

Probelastung von Großbohrpfählen

T 2611

T 2611

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Probebelastung von Großbohrpfählen

1 Einleitung

1983 wurde ein Forschungsprogramm abgeschlossen, bei dem als Zielsetzung für die angewandte Forschung und für die technologische Entwicklung die Beantwortung folgender Fragen im Vordergrund stand:

1. Der Einfluß der Lagerungsdichte nichtbindigen Bodens auf die Tragfähigkeit von Großbohrpfählen sollte experimentell ermittelt werden. Praxis- und versuchstechnisch orientiertes Ziel war es, diesen Einfluß zu quantifizieren, indem er in Abhängigkeit routinemäßiger Felduntersuchungen, z.B. Drucksondierungen, dargestellt wird.
2. Der Einfluß einer Betonitsuspension auf die Tragfähigkeit von Großbohrpfählen sollte experimentell ermittelt werden. Insbesondere war zu klären, ob bzw. unter welchen Voraussetzungen die Tragfähigkeit bei Verwendung einer Stützflüssigkeit größer oder kleiner ist als bei Verwendung von Bohrröhren unter sonst gleichen Voraussetzungen.

Die Ergebnisse wurden in einem Abschlußbericht vorgelegt (Weiß/Hanack 1983) und bei der Überarbeitung der DIN 4014 "Bohrpfähle; Herstellung, Bemessung und Tragverhalten", Ausgabe März 1990, berücksichtigt.

Mit Rücksicht auf ein anschließendes Forschungsprogramm, das die Untersuchung der Gruppenwirkung horizontal belasteter Pfähle zum Ziele hatte (Schmidt 1990), wurden die Pfähle jedoch nur soweit belastet, daß eine Gesamtsetzung von 10 cm nicht überschritten wurde. Bei dieser Setzung war die Grenze der Tragfähigkeit noch nicht erreicht. Auch DIN 4014 enthält keine Angaben über die Größe der Bruchlast von Großbohrpfählen. Nach DIN 1054 ist die Ermittlung der Bruchlast von Pfählen mittels erdstatischer Berechnungsverfahren nicht zulässig. Bei dem Sicherheitsnachweis geht man deshalb von einer fiktiven Grenzlast aus, die bei einer relativen Pfahlsetzung von 10% des Pfahldurchmessers festgelegt worden ist. Für eine genaue Sicherheitsanalyse ist es jedoch erforderlich, den tatsächlichen Wert der Bezugsgröße "Bruchlast" zu kennen, zumal die eigentlichen Tragfähigkeitsreserven von Großbohrpfählen bei Setzungen unter der Gebrauchslast überwiegend in der Pfahlfußkraft liegen, weil die Mantelreibung weitgehend mobilisiert ist.

Das Institut für Bautechnik (jetzt Deutsches Institut für Bautechnik) hat auf Antrag weitere Mittel bewilligt, um die Pfähle bis zum Erreichen einer Bruchlast in den Boden zu drücken. Das Ergebnis dieser Anschlußversuche wird mit diesem Bericht vorgelegt.

2 Versuche

2.1 Erste Versuchsserie

2.1.1 Allgemeines

Es war zunächst nur eine Serie vorgesehen. Für die Versuchseinrichtung und den Versuchsaufbau ergaben sich aus der Zielsetzung folgende Randbedingungen:

1. Es mußten Pressen mit möglichst großem Hub eingesetzt werden, um die Zahl der Zwischenentlastungen und den Zeitaufwand für den Umbau klein zu halten.
2. Die Gesamttragkraft der Pressen mußte mindestens 10 MN betragen.
3. Die Pressen durften nicht zu schwer sein (Masse pro Presse \leq 750 kg), damit sie bei der vorhandenen weiten Ausladung noch mit einem Autokran über die Versuchsgrube hinweg auf die Pfahlköpfe unter dem "Pilzkopf" gesetzt werden konnten.

Diese Anforderungen erfüllten fünf Pressen mit einem Hub von jeweils 400 mm und einer Hubkraft von 2 MN/Presse.

2.1.2 Meßtechnik

Die meßtechnische Betreuung lag wiederum in den Händen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern. Einzelheiten zu den gewählten Meßelementen und Meßgeräten enthält der Bericht von Nowack/Gartung (1983).

Eine erste Überprüfung der Meßeinrichtung führte zu der erfreulichen Feststellung, daß nahezu alle Systeme auch nach mehrjähriger Unterbrechung noch einwandfrei funktionierten.

Die spätere Auswertung der ausgedruckten Meßdaten ergab, daß die in der Wirkungsebene der vorangegangenen Horizontalbelastung liegenden Dehnungsmeßstreifen keine verwertbaren Daten mehr lieferten; sie wurden anscheinend durch die hohen Dehnungen und Stauchungen infolge der Biegebeanspruchungen überlastet. Dennoch standen in jedem Querschnitt noch ausreichend viel Meßstellen für eine korrekte Auswertung zur Verfügung; sie wurde jedoch erheblich erschwert, da jeder Meßwert einzeln beurteilt werden mußte.

2.1.3 Versuchsdurchführung

Es wurden die Pfähle 1, 2, 4 und 5 belastet. Der Pfahl 3 wurde ausgeklammert, weil wegen der erheblich größeren Schaftabmessungen mit einer entsprechend höheren Bruchlast gerechnet werden mußte.

Es zeigte sich aber bereits bei der Belastung des ersten Pfahles, daß das Tragverhalten offensichtlich unterschätzt worden war. Die Grenze des Belastungsversuchs wurde schließlich bei allen Versuchen nicht durch die maximal mögliche Setzung, die dem Kolbenhub entsprochen hätte, sondern durch die zur Verfügung stehende Pressenkraft bestimmt.

2.1.4 Ergebnisse

Die Pfähle wurden bis maximal 9.8 MN belastet; die größte Setzung betrug 223 mm, die größte Gesamtsetzung 324 mm. Die zahlenmäßigen Ergebnisse (Peakwerte) sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die vollständige Datenliste befindet sich im Anhang. Die Last-Setzungslinien der Belastungsschleifen 1 und 2 sind in den Anlagen 1 bis 4 dargestellt.

