen der Auswertung vorgeben zu müssen, sind die der Mantelreibung zugeordneten gemittelten Baugrundfestigkeitsbereiche, ausgedrückt durch \bar{n}_{10} , in der Regel über die Höhe zwischen zwei Meßebenen gewählt, so daß sich die Festigkeitssprünge im Baugrund in Höhe der Meßquerschnitte ergaben. Wenn diese Vorgehensweise aufgrund der Ergebnisse der schweren Rammsondierungen nicht zu vertreten war, mußten zusätzliche Annahmen hinsichtlich der Aufteilung der Mantelreibung erfolgen. Eine von verschiedenen Stellen vorgenommene Auswertung derselben Probelastungsergebnisse kann, je nach eingebrachten Annahmen zur Anpassung der Mantelreibung an die tatsächlichen Baugrundfestigkeiten, unterschiedliche Ergebnisse in der Mantelrei-

bungsverteilung liefern (vgl. z.B. CHRISTOW 1980, FORST/SIEMER 1982).

Bei dem Vergleich der Probelastungs- und Normenwerte wurde für die Zuordnung von Sondierspitzenwiderstand q_s und mittlere Schlagzahlen \bar{n}_{10} der schweren Rammsonde (SRS) nach FRANKE (1973) näherungsweise von der Beziehung $q_s \approx \bar{n}_{10} \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ausgegangen.

ERGEBNISSE DER PROBELASTUNGEN

1. Versuche Düsseldorf

Im Zuge des Bauvorhabens Düsseldorf Hbf, Ost-West-S-Bahn und U-Bahn-Unterfahrung, wurden zwei Probelastungen an Großbohrpfählen \varnothing 150 cm von jeweils rd. 9,5 m (Pfahl 1) und rd. 15,5 m (Pfahl 2) Länge im September 1980 ausgeführt (vgl. Bild 2 und 4). Die Pfähle binden in Sand-Kies-Gemische ein. Oberhalb des Pfahlfußes 2 befindet sich eine rd. 1 m mächtige bindige Zwischenschicht. Dieser Pfahl steht direkt auf den darunterfolgenden Kiessanden.

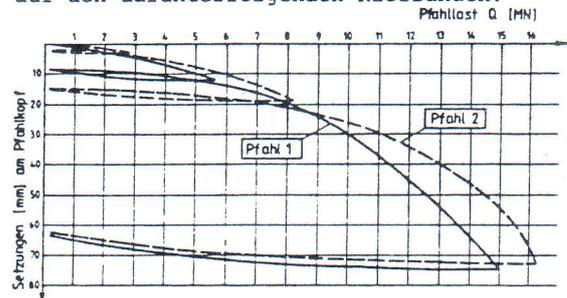


Bild 1 Last-Setzungslinien

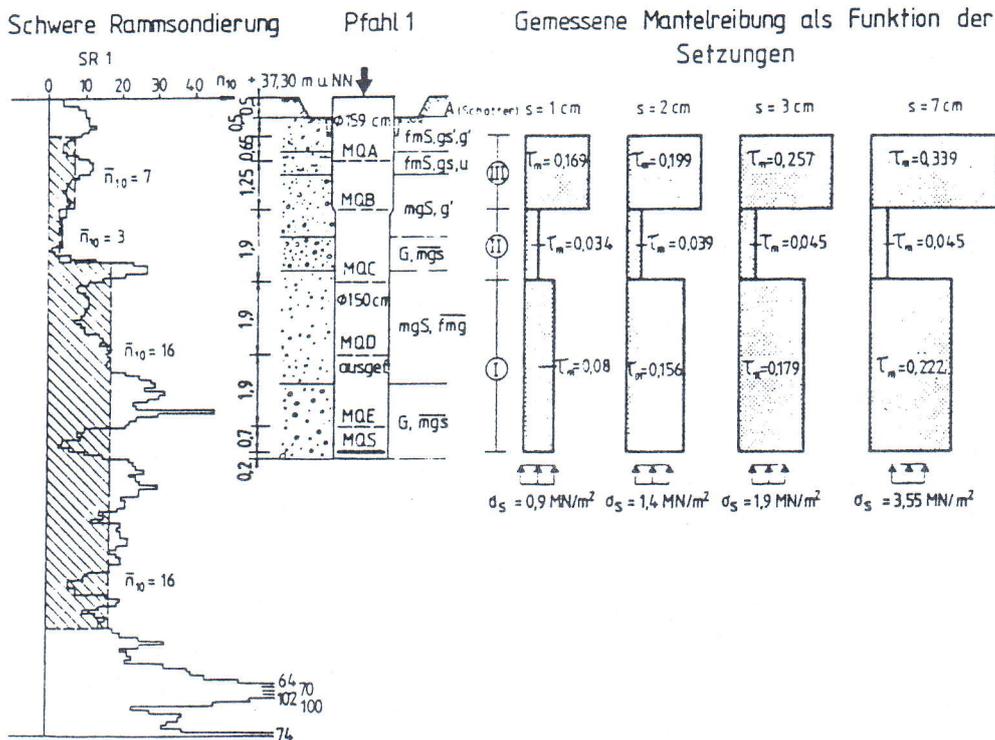


Bild 2 Sondierprofil, Probepfahl 1, Mantelreibung und Spitzendruck

Bauherr: Bundesbahndirektion Köln
 Baugrundgutachten: Ingenieurgemeinschaft
 Grabhoff-Schütz-Siemer,
 Wuppertal
 Durchführung der Probelastung: Bilfinger
 + Berger Bau AG, Mann-
 heim.

Die Pfahllasten wurden in mehreren Laststufen mit Erst- und Wiederbelastung aufgebracht. Die Last-Setzungslinien (Ruhekurven sind in Bild 1 dargestellt. Bei einer Setzungsgeschwindigkeit $< 0,005 \text{ mm/min}$ wurde die nächsthöhere Laststufe aufgebracht. Der Kraftverlauf über die Pfahltiefe wurde mit Verformungsaufnehmern (Fa. Losinger) in 5 (Pfahl 1) bzw. 7 (Pfahl 2) Meßebenen gemessen. Jede Meßebene bestand aus 4 Aufnehmern, die um je 90° versetzt an der Bewehrung eingebaut waren. Der E-Modul des bewehrten Pfahlbetons wurde aus dem Kraftverformungsverlauf bis zur Meßebene A sowie durch Extensiometermessungen zu einem konstanten Auswertemodul von $E = 32000 \text{ MN/m}^2$ abgeschätzt. Von den insgesamt 48 Aufnehmern sind ein unerwartet hoher Anteil von 10 Aufnehmern an Pfahl 1 und 8 Aufnehmern an Pfahl 2 ausgefallen, so daß die Auswertung mit etwas größeren Unsicherheiten behaftet ist. In den Meßebenen D (Pfahl 1) und G (Pfahl 2)

konnte keine Auswertung erfolgen. Bilder 2 und 4 zeigen die erläuterte Auswertung der mittleren Mantelreibungsverteilung und Bilder 3 und 5 die Entwicklung der Mantelreibung mit zunehmender Setzung.

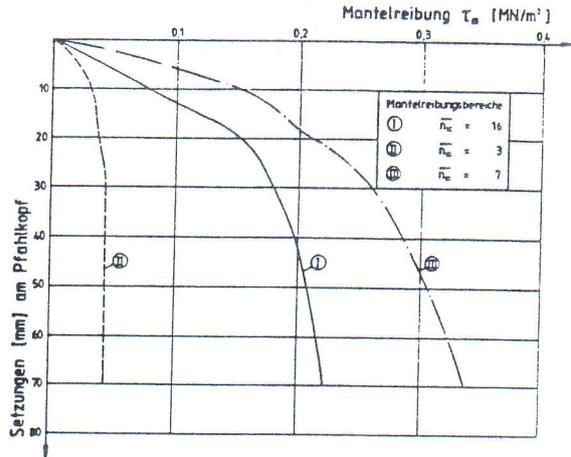
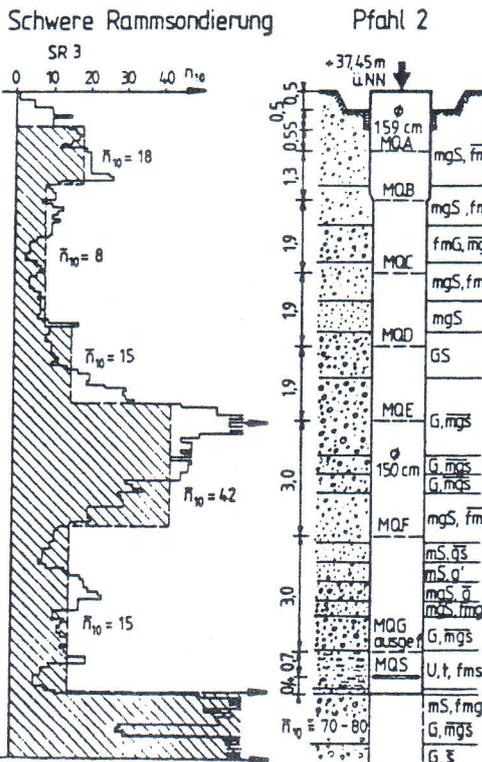


Bild 3 Mantelreibungs-Setzungslinien Pfahl 1

Dabei fällt der hohe Mantelreibungsanteil im oberen Pfahlbereich auf, der auf die von VESIĆ (1965) hingewiesene Gewölbekonstruktion hindeuten könnte.