Tabelle 1

Nr.	Pfahl Setzung [mm]		Gesamtlast [MN]		Pfahlfußkraft [MN]		Pfahlmantelkraft [MN]	
	s ₁	s ₂	Q ₁	Q ₂	Q _{s1}	Q _{s2}	Q _{m1}	Q _{m2}
1	96	302	5.23	9.77	3.71	7.41	1.52	2.36
2	93	324	4.82	9.68	2.84	6.65	1.98	2.69
3	92	-	4.58	-	2.49	-	2.09	-
4	84	331	3.50	9.18	2.49	6.02	1.01	3.16
5	90	293	4.10	7.94	3.06	6.02	1.04	1.92

Index 1 bedeutet Belastungsschleife 1, abgeschlossener Forschungsbericht, für den die Pfähle seinerzeit hergestellt worden waren

Index 2 bedeutet Belastungsschleife 2, aktuelle Arbeit

2.1.5 Erste Folgerungen

Der Verlauf der Last-Setzungslinie für die Gesamtlast läßt bei allen Pfählen eine Bruchlast bzw. Grenzlast im Sinne der DIN 1054 auch bei einer Setzung von rd. 300 mm -das entspricht einer auf den Pfahldurchmesser bezogenen Setzung von rd. 25%- nicht erkennen. Die Last-Setzungslinie $Q(s)$ geht bei dem Pfahl 4 allerdings nicht stetig von der Belastungsschleife 1 in die Schleife 2 über. Aus dem Verlauf $Q(s)$ in der Belastungsschleife 1 könnte geschlossen werden, daß der Versuch seinerzeit kurz vor

Erreichen der Grenzlasterlast abgebrochen worden ist. Die spätere Wiederbelastung zeigt jedoch eine unverhältnismäßig starke Zunahme der Tragfähigkeit, die, wie die Auswertung ergeben hat, auf eine erhebliche Zunahme der Mantelreibung zurückzuführen ist.

Der mit zunehmender Setzung annähernd parallele Verlauf der Last-Setzungslinie der Pfahlfußkraft Q_s zu derjenigen der Gesamtlasterlast Q weist darauf hin, daß der Anteil der Mantelreibung konstant und damit ein Grenzwert für die Pfahlmantelkraft bzw. die Mantelreibung erreicht worden ist.

Eine weitergehende Auswertung wurde zunächst zurückgestellt. Denn wichtiger als die zahlenmäßigen Ergebnisse im einzelnen erschien nach dem bisherigen Ablauf der Versuche die Beantwortung der Frage, ob überhaupt ein Bruchzustand im klassischen Sinne, bei dem der Pfahl bei konstanter Last in den Boden gedrückt wird, erreicht werden kann. Denn je nachdem, wie die Antwort auf diese Frage ausfällt, ergeben sich Konsequenzen bei dem Sicherheitsnachweis für den Grenzzustand 1a -zumindest bei Pfählen mit einem Durchmesser $D \geq 1.2$ m. Sollte sich herausstellen, daß auch bei noch größeren Setzungen eine Grenzlasterlast nicht erreicht wird, würde zur Ermittlung des äußeren Tragverhaltens ein Nachweis für den Grenzzustand 2 genügen. Das stünde im Einklang mit den Flachgründungen größerer Breite, bei denen für die Festlegung der

zulässigen Belastung nicht der Grundbruch, sondern die zulässige Setzung bzw. Setzungsdifferenz maßgebend ist. Deshalb wurde vorgeschlagen, die Pfähle weiter in den Boden zu pressen.

2.2 Zweite Versuchsserie

2.2.1 Allgemeines

Die zusätzlichen Mittel hierfür wurden vom Institut für Bautechnik bewilligt. Dennoch mußten die Versuche einige Jahre unterbrochen werden, weil es nicht möglich gewesen ist, geeignete Pressen zu beschaffen bzw. die in Aussicht gestellten Pressen nicht zur Verfügung standen, weil sie anderweitig gebraucht wurden.

Für den Belastungsaufbau waren zusätzliche Stabilitätsuntersuchungen erforderlich. Die eigentliche Vorrichtung war zwar von vornherein für eine Last von 20 MN ausgelegt, doch erhöhte sich die freie Knicklänge bei einer Pfahlsetzung von mehr als 1.0 m auf über 7 m. Außerdem mußte geeignetes Unterfütterungsmaterial ausreichender Festigkeit ausgesucht werden, das auch von Hand zu bewegen war. Hebegeräte konnten nicht eingesetzt werden, weil sie an die Pfähle nicht heranreichten bzw. hierfür vorher die Belastungsvorrichtung hätte vollständig abgebaut werden müssen.

2.2.2 Meßtechnik

Die Meßtechnik wurde aus Kostengründen stark vereinfacht. Die Gesamtlast wurde über das hydraulische Drucksystem, die Pfahlfußkraft bei den Pfählen 1 und 2 über die eingebauten Druckkissen gemessen; diese fielen später allerdings bei einer Gesamtlast von 14.5 MN bzw. 17 MN wegen mechanischer Überlastung aus. Die Setzungen wurden -wie in früheren Zeiten- an Maßstäben mit Millimeterteilung durch ein Nivelliergerät abgelesen. Die Genauigkeit erschien bei einer Gesamtsetzung von mehr als 1000 mm ausreichend.

2.2.3 Versuchsdurchführung

Die Pfähle 1 und 2 konnten schließlich im November und Dezember 1989 jeweils insgesamt mehr als 1.35 m in den Boden gedrückt werden. Dafür waren maximal rd. 19 MN und jeweils fünf Zwischenentlastungen erforderlich, die nach einem Pressenhub von jeweils 30 cm zur Unterfütterung der Belastungseinrichtung eingeschaltet werden mußten. Der Zeitaufwand für jeden Versuch wurde zusätzlich noch dadurch erhöht, daß die Nachsetzungen unter den hohen Belastungen erst nach mehr als drei Stunden abklangen. Wegen des sehr großen Zeitaufwandes für jeden Versuch - unter den hohen Lasten klangen die Nachsetzungen erst

nach zwei bis drei Stunden ab, ferner mußte nach einer Setzung von jeweils 30 cm zum Unterfüttern eine Zwischenentlastung eingeschaltet werden- konnten in der Zeit, wo die Pressen zur Verfügung standen, keine weiteren Versuche mehr durchgeführt werden.

Ausschlaggebend dafür, daß die Versuche auch zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr fortgesetzt werden konnten, war der Umstand, daß der Standort der Pfähle 4 und 5 mit den zur Verfügung stehenden Hub- und Hilfsgeräten -Autokran und über der Versuchsgrube eine verschiebbliche Arbeitsbühne- nicht erreicht werden konnten, weil seinerzeit die Böschung der Versuchsgrube für horizontalen Belastungsversuche abgetragen werden mußte.

2.2.4 Ergebnisse

Der gesamte Last-Setzungsverlauf ist für den Pfahl 1 in Anlage 5, für den Pfahl 2 in Anlage 6 dargestellt. Die wichtigste Feststellung ist, daß auch nach einer Setzung von mehr als 1.3 m die Grenze der Tragfähigkeit offensichtlich noch nicht erreicht ist. Es ist im Gegenteil bei der letzten Belastungsschleife bei beiden Pfählen eine gewisse Zunahme der Tragfähigkeit zu erkennen, die mit einer Verfestigung des Bodens unterhalb der Pfahlfußebene erklärt werden kann. Diese Verfestigung ist durch die Verdrängung von mehr als 1.5 m³ Sand verursacht worden, der bereits im Ausgangszustand eine sehr dichte Lagerung aufwies.