Gemessene Mantelreibung als Funktion der Setzungen

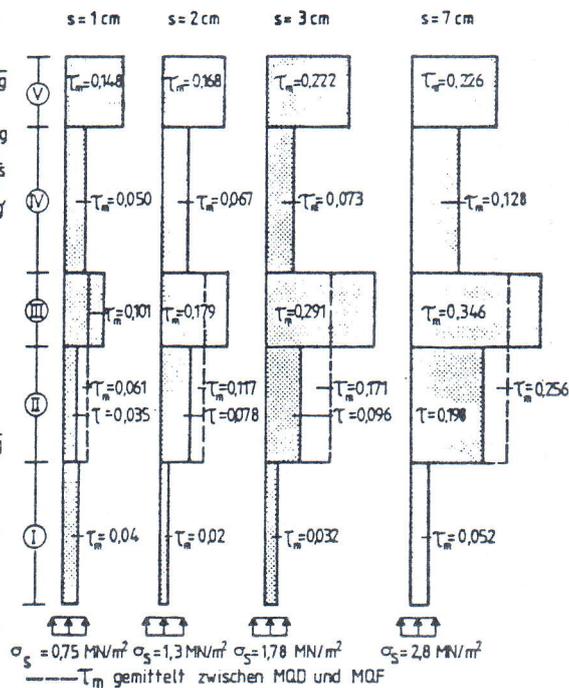


Bild 4 Sondierprofil, Probelpfahl 2, Mantelreibung und Spitzendruck

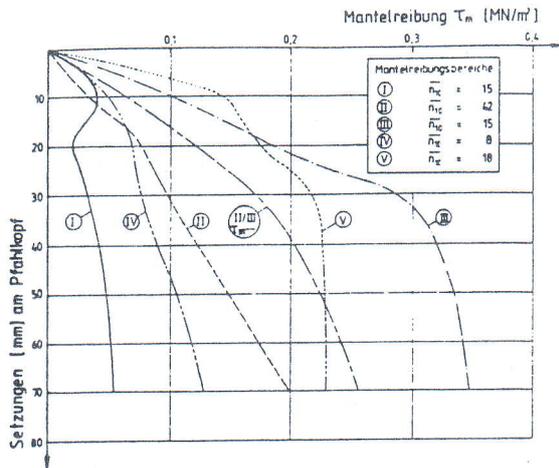


Bild 5 Mantelreibungs-Setzungslinien Pfahl 2

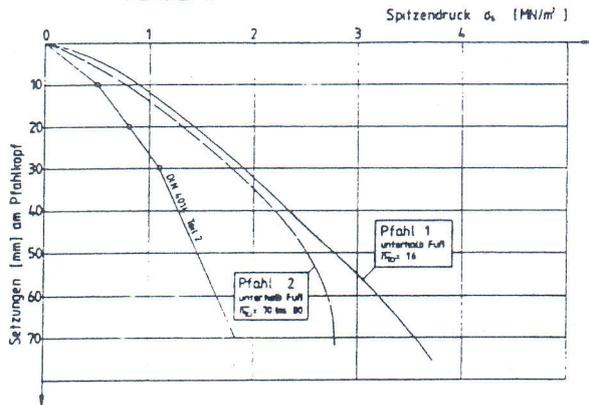


Bild 6 Spitzendruck-Setzungslinien

Der gemessene Spitzendruck-Setzungsverlauf ist in Bild 6 wiedergegeben. Bei der hier durchgeführten Auswertung der Meßergebnisse wurde als ein Grenzwert davon ausgegangen, daß der gemessene Pfahlsitzendruck (Bild 6) im Druckteller (ϕ 135 cm) gleichmäßig über den gesamten Pfahlquerschnitt (ϕ 150 cm) vorhanden ist, da der Ringspalt zwischen Bohrlochwandung und Druckteller hier mit Beton verfüllt war. Ein direkter Kraftverlauf aus dem Pfahlschaft über den verfüllten Ringspalt ist dabei nicht auszuschließen, nimmt aber mit zunehmender Pfahlsetzung und Konzentration des Spitzendrucks um die Pfahlachse ab.

2. Versuche Mannheim

Für die westliche Einführung der Riedbahn in den Bahnhof Mannheim Hbf wurde im Jan./Febr. 1980 Probelastungen an je zwei

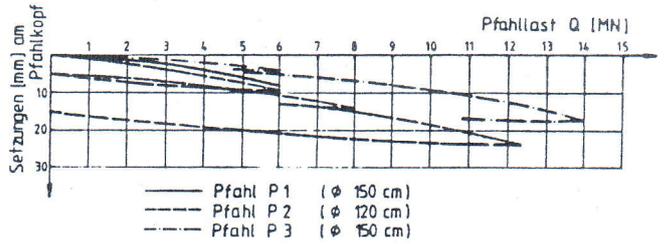
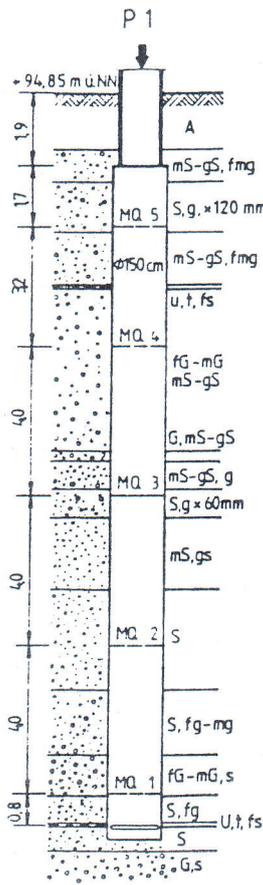
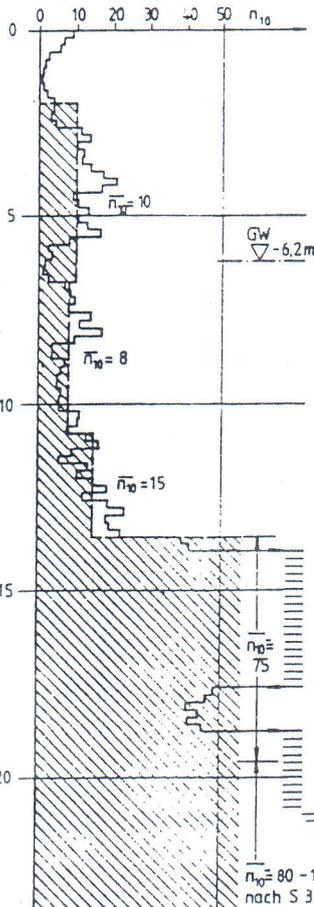


Bild 7 Last-Setzungslinien

Schwere Rammsondierung SRS 1



Gemessene Mantelreibung als Funktion der Setzungen

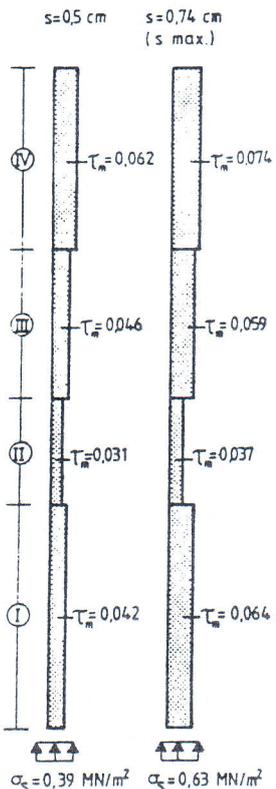


Bild 8 Sondierprofil, Pfahl P1, Mantelreibung und Spitzendruck

Pfählen \varnothing 150 cm (P1, l = 20 m und P3, l = 18 m) und einem Pfahl \varnothing 120 cm (P2, l = 20 m) vorgenommen. Der Baugrund besteht ebenfalls aus Kies-Sand-Gemischen. Ein Einfluß der rd. 10 bis 20 m unter Pfahlfuß anstehenden Ton-Schluff-Schicht kann auf die Probelastungsergebnisse ausgeschlossen werden.