Da es in diesem Fall, d.h. bei Pfählen mit einem Durchmesser von mindestens 1.2 m im dicht gelagerten Sand, offensichtlich kein grenzenloses Versinken gibt, stellt sich die Frage, ob man diesen Zustand überhaupt untersuchen muß bzw., d.h. wenn ja, mit welcher physikalischen Größe hier sinnvoll ein Grenzzustand definiert werden kann. Die maximal aufgebrachte Last ist in diesem Fall bei der zugehörigen Setzung realitätsfern, selbst wenn man die Versuche bereits nach der Belastungsschleife 2 mit einer Gesamtsetzung von rd. 30 cm als beendet ansehen würde. Denn die Setzung unter der daraus mit einem vorgegebenen Sicherheitsniveau abgeleiteten zulässigen Last wäre für das Bauwerk mit Sicherheit nicht mehr verträglich. Auch das Krümmungsmaximum der Last-Setzungslinie ist hierfür nicht geeignet. Es ist zwar mathematisch eindeutig beschrieben und wird bodenmechanisch als der Punkt gedeutet, an dem die Mantelreibung ihr Maximum erreicht hat (Franke 1990); seine Lage hängt jedoch von den bei der Auftragung der Last-Setzungslinie verwendeten Maßstäben ab, ist also praktisch nicht zu bestimmen. Hinzu kommt, daß man ohne grafische Auftragung nicht auskommt, weil beide Größen dieselbe Einheit haben müssen (Längeneinheit cm oder mm), wenn ein sinnvolles Ergebnis herauskommen soll.

Unter diesem Gesichtspunkt bleibt das in DIN 4014 praktizierte Nachweisverfahren für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und -bei Pfählen mit kleinerem Durchmesser- für den Grenzzustand der Tragfähigkeit von Bedeutung.

Für die weitere Auswertung wurden zunächst die Endwerte für die Setzung, Gesamtsetzung, Gesamtlast, Pfahlfußkraft (Pfahlwiderstand) und Pfahlmantelreibung aller Laststufen in den einzelnen Belastungsschleifen ermittelt und im Anhang tabellarisch aufgelistet. Bei Pfahl 1 setzt sich die Gesamt-Last-Setzungslinie aus acht, bei Pfahl 2 aus sieben, bei den Pfählen 4 und 5 jeweils aus zwei Belastungsschleifen zusammen. Bei der Berechnung von τ_m wurde die Zunahme der Pfahlmantelfläche mit der Setzung berücksichtigt. Bei Pfahl 1 versagte das Druckkissen in der Schleife 6 bei einer Pfahlfußkraft von 10 MN, bei Pfahl 2 in der Schleife 7 bei 12.5 MN infolge mechanischer Überbeanspruchung. Für die folgenden Laststufen wurde der Verlauf der Mantelreibung $\tau_m = f(s)$ bei dem Pfahl 1 bilinear entsprechend Schleife 6 angenommen: bis zu einer Setzung von $s = 80$ mm linear zunehmend auf

$$\tau_{mf} = 135 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{für } s > 80 \text{ mm} \quad \tau_m = \tau_{mf}.$$

Der Verlauf der Mantelreibung $\tau_m(s)$, des Pfahlwiderstands (Pfahlfußkraft) $Q_s(s)$ und fallweise auch der Gesamtlast $Q_{ges}(s)$ ist in den Anlagen 7 bis 33 dargestellt.

3 Auswertung

3.1 Allgemeines

Für eine mögliche mathematische Behandlung -z.B. Bestimmung der Tangentenneigung- wurden die Versuchskurven jeweils durch eine Ausgleichfunktion geglättet. Für die Mantelreibung und die Pfahlfußkraft erwies sich Funktion

$$\tau_m = a_m + b_m * s / (c_m + d_m * s) \quad (1)$$

bzw.

$$Q_s = a_s + b_s * s / (c_s + d_s * s) \quad (2)$$

als geeignet. Nähere Ausführungen hierzu sind in Weiß/Hanack (1983), Abschnitt 8.1, enthalten.

Bei flachem Verlauf der Kurve $Q_s(s)$ liefert auch die Funktion

$$Q_s = a * s^b \quad (3)$$

eine brauchbare Näherung.

3.2 Mantelreibung

In allen Belastungsschleifen ist eine Zunahme der Mantelreibung τ_m mit der Setzung s bis zu einem bestimmten Grenzwert τ_{mf} vorhanden. Die Werte sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2

Grenzmantelreibung

Pfahl		Schleife	τ_{mf}	τ_{mfi}/τ_{mfi}	Setzung	Gesamtsetzung
Nr.	Nr.	[kN/m ²]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1	1	49	1.00	96	96	
	2	85	1.73	188	276	
	3	187	3.82	55	340	
	4	172	3.51	216	590	
	5	186	3.80	125	689	
	6	133	2.71	127	818	
2	1	65	1.00	93	93	
	2	98	1.51	142	227	
	3	105	1.62	166	474	
	4	103	1.58	140	673	
	5	114	1.75	175	923	
	6	116	1.78	247	1144	
	7	113	1.74	141	1257	
4	1	31	1.00	84	84	
	2	104	3.35	254	331	
5	1	31	1.00	90	90	
	2	64	2.06	133	214	

3.3 Pfahlspitzenwiderstand

Die mit der jeweiligen Ausgleichfunktion in Form der Gleichung (2) innerhalb des durch die Versuche belegten Bereichs für diskrete Werte von s ermittelten Lasten Q_s , die reziproken Tangentenwerte $1/Q_s'$ (Millimeter Eindringung/MN), die Sohlspannung σ_s und der Bettungsmodul k_s sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Differenz zwischen Versuchswert und Rechenwert für Q_s bei s_{max} kann als einfaches Maß für die Güte der Näherungsfunktion gesehen werden (Anlagen 12 bis 16, 25 bis 30).