Bauherr: Projektgruppe Mannheim/Stuttgart bei der Bundesbahndirektion Karlsruhe

Baugrundgutachten: Dr.-Ing. Ch. Christow, Karlsruhe

Durchführung der Probelastung: Frankipfahl-Bauges., Düsseldorf

Die Last-Setzungslinien (Bild 7) zeigen bei der aufgebrauchten Maximallast bis

14 MN Setzungen < 3 cm. Die nächst höhere Laststufe wurde bei einer Setzungsgeschwindigkeit von 0,02 mm/min aufgebracht.

Zur Messung des Pfahlkraftverlaufes im Pfahl wurden ebenfalls 4 Verformungsaufnehmer (Fa. Losinger) in jeweils 5 Meßquerschnitten sowie pro Pfahl 5 Stangenextensiometer eingebaut. Die Verformungsaufnehmer arbeiten hier weitgehend störungsfrei.

Die mittlere Mantelreibungverteilung und die Mantelreibungszunahme mit der Setzung ist in den Bildern 8 bis 12 dargestellt.

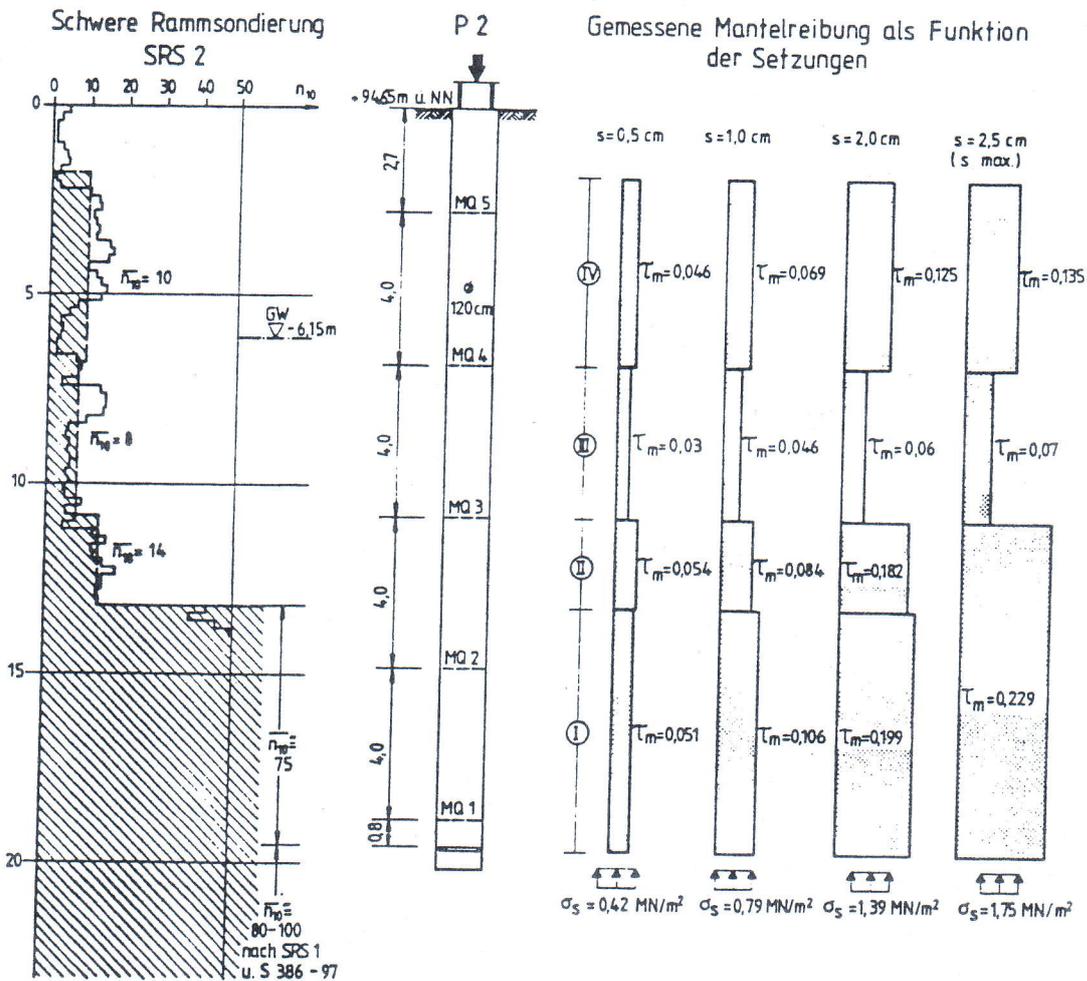


Bild 9 Sondierprofil, Pfahl P2, Mantelreibung und Spitzendruck

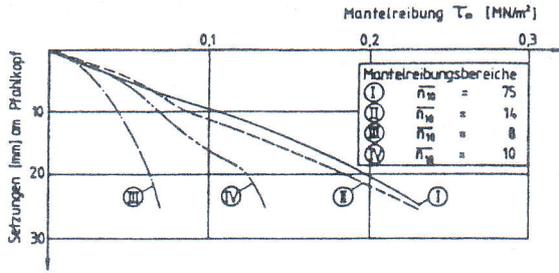


Bild 10 Mantelreibungs-Setzungslinien Pfahl P2

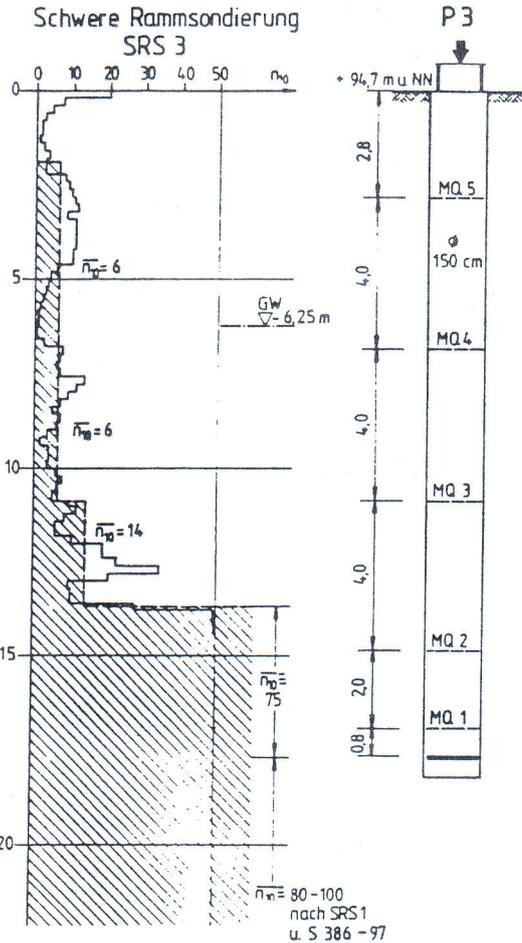


Bild 11 Sondierprofil, Pfahl P3, Mantelreibung und Spitzendruck

Die Spitzendruck-Setzungslinien sind in Bild 13 wiedergegeben. Für die Mannheimer Versuche wurde bei der hier vorgenommenen Auswertung davon ausgegangen, daß aufgrund der oberhalb der Druckteller angeordneten Schaumstoffringe jeweils die gesamte Spitzendruckkraft über die Druckteller (P1 und P3 \varnothing 135 cm, P2 \varnothing 105 cm) in den Baugrund abgetragen wird.

Gemessene Mantelreibung als Funktion der Setzungen

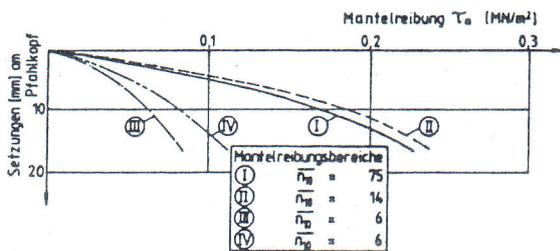
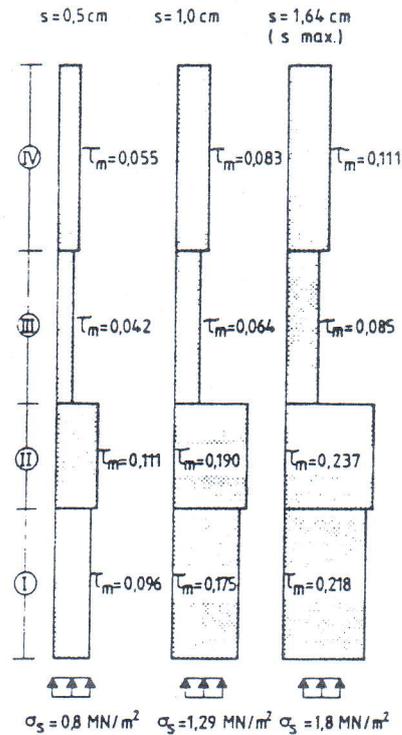


Bild 12 Mantelreibungs-Setzungslinien Pfahl P3

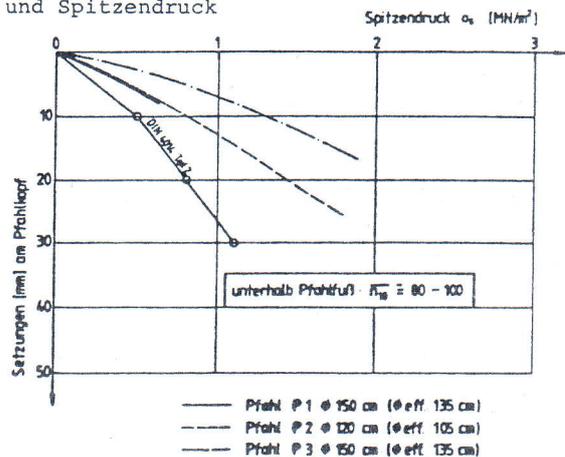


Bild 13 Spitzendruck-Setzungslinien

3. Versuch Oberstimm I

Für den Neubau der Eisenbahnüberführung Oberstimm I (Strecke München - Treuchtlingen) wurde im August 1980 eine Probelastung an einem Pfahl \varnothing 130 cm, Länge 10 m, durchgeführt. Der Baugrund besteht bis 7,5 m Tiefe aus Kies-Sand-Gemischen. Der Pfahlfuß bindet 2,5 m in dichtgelagerte tertiäre Fein-Mittelsande ein.

Bauherr: Bundesbahndirektion München
 Baugrundgutachten: Prof. Dr.-Ing. Jelinek,
 TU München
 Durchführung der Probelastung: Fa. Bauer,
 Schrobenhausen

Bei dieser Probelastung wurde nur die Gesamtlast gemessen. Die Last-Setzungslinie (Ruhekurve) ist in Bild 14 dargestellt.