Tabelle 3

Pfahlspitzenwiderstand Q_s , $1/Q_s'$, σ_s und $k_s = \sigma_s/s$ für diskrete Werte von s

		Setzung s [mm]					
Schleife		25	50	75	100	125	s_{max}
Pfahl 1							
2	Q_s [MN]	3.5	4.9	5.6	6.1	6.4	6.9
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	13	27	46	69	98	243
	σ_s [MN/m ²]	2.85	3.98	4.55	4.96	5.20	5.61
	k_s [MN/m ³]	114	80	61	50	42	26
3	Q_s [MN]	4.4	5.7	6.3	6.7	(6.9) ¹	6.8
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	12	30	54	86	(126) ¹	100
	σ_s [MN/m ²]	3.58	4.63	5.12	5.45	(5.61) ¹	5.53
	k_s [MN/m ³]	143	93	68	55	(45) ¹	51

¹ $s_{max} < 125$ mm

Fortsetzung Tabelle 3

Pfahlspitzenwiderstand Q_s , $1/Q_s'$, σ_s und $k_s = \sigma_s/s$ für diskrete Werte von s

		Setzung s [mm]					
Schleife		25	50	75	100	125	s_{max}
4	Q_s [MN]	5.4	6.9	7.6	8.0	8.3	8.7
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	11	27	50	80	118	315
	σ_s [MN/m ²]	4.39	5.61	6.18	6.50	6.75	7.07
	k_s [MN/m ³]	176	112	82	65	54	33
5	Q_s [MN]	6.2	7.8	8.5	8.9	9.1	9.2
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	10	26	49	79	117	122
	σ_s [MN/m ²]	5.04	6.34	6.91	7.24	7.40	7.48
	k_s [MN/m ³]	202	127	92	72	59	59
6	Q_s [MN]	6.7	8.6	9.5	10.1	10.4	11.2
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	8	20	37	59	86	294
	σ_s [MN/m ²]	5.45	6.99	7.72	8.21	8.46	9.11
	k_s [MN/m ³]	218	140	103	82	68	37
7	Q_s [MN]	5.4	7.6	8.7	9.5	10.0	11.1
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	8	16	28	42	59	184
	σ_s [MN/m ²]	4.39	6.18	7.07	7.72	8.13	9.02
	k_s [MN/m ³]	176	124	94	77	65	37
8	Q_s [MN]	8.3	10.7	11.9	12.6	13.0	14.0
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	7	16	29	46	66	263
	σ_s [MN/m ²]	6.75	8.70	9.67	10.24	10.57	11.38
	k_s [MN/m ³]	332	174	129	102	85	49
Pfahl 2							
2	Q_s [MN]	2.8	4.0	4.7	5.2	5.5	6.2
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	15	28	45	67	93	267
	σ_s [MN/m ²]	2.38	3.45	4.05	4.44	4.71	5.32
	k_s [MN/m ³]	95	69	54	44	38	22
3	Q_s [MN]	4.1	5.6	6.3	6.7	7.0	7.7
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	12	26	46	71	102	331
	σ_s [MN/m ²]	3.55	4.77	5.39	5.77	6.02	6.59
	k_s [MN/m ³]	142	95	72	58	48	27
4	Q_s [MN]	6.7	8.4	9.2	9.6	9.9	10.5
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	9	23	44	71	105	304
	σ_s [MN/m ²]	5.46	6.85	7.48	7.85	8.09	8.58
	k_s [MN/m ³]	218	137	100	78	65	36

Fortsetzung Tabelle 3

Pfahlspitzenwiderstand Q_s , $1/Q_s'$, σ_s und $k_s = \sigma_s/s$ für diskrete Werte von s

Setzung s [mm]

Schleife		25	50	75	100	125	s_{max}
5	Q_s [MN]	7.2	9.0	9.9	10.4	10.7	11.0
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	9	22	41	65	96	176
	σ_s [MN/m ²]	5.84	7.35	8.04	8.44	8.69	9.00
	k_s [MN/m ³]	234	147	107	84	70	51
6	Q_s [MN]	8.0	10.0	10.8	11.3	11.6	12.2
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	8	21	40	65	97	337
	σ_s [MN/m ²]	6.54	8.09	8.79	9.18	9.43	9.98
	k_s [MN/m ³]	261	162	117	92	75	40
7	Q_s [MN]	8.1	10.5	11.7	12.4	12.9	13.9
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	7	16	29	45	66	235
	σ_s [MN/m ²]	6.58	8.57	9.54	10.11	10.48	11.34
	k_s [MN/m ³]	263	171	127	101	84	44
Pfahl 4							
2	Q_s [MN]	1.6	2.7	3.4	4.0	4.5	5.8
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	28	16	38	50	63	156
	σ_s [MN/m ²]	1.31	2.18	2.80	3.27	3.63	4.68
	k_s [MN/m ³]	52	44	37	33	29	18
Pfahl 5							
2	Q_s [MN]	2.1	3.2	3.9	4.4	4.8	5.5
	$1/Q_s'$ [mm/MN]	17	29	43	61	81	177
	σ_s [MN/m ²]	1.71	2.63	3.21	3.60	3.89	4.48
	k_s [MN/m ³]	97	53	43	36	31	21

Bei der nunmehr für jede Belastungsschleife getrennten Auftragung $Q_s(s)$ ist bei beiden Pfählen ab der vierten Belastungsschleife die Annäherung an einen Grenzwert Q_{sg} zu erkennen. In der Tabelle 4 wurde

$$Q_{sg} = Q_s(s=s_{max}) \quad (4)$$

d.h. die maximale Last in jeder Belastungsschleife gleich der Grenzlast gesetzt. Auf diese Grenzlast wurden $Q_s(s = 25 \text{ mm})$ ($s/D \approx 0.02$) und $Q_s(s = 125 \text{ mm})$ ($s/D \approx 0.10$) bezogen.

Tabelle 4

Pfahl, Schleife	Q_s/Q_{sg} bei	
	$s/D \approx 0.02$	$s/D \approx 0.10$
1,2	0.51	0.93
1,3) ¹		
1,4	0.62	0.95
1,5	0.67	0.99
1,6	0.60	0.93
1,7	0.49	0.90
1,8	0.59	0.93
2,2	0.45	0.89
2,3	0.53	0.91
2,4	0.64	0.94
2,5	0.65	0.95
2,6	0.66	0.95
2,7	0.58	0.93
demgegenüber		
4,2	0.28	0.83
5,2	0.38	0.87

)¹ Höherbelastung war aus technischen Gründen nicht möglich, d.h. $s_{max} < s$ ($s/D \approx 0.10$)

In DIN 4014 wird die Last als Grenzlaster definiert, unter der die Setzung 10% des Pfahldurchmessers beträgt. Es zeigt sich hier, daß dies eine "sichere" Grenzlaster ist, weil stets noch eine Laststeigerung über diese Grenze hinaus möglich ist, d.h.

$$Q_{sg} \geq Q_s(s/D=0.10) \quad (5)$$

bzw.

$$Q_s(s/D=0.10)/Q_{sg} \leq 1 \quad (6)$$

Bei diesen Versuchen ist die Bedingung Gl. (6) erfüllt; es ist

$$0.83 \leq Q_s(s/D=0.10)/Q_{sg} \leq 0.99$$

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Feststellung, daß dieser Verhältniswert für die bezogene Setzung $s/D = 0.02$ in den Grenzen zwischen 0.28 und 0.66 liegt, d.h. bei einigen Belastungsschleifen ist

$$Q_s(s/D=0.02)/Q_{sg} > 0.5$$

Das Sicherheitsniveau wäre bei $\gamma = 2$ somit nicht ausreichend. Die hiernach zulässige Belastung wäre also kleiner und die zugehörige bezogene Setzung $s/D < 0.02$. Das liegt in diesem Fall daran, daß die Setzungsfähigkeit des Bodens unterhalb der Pfahlfußebene durch die Verdichtung infolge des Eindrückens der Pfähle sehr gering

ist und bereits bei kleinen Setzungsbeträgen verhältnismäßig hohe Lasten aufgenommen werden können. Das geht auch aus dem Vergleich mit den entsprechenden Ergebnissen für die Pfähle 4 und 5 hervor, bei denen dieser Verhältniswert mit 0.28 bzw. 0.38 deutlich kleiner ist als 0.5.

3.4 Zuordnung der Ergebnisse zum Sondierwiderstand des Bodens

Es wurden nach Abschluß der Versuche zwei Nachsondierungen mit der Drucksonde durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 35 und 36 dargestellt. Wie bereits vermutet wurde, ist der Sondierwiderstand durch das Eindringen der Pfähle 1 und 2 um jeweils rd. 1.3 m stark erhöht worden. Die bei Versuchsbeginn maßgebenden Sondierwiderstände für die Pfahlmantelreibung und den Pfahlspitzendruck sind in Tabelle 2 bzw. Tabelle 3 des ersten Berichtes enthalten. Die entsprechenden Werte aus den Nachsondierungen sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5

Maßgebender Sondierwiderstand

Tiefe m u. UK. Pfahlkopf	Pfahl 1 [MN/m ²]	Pfahl 2 [MN/m ²]
--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

für die Mantelreibung

bis 1.4	abgeschachtet	
1.4 bis 2.2	7.6	7.4
2.4 bis 3.2	10.1	10.9
3.4 bis 4.2	10.2	11.5
4.4 bis 5.2	12.0	12.5
5.4 bis 6.2	11.9	12.0
6.4 bis 7.2	13.9	12.0
7.4 bis 8.2	20.8	16.3
8.4 bis 9.8	30.2	22.8
Mittelwert	14.6	13.2

für den Pfahlspitzendruck

9.8 bis 11.2	37	
11.2 bis 13.4	> 50	
9.8 bis 10.4		31
10.4 bis 13.4		> 50
Mittelwert	> 45	> 45

Bei Pfahl 1 ist der mittlere Sondierwiderstand im Bereich der Pfahlmantelfläche von 9.8 MN/m² auf 14.6 MN/m² gestiegen, der Grenzwert der Mantelreibung von 49 kN/m² auf 133 kN/m² am Ende der Belastung (Tabelle 2, Schleife 8); die Steigerungsrate beträgt somit $14.6/9.8 = 1.48$ bzw. $133/49 = 2.71$. Das Verhältnis Mantelreibung / Sondierwiderstand ist $49/9800 = 0.005$ bzw. $133/14600 = 0.009$.

Für Pfahl 2 ergeben sich die entsprechenden Werte zu:

$$13.2/9.8 = 1.35 \qquad 65/9800 = 0.007$$

$$113/65 = 1.74 \qquad 113/13200 = 0.009$$

Bei der Pfahlspitzenwiderstand ist eine Abschätzung nicht möglich, weil die Sondierungen wegen des starken Anstiegs des Sondierwiderstands nicht bis in mindestens $3 \cdot D$ (siehe DIN 4020, Abschnitt 6.2.4.4) unterhalb der Pfahlfußebene durchgeführt werden konnten. Wenn man von der Linearität zwischen dem Sondierwiderstand und der Sohlspannung in der Pfahlfußebene ausgeht, sieht die Rechnung für den Pfahl 1 folgendermaßen aus:

Belastungsschleife 1

mittlerer Sondierwiderstand bis $3 \cdot D$ unterhalb Pfahlfußebene

$$q_s = 21 \text{ MN/m}^2$$

Sohlspannung bei $s = 100 \text{ mm}$ $\sigma_s = 3.06 \text{ MN/m}^2$

Belastungsschleife 8

Sohlspannung bei $s = 100 \text{ mm}$ $\sigma_s = 10.2 \text{ MN/m}^2$

Faktor $10.2/3.06 = 3.33$

erforderlicher mittlerer Sondierwiderstand bis $3 \cdot D$ unterhalb Pfahlfußebene $q_{serf} = 3.33 \cdot 21 = 70 \text{ MN/m}^2$.

Es wäre nun reine Spekulation zu diskutieren, ob ein solcher Wert die hier nachgewiesenen Lagerungsverhältnisse tatsächlich repräsentiert. Es steht jedoch fest, daß die Annahme einer Linearität auf der sicheren Seite liegt. Denn in diesem Fall würde die Sohlspannung bei einem vorsichtig angesetzten Sondierwiderstand von 45 MN/m^2 :

$$\sigma_s = 3.06 \cdot 45 / 21 = 7.7 \text{ MN/m}^2 < 10.2 \text{ MN/m}^2$$

betragen.

Noch sicherer sind die Verhältnisse bei Pfahl 2:

$$\sigma_s = 2.46 \cdot 45 / 21 = 5.3 \text{ MN/m}^2 < 10.5 \text{ MN/m}^2$$

4 Vergleich der Ergebnisse mit DIN 4014

4.1 Mantelreibung

Der mittlere Sondierwiderstand q_s liegt zwischen 11 MN/m^2 (Pfähle 4 und 5) und 14.6 MN/m^2 (Pfahl 1). Nach Tabelle 4 der DIN 4014 ist als Bruchwert für die Mantelreibung $\tau_{mf} = 0.08 \text{ MN/m}^2$ anzusetzen. Damit ergeben sich die in Tabelle 6 zusammengestellten Grenzwerte für die Bruchlast der Pfahlmantelkraft.

Tabelle 6

Grenzwerte nach DIN 4014 für die Pfahlmantelkraft

Pfahl	Q_{min} (Schleife 2)	Q_{max} (letzte Schleife)
	[MN]	[MN]
1	2.3	2.6
2	2.2	2.6
4 und 5	2.4	

Die unteren Werte sind in den Anlagen 37 bis 40 entsprechend Bild 3 der DIN 4014 aufgetragen und den Versuchswerten gegenübergestellt. Bei Pfahl 1 (Anlage 37) ist der Grenzwert für die Pfahlmantelkraft in der Schleife 1 erheblich kleiner als der Normwert, in der Schleife 2 etwa gleich groß. In den übrigen Schleifen sind die Versuchswerte größer als der Normwert, auch wenn man Q_{max} nach Tabelle 6 ansetzt oder auch wegen des höheren Sondierwiderstandes einen höheren Bruchwert für die Mantelreibung annimmt. Die für die Mobilisierung der vollen Pfahlmantelkraft erforderliche Verschiebung ist allerdings größer als nach Gleichung (7) der Norm.