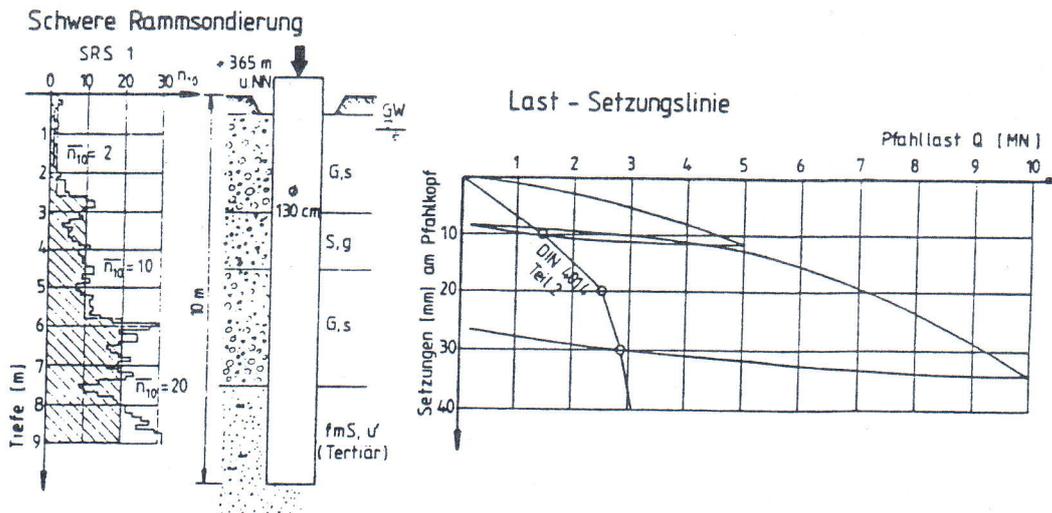


Bild 14 Sondier- bzw. Bodenprofil und Last-Setzungslinie

EXTRAPOLATION DER VERSUCHSERGEBNISSE

Für den im nächsten Abschnitt vorgenommenen Vergleich der Probelastungsergebnisse mit den Angaben der Vornorm DIN 4014 Teil 2, Ausgabe September 1977, wurde eine Extrapolation der Last-Setzungslinien der Probelastungen bis auf das in der Vornorm angenommene Setzungskriterium für die Pfahlgrenzlast von $s = 15$ cm durchgeführt.

Die Extrapolation erfolgte für die Düsseldorfener Versuche (vgl. Bild 15) nach dem Hyperbelverfahren und dem von ROLLBERG (1978, 1980) vorgeschlagenen Hyperbelverfahren mit geneigter Erdtangente. Dabei wurde die Grenzsetzung s_0 mit Gleichung (11) nach ROLLBERG (1980) mit den darin angegebenen Parametern abgeschätzt.

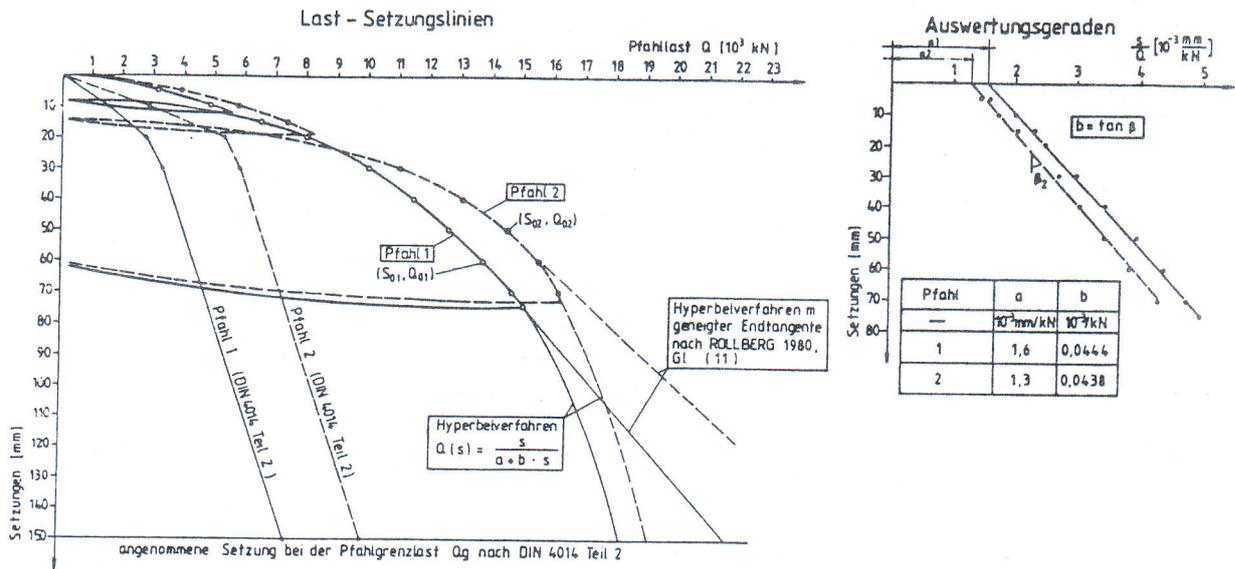


Bild 15 Last-Setzungslinien der Versuche Dusseldorf mit Extrapolation

Im weiteren (vgl. Bild 16) wurde nur noch das wahrscheinlich im vorliegenden Fall

auf der sicheren Seite liegende Hyperbelverfahren angewendet.

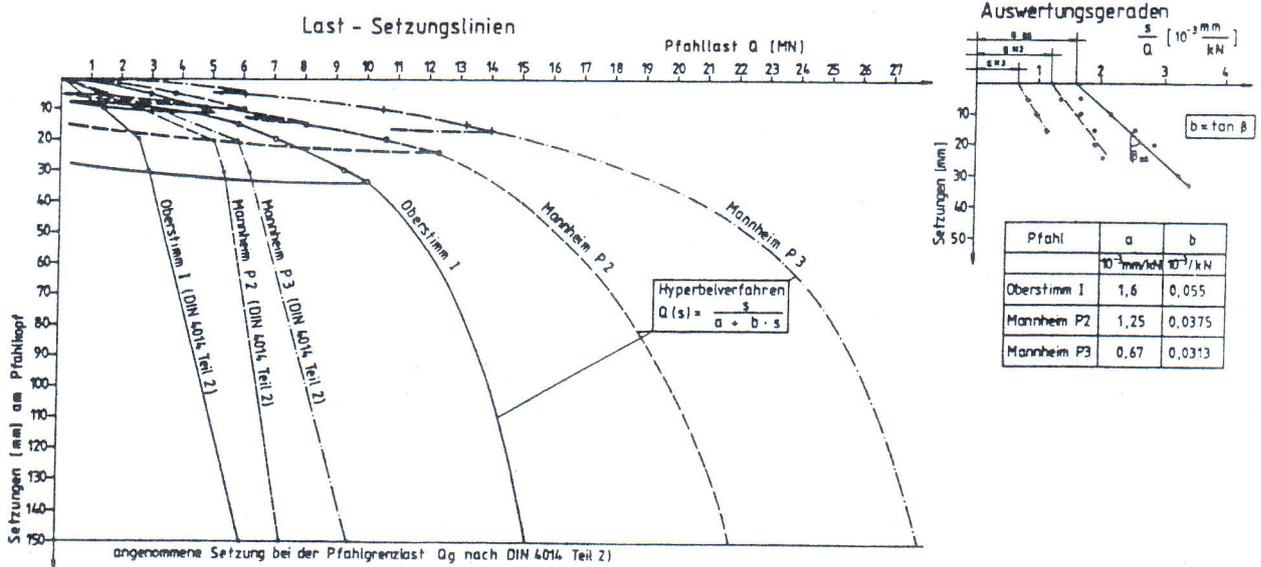


Bild 16 Last-Setzungslinien der Versuche Mannheim und Oberstimm I mit Extrapolation

VERGLEICH DER PROBEBELASTUNGS- UND NORMWERTE

Ausgerichtet auf die angegebene Zielsetzung dieser Auswertung der Probebelastungen ist nachfolgend ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen der 6 mitgeteilten Probebelastungen und den Normwerten durchgeführt. Alle Angaben zur Norm beziehen sich auf die Vornorm DIN 4014 Teil 2, Ausgabe September 1977.

Bild 17 zeigt die gemessenen Pfahlspitzen drücke (Düsseldorf, Mannheim) in Abhängigkeit von den mittleren Schlagzahlen \bar{n}_{10} der schweren Rammsonde im Pfahlfußbereich.

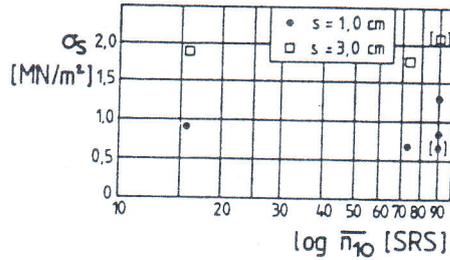
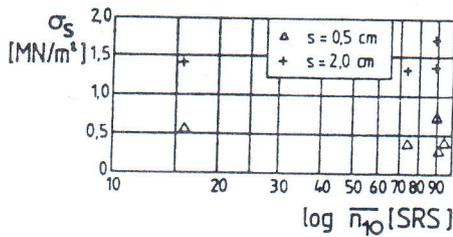


Bild 17 Pfahlspitzen drücke und mittlere Schlagzahlen \bar{n}_{10} der SRS

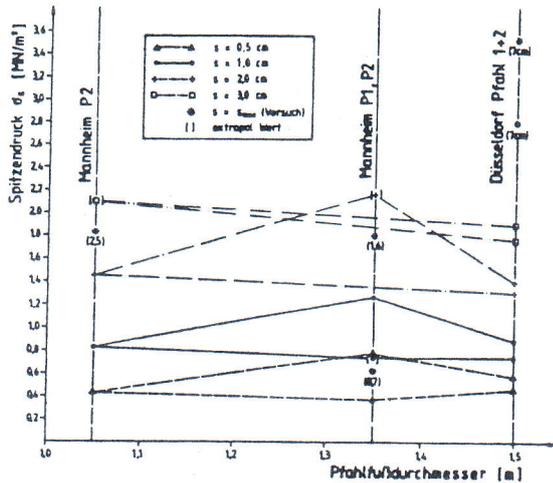


Bild 18 Pfahlspitzen druck in Abhängigkeit vom Fußdurchmesser

Die in Tabelle 1 bis 3 gegenübergestellten Versuchs- und Normwerte für den Pfahlspitzen druck, die Mantelreibung und der Pfahllast zeigen deutliche Tragreserven der Pfähle bei den untersuchten Kiessanden gegenüber den Normwerten.

Danach scheinen Herstellungseinflüsse auf den aufnehmbaren Spitzendruck von größerer Bedeutung zu sein, als die durch die Sondierergebnisse belegten unterschiedlichen Baugrundfestigkeiten unter der Pfahlfuß ebene, sofern insgesamt große Baugrundfestigkeiten vorliegen.

Aus Bild 18 ist keine Durchmesserabhängigkeit des Pfahlspitzen drucks im Gebrauchslastbereich bei Ansatz der Pfahlfuß durchmesser zu erkennen.

Das Verhältnis der Versuchs- und Normwerte weist beim Pfahlspitzen druck (Mittelwert 1,84) und bei der Pfahllast (Mittelwert 2,60) nur geringe, dagegen für die Mantelreibung (Mittelwert 2,16) große Streuungen auf.