Auch bei Pfahl 2 (Anlage 38) ist der Grenzwert für die Pfahlmantelkraft in der Schleife 1 erheblich kleiner als der Normwert, in den anderen Schleifen etwa gleich groß, wenn man Q_{max} nach Tabelle 6 ansetzt. Die für die Mobilisierung der vollen Pfahlmantelkraft erforderliche Verschiebung ist ebenfalls größer als nach Gleichung (7) der Norm.

Bei den Pfählen 4 und 5 (Anlage 39 bzw. Anlage 40) ist der Grenzwert für die Mantelreibung im allgemeinen kleiner als der Normwert. Diese Pfähle wurden unter Verwendung einer Bentonitsuspension hergestellt. Überraschend ist, daß auch bei diesen Pfählen in der zweiten Belastungsschleife eine wesentlich höhere Mantelreibung mobilisiert worden ist (siehe Tabelle 2). Die für die Mobilisierung der vollen Pfahlmantelkraft erforderliche Verschiebung ist größer als nach Gleichung (7) der Norm.

4.2 Pfahlspitzenwiderstand

In Tabelle 1 der DIN 4014 ist der Pfahlspitzenwiderstand σ_s in Abhängigkeit vom Sondierspitzenwiderstand q_s für diskrete Werte der auf den Pfahldurchmesser bezogenen Setzung angegeben. In Anlage 41 ist diese konstruierte

Last-Setzungslinie zusammen mit denen der Belastungsschleifen 1 und 2, in Anlage 42 die unter Beachtung des höheren Sondierwiderstandes am Ende der Versuche ermittelte Last-Setzungslinie mit derjenigen für die Belastungsschleife 8 aufgetragen. Die Tabellenwerte wurden in diesem Fall auf einen Sondierwiderstand $q_s = 45 \text{ MN/m}^2$ extrapoliert. Die Linie der Schleife 1 stimmt mit den normativen Werten überein; die anderen Versuchswerte liegen z.T. erheblich über den Normwerten; das gilt auch für die hier nicht mit aufgetragenen Belastungsschleifen 3 bis 7. Das bestätigt ebenfalls, daß der tatsächliche Sondierwiderstand im Boden unterhalb der Pfahlfußebene größer ist als 45 MN/m^2 .

Diese Feststellungen treffen weitgehend auch auf den Pfahl 2 zu (Anlagen 43 und 44). Die Last-Setzungslinie der Schleife 1 erreicht allerdings nicht die Normwerte für den Mittelwert des Sondierwiderstandes; sie stimmt annähernd mit der Linie unter Verwendung des unteren Grenzwertes (Mittelwert minus Standardabweichung) überein.

Bei den Pfählen 4 und 5 (Anlage 45 bzw. Anlage 46) sind die Versuchswerte für die Belastungsschleife 2 etwas größer als die normativen Werte, die der Schleife 1 allerdings kleiner, bei Pfahl 4 sogar kleiner als die für einen reduzierten Sondierwiderstand (s.o.).

5.3 Gesamtlast

Die Last-Setzungslinie der Belastungsschleife 1 liegt bei allen Pfählen unterhalb der Norm (Anlagen 47 bis 52). Bei den Pfählen 4 und 5 ist das auf die durch die Stützflüssigkeit reduzierte Mantelreibung zurückzuführen. Bei den Pfählen 1 und 2 ist der Unterschied geringer; er wirkt sich jedoch auf die Sicherheit und die Setzung unter der Gebrauchslast aus. Nach DIN 4014 beträgt die Grenzlast $Q_{g1} \approx 6.7$ MN, die zulässige Last somit $Q_{zu11} \approx 3.3$ MN bei einer Setzung von rd. 15 mm. Gegenüber der im Versuch aufgebrauchten Maximallast von rd. 5.2 MN beträgt der Sicherheitsabstand rd. 1.6, die Setzung bei $Q = 3.3$ MN rd. 30 mm. Bei Pfahl 2 beträgt der Sicherheitsabstand gegenüber der aufgebrauchten Maximallast von rd. 4.8 MN rd. 1.5, die Setzung bei $Q = 3.3$ MN rd. 33 mm. Dieser Bilanz ist entgegen zu halten, daß es sich bei den Maximallasten der Belastungsschleife 1 nicht um wirkliche Grenzlasten handelt; was auch durch die anschließenden Belastungen bestätigt wird. Somit kommt dem errechneten Sicherheitsgrad in diesem Fall keine Bedeutung zu.

5 Folgerungen

Die Versuche haben ergeben, daß es bei Großbohrpfählen mit einem erheblichen Anteil der Pfahlfußkraft an der Gesamtlast im nichtbindigen Boden eine Bruchlast in dem Sinne, daß der Pfahl unter konstanter Last im Boden versinkt, nicht gibt (Anlagen 1 bis 4, insbesondere aber Anlagen 5 und 6). Die Kenntnis, daß zwar die Pfahlmantelkraft einen Grenzwert erreicht und die eigentlichen Tragreserven in dem Pfahlspitzenwiderstand liegen, wurde bestätigt (z.B. Franke 1990).

Bei einer differenzierten Betrachtung darf man allerdings nicht von der in der Praxis unrealistischen Gesamtsetzung von 1.3 m ausgehen, sondern muß jede Belastungsschleife als einzelne Probebelastung mit allerdings unterschiedlicher Festigkeit des umgebenden Bodens ansehen. So zeigen die Belastungsschleifen 1 und 2 aller Pfähle ein "schulmäßiges" Last-Setzungsverhalten, bei dem es unwesentlich ist, ob der Nachweis des Grenzzustands 1 für den "Bruch" im Boden mit einer Grenzlast bei $s = 0.1 * D$ oder bei $s = s_{max}$ -in diesem Falle bei $s \approx 300$ mm- geführt wird. Maßgebend ist, ob die Setzung unter der daraus abgeleiteten zulässigen Pfahllast für das Bauwerk verträglich ist, d.h. maßgebend wird immer der Nachweis für den Grenzzustand 2 der Gebrauchstauglichkeit sein.

Anders verhält es sich bei Böden mit sehr hoher Festigkeit, wie sie z.B. in den Belastungsschleifen 7 und 8 bei den Pfählen 1 und 2 vorliegt. Das Setzungsverhalten ist mit 7 mm/MN bis 8 mm/MN sehr gering, so daß bis zum Erreichen der für das Bauwerk verträglichen Setzung eine sehr hohe Last erforderlich ist. Der Abstand zur Grenzlast ist gering; der Nachweis für den Grenzzustand 1 kann durchaus maßgebend sein. Das haben auch die Nachrechnungen im Abschnitt 3.3 bestätigt.

6 Literatur

DIN 4014 (1990): Bohrpfähle; Herstellung, Bemessung und Tragverhalten.