Pfähle ohne Fußverbreiterung				
Setzung s	Probekbelastung	Pfahlspitzen druck σ_s		Verhältnis Versuch/DIN
		Versuch MN/m^2	DIN 4014 T 2 MN/m^2	
cm				
1	Düsseldorf Pfahl 1	0,90	0,5	1,80
	----- Pfahl 2	0,75	0,5	1,50
	Mannheim P 1	0,77	0,5	1,54
	----- P 2	0,79	0,5	1,58
	----- P 3	1,29	0,5	2,58
2	Düsseldorf Pfahl 1	1,60	0,8	1,75
	----- Pfahl 2	1,30	0,8	1,63
	Mannheim P 2	1,39	0,8	1,74
	----- P 3	2,15	0,8	2,69
3	Düsseldorf Pfahl 1	1,90	1,1	1,73
	----- Pfahl 2	1,78	1,1	1,62
	Mannheim P 2	2,10	1,1	1,91
Mittelwert				1,84
Standardabweichung				0,40

Tabelle 1 Pfahlspitzen druckvergleich der Versuchs- und Normwerte

Festigkeit des nichtbindigen Bodens	Sondierwiderstand q_s (MN/m ²) $\approx n_{90}$ (SRS)	Tiefe unter Gelände m	Mantelreibung τ_m					Verhältnis Versuch / DIN		
			Versuch					DIN 4014 Teil 2	Düsseldorf	Mannheim
			Düsseldorf		Mannheim					
			Pfahl 1	Pfahl 2	P1	P2	P3	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²
sehr gering	unter 5		0,039					0		
gering	5 bis 10	0 bis 2	0,199					0		
		2 bis 5	0,199	0,067	0,074 ¹¹⁾	0,125	0,111 ²¹⁾	0,03	6,63; 2,23	2,47; 4,17; 3,70
		über 5		0,067	0,074 ¹¹⁾ 0,059 ¹¹⁾	0,125 0,06	0,111 ²¹⁾ 0,085 ²¹⁾	0,05	1,34	1,48; 2,50; 2,22 1,18; 1,20; 1,70
mittel	10 bis 15	0 bis 2						0		
		2 bis 7,5		0,117				0,045	2,60	
		über 7,5		0,117 0,02	0,037 ¹¹⁾	0,182	0,237 ²¹⁾	0,075	1,56; 0,27	0,49; 2,43; 3,16
groß	über 15	0 bis 2		0,168				0		
		2 bis 10	0,156	0,117				0,06	2,60; 1,95	
		über 10		0,117	0,064 ¹¹⁾	0,199	0,218 ²¹⁾	0,1	1,17	0,64; 1,99; 2,18
							Mittelwerte	2,26	2,10	
							Mittelwert insgesamt	2,16		
							Standardabweichung	1,80		

¹¹⁾ $s_{max} = 0,74$ cm
²¹⁾ $s_{max} = 1,64$ cm

Tabelle 2 Mantelreibungsvergleich der Versuchs- und Normenwerte

Setzung s cm	Probebelastung	Pfahllast Q		Verhältnis Versuch/DIN
		Versuch	DIN 4014 T. 2	
1	Düsseldorf Pfahl 1	5,2	1,59	3,27
	--- Pfahl 2	5,7	2,86	1,99
	Mannheim P 1	6,8	3,51	1,94
	--- P 2	6,0	2,68	2,24
	--- P 3	10,8	3,04	3,55
	Oberstimm I	6,7	1,41	3,33
2	Düsseldorf Pfahl 1	8,1	2,83	2,86
	--- Pfahl 2	8,1	5,36	1,51
	Mannheim P 2	10,9	5,19	2,10
	--- P 3	15,4	5,78	2,64
	Oberstimm I	7,9	2,53	2,77
3	Düsseldorf Pfahl 1	10,0	3,36	2,98
	--- Pfahl 2	11,0	5,89	1,87
	Mannheim P 2	13,5	5,45	2,48
	--- P 3	18,6	6,21	3,00
	Oberstimm I	9,3	2,93	3,17
15	Düsseldorf Pfahl 1	18,2	7,43	2,45
	--- Pfahl 2	19,1	9,96	1,92
	Mannheim P 2	21,8	7,44	2,93
	--- P 3	27,9	9,50	2,94
	Oberstimm I	15,2	5,99	2,54
Mittelwert			2,60	
Standardabweichung			0,56	

Tabelle 3 Pfahllastvergleich der Versuchs- und Normenwerte

Insgesamt liefern die hier vergleichend vorgestellten Probebelastungsergebnisse eine Grundlage für Tragfähigkeitsangaben in der Norm bei nichtbindigen Böden großer bis sehr großer Festigkeit. Ein entsprechender Vorschlag wird von der Deutschen

Bundesbahn bei der anstehenden Überarbeitung der Vornorm DIN 4014 Teil 2, Ausgabe September 1977, eingebracht.

SCHRIFTTUM

CHRISTOW, Ch.K. (1980): Großbohrpfahl-Probebelastung für die Deutsche Bundesbahn in Mannheim. Diskussionsbeitrag Vorträge der Baugrundtagung 1980, S. 711-722.

FORST, H./SIEMER, H. (1982): Pfahlgründung und Versuche an Großbohrpfählen im Zuge des Umbaus Düsseldorf Hbf. Veröffentlichung in Vorbereitung.

FRANKE, E. (1973): Ermittlung der Festigkeitseigenschaften von nicht-bindigem Baugrund durch Sondierungen. Baumaschine und Bautechnik, Heft 11/1973.

FRANKE, E./GARBRECHT, D. (1977): Drei Serien von Probebelastungen an Großbohrpfählen im Sand. Mitt.Blatt der BAW Karlsruhe, Nr. 41, S. 45-77.

ROLLBERG, D. (1978): Die Kraft-Setzungslinie von Pfählen. Bauingenieur 53, S. 309-313.

ROLLBERG, D. (1980): Nachrechnung neuer Pfahlversuche anhand von Sondierungen. Bauingenieur 55, S. 345 - 350.

VESIĆ (1965): Zitiert in FRANKE, E. (1977): Normung von Großbohrpfählen (DIN 4014, Teil 2, Entwurf August 1975). Die Bautechnik 54, Heft 8, S. 253 - 263.

VORNORM DIN 4014 Teil 2, Ausgabe September 1977.