Franke (1989): Die Entwicklung der Tragfähigkeitsangaben in den Deutschen Pfahlnormen. Bautechnik 66, S. 365.

Franke (1990) Verbesserung der Angaben über die vertikale Pfahltragfähigkeit in DIN 1054. Abschlußbericht zum Forschungsauftrag des Instituts für Bautechnik.

Nowack/Gartung (1983): Messungen bei Probelastungen vertikal und horizontal belasteter Großbohrpfähle. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau; Geotechnik, S.1.

Schmidt (1986): Großversuche zur Ermittlung des Tragverhaltens von Pfahlreihen unter horizontaler Belastung. Mitteilungen des Inst. f. Grundbau, Boden- und Felsmechanik der TH Darmstadt; Heft 25.

Weiß/Hanack (1983): Der Einfluß der Lagerungsdichte des Bodens und der Herstellungsart von Großbohrpfählen auf deren Tragfähigkeit. Mitteilungen der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik; Heft 35.

Anhang

Versuchsergebnisse
(Daten)

Pfahl 1

Pfahl-					Setzung	
spitzendruck Q_s	mantelreibung Q_m			Q_{ges}		gesamt
[MN/m ²]	[MN]	[KN/m ²]	[MN]	[MN]	[mm]	[mm]

Belastungsschleife 1

0.33	0.41	20	0.60	1.01	3	3
0.82	1.01	29	0.89	1.90	8	8
1.44	1.77	41	1.26	3.03	21	21
2.36	2.90	45	1.41	4.31	55	55
2.72	3.34	48	1.48	4.82	72	72
2.97	3.64	47	1.47	5.11	90	90
3.02	3.71	49	1.52	5.23	96	96
0	0	0	0	0	88	88

Belastungsschleife 2

0.21	0.25	16	0.43	0.68	1	89
0.86	1.06	34	0.93	1.99	3	91
1.53	1.88	49	1.34	3.22	8	96
2.11	2.59	64	1.73	4.32	11	99
2.88	3.53	69	1.88	5.41	26	114
3.22	3.96	71	1.94	5.90	41	129
4.20	5.16	76	2.09	7.25	85	173
4.74	5.82	80	2.20	8.02	123	211
5.18	6.36	82	2.28	8.64	152	240
5.66	6.95	85	2.36	9.31	188	276
6.04	7.41	84	2.36	9.77	214	302

Belastungsschleife 3

0.07	0.08			0	0	285
0.86	1.06	37	1.04	3.00	3	288
1.52	1.87	94	2.63	4.50	7	292
2.14	2.63	120	3.37	6.00	10	295
2.56	3.14	138	3.86	7.00	13	298
3.02	3.71	153	4.29	8.00	16	301
3.51	4.31	167	4.69	9.00	24	309
4.03	4.95	180	5.05	10.00	34	319
4.67	5.73	187	5.27	11.00	55	340
5.56	6.82	183	5.18	12.00	109	394
				10.00	108	393
				9.00	108	393
				8.00	105	390
				7.00	105	390
				6.00	105	390
				4.50	103	388
				3.00	100	385
				0	89	374

Pfehl-				Setzung	
spitzendruck Q_s		mantelreibung Q_m		Q_{ges}	gesamt
[MN/m ²]	[MN]	[MN/m ²]	[MN]	[MN]	[mm]

Belastungsschleife 4

1.18	1.45	2	0.05	1.50	0	374
2.10	2.58	15	0.42	3.00	6	380
2.89	3.54	34	0.96	4.50	9	383
3.65	4.48	54	1.52	6.00	14	388
4.21	5.17	65	1.83	7.00	19	393
4.56	5.59	85	2.41	8.00	27	401
5.05	6.20	98	2.80	9.00	40	414
5.51	6.76	114	3.26	10.00	56	430
6.16	7.56	120	3.44	11.00	95	469
6.58	8.07	119	3.43	11.50	122	497
6.67	8.19	132	3.81	12.00	133	517
6.98	8.56	136	3.94	12.50	169	543
6.98	8.56	153	4.44	13.00	174	548
6.98	8.56	170	4.94	13.50	181	555
7.33	8.99	172	5.01	14.00	216	590
				11.00	215	589
				10.00	214	588
				8.00	212	586
				6.00	212	586
				3.00	204	578
				0	190	564

Belastungsschleife 5

1.43	1.76			1.5	3	567
2.22	2.73	9	0.27	3.00	6	570
3.11	3.81	24	0.69	4.50	10	574
3.84	4.71	44	1.29	6.00	13	577
4.37	5.36	56	1.64	7.00	17	581
4.96	6.08	67	1.92	8.00	21	585
5.57	6.84	74	2.16	9.00	31	595
5.93	7.28	93	2.72	10.00	43	607
6.41	7.87	107	3.13	11.00	61	625
6.91	8.48	120	3.52	12.00	82	646
6.99	8.58	150	4.42	13.00	92	656
7.14	8.76	178	5.24	14.00	99	663
7.35	9.02	186	5.48	14.50	125	689
7.87	9.66	181	5.34	15.00	128	692
				0	127	691

Pfehl-				Setzung	
spitzendruck Q_s	mantelreibung Q_m	Q_{ges}	gesamt		
[MN/m ²]	[MN]	[MN/m ²]	[MN]	[mm]	[mm]

Belastungsschleife 6

1.18	1.45	0	0.05	1.50	2	693
2.22	2.73	9	0.27	3.00	5	696
3.09	3.79	24	0.71	4.50	9	700
3.90	4.78	41	1.22	6.00	13	704
4.46	5.47	52	1.53	7.00	16	707
5.02	6.16	62	1.84	8.00	19	710
5.62	6.90	71	2.10	9.00	26	717
6.16	7.56	82	2.44	10.00	34	725
6.53	8.01	101	2.99	11.00	46	737
6.89	8.45	119	3.55	12.00	52	743
7.39	9.07	132	3.93	13.00	76	767
8.15	10.00	133	4.00	14.00	127	818
(8.56	10.50	133	4.01) ¹	14.50	153	844
(8.92	10.95	133	4.05) ¹	15.00	227	918
(9.33	11.45	133	4.05) ¹	15.50	239	930
(9.32	11.44	133	4.06) ¹	15.50	249	940
				14.00	249	940
				12.00	248	939
				10.00	247	938
				8.00	245	936
				6.00	243	934
				3.00	236	927
				0	233	924

Belastungsschleife 7

(2.88	3.53	15	0.47) ¹	4.00	9	933
(5.41	6.64	44	1.36) ¹	8.00	26	950
(6.41	7.86	135	4.14) ¹	12.00	85	1.009
(7.56	9.27	135	4.23) ¹	13.50	135	1.059
(8.75	10.74	135	4.26) ¹	15.00	197	1.121
(9.54	11.71	135	4.29) ¹	16.00	246	1.170
				13.00	245	1.169
				10.00	243	1.167
				7.00	239	1.163
				4.00	235	1.159
				2.00	226	1.150
				0	219	1.143

) ¹ Rechenwerte

Pfahl-				Setzung	
spitzendruck Q_s	mantelreibung Q_m	Q_{ges}	gesamt		
[MN/m ²]	[MN]	[MN/m ²]	[MN]	[mm]	[mm]

Belastungsschleife 8

(3.00	3.68	10	0.32) ¹	4.00	6	1.149
(5.91	7.25	24	0.75) ¹	8.00	14	1.157
(8.34	10.23	56	1.77) ¹	12.00	33	1.176
(9.00	11.04	93	2.96) ¹	14.00	55	1.198
(9.19	11.28	117	3.72) ¹	15.00	69	1.212
(9.51	11.67	135	4.33) ¹	16.00	102	1.245
(10.31	12.65	135	4.35) ¹	17.00	140	1.283
(11.11	13.63	135	4.37) ¹	18.00	187	1.330
(11.90	14.60	135	4.40) ¹	19.00	234	1.377
				16.00	233	1.376
				13.00	231	1.374
				10.00	229	1.372
				5.00	222	1.365
				0	206	1.349

)¹ Rechenwerte

Pfahl 2

Pfahl-					Setzung	
spitzendruck Q_s	mantelreibung Q_m			Q_{ges}		gesamt
[MN/m ²]	[MN]	[kN/m ²]	[MN]	[MN]	[mm]	[mm]

Belastungsschleife 1

0.15	0.17	13	0.39	0.56	1	1
0.34	0.40	21	0.64	1.04	3	3
0.56	0.65	27	0.83	1.48	6	6
0.74	0.87	32	0.97	1.84	8	8
1.01	1.18	40	1.23	2.41	14	14
1.35	1.58	46	1.40	2.98	24	24
1.67	1.95	48	1.49	3.44	37	37
1.88	2.20	53	1.63	3.83	49	49
2.11	2.47	59	1.83	4.30	69	69
2.43	2.84	65	1.98	4.82	93	93
				0	85	85

Belastungsschleife 2

0.29	0.34	30	0.80	1.14	1	86
1.19	1.39	66	1.76	3.15	5	90
2.54	2.98	94	2.53	5.51	41	126
3.30	3.86	96	2.61	6.47	72	157
4.47	5.22	98	2.69	7.91	142	227
5.08	5.94	95	2.62	8.56	181	266
5.22	6.10	94	2.58	8.68	194	279
7.40	6.65	93	2.58	9.23	239	324
				0	223	308

Belastungsschleife 3

0				0	0	308
				1.50	2	310
1.87	2.19	29	0.81	3.00	6	314
2.74	3.20	47	1.30	4.50	12	320
3.58	4.18	65	1.82	6.00	27	335
4.24	4.96	73	2.04	7.00	42	350
4.83	5.65	84	2.35	8.00	61	369
5.42	6.34	94	2.64	9.00	84	392
5.74	6.71	99	2.79	9.50	99	407
6.11	7.15	101	2.85	10.00	119	427
6.55	7.66	101	2.84	10.50	145	453
6.87	8.03	105	2.97	11.00	166	474
7.34	8.58	103	2.92	11.50	196	504
7.91	9.25	96	2.75	12.00	247	555

Pfehl-				Setzung		
spitzendruck Q_s	mantelreibung Q_m	Q_{ges}	gesamt			
[MN/m ²]	[MN]	[MN/m ²]	[MN]	[MN]	[mm]	[mm]
7.59	8.87	59	1.63	10.50	247	555
7.08	8.28	26	0.72	9.00	246	554
6.18	7.22	10	0.28	7.50	244	552
5.21	6.09	- 3	-0.09	6.00	243	551
3.76	4.40	4	0.10	4.50	239	547
2.69	3.14	- 5	-0.14	3.00	236	544
1.01	1.18	- 43	-1.18	0	225	533

Belastungsschleife 4

2.39	2.79	7	0.21	3.00	4	537
3.29	3.85	23	0.65	4.50	8	541
4.18	4.89	39	1.11	6.00	14	547
5.11	5.97	53	1.53	7.50	18	551
6.01	7.02	69	1.98	9.00	27	560
6.72	7.85	75	2.15	10.00	41	574
7.36	8.60	83	2.40	11.00	61	594
7.65	8.94	89	2.56	11.50	75	608
7.96	9.31	93	2.69	12.00	93	626
8.26	9.66	98	2.84	12.50	116	649
8.55	9.99	103	3.01	13.00	140	673
9.14	10.69	95	2.81	13.50	240	773
8.89	10.39	56	1.61	12.00	240	773
8.14	9.51	35	0.99	10.50	238	771
7.26	8.49	18	0.51	9.00	237	770
6.07	7.09	14	0.41	7.50	235	768
5.03	5.88	4	0.12	6.00	233	766
3.97	4.64	- 5	-0.14	4.50	231	764
2.75	3.22	- 8	-0.22	3.00	227	760
1.37	1.60	- 3	-0.10	1.50	219	752
0.89	1.04	- 36	-1.04	0	215	748

Belastungsschleife 5

2.08	2.43	- 33	-0.93	1.50	0	748
2.17	2.54	16	0.46	3.00	6	754
3.37	3.94	19	0.56	4.50	9	757
4.34	5.07	32	0.93	6.00	12	760
5.19	6.07	49	1.43	7.50	17	765
6.22	7.27	59	1.73	9.00	23	771
6.82	7.97	69	2.03	10.00	30	778
7.43	8.69	78	2.31	11.00	39	787
7.99	9.34	90	2.66	12.00	52	800
8.57	10.02	100	2.98	13.00	74	822
8.91	10.41	104	3.09	13.50	114	862
9.16	10.71	110	3.29	14.00	138	886
9.48	11.08	114	3.42	14.50	175	923

Pfahl-				Setzung		
spitzendruck Q_s		mantelreibung Q_m		Q_{ges}		gesamt
[MN/m ²]	[MN]	[MN/m ²]	[MN]	[MN]	[mm]	[mm]
3.93	4.59	23	0.67	5.26	164	912
2.48	2.90	3	0.10	3.00	159	907
1.08	1.26	- 43	-1.26	0	149	897

Belastungsschleife 6

1.86	2.18	- 6	-0.18	2.00	2	899
3.16	3.69	10	0.31	4.00	7	904
4.36	5.10	30	0.90	6.00	11	908
5.61	6.56	48	1.44	8.00	16	913
6.89	8.06	65	1.94	10.00	25	922
8.19	9.57	81	2.43	12.00	35	942
8.94	10.45	84	2.55	13.00	64	961
9.26	10.82	89	2.68	13.50	78	975
9.31	10.88	103	3.12	14.00	95	992
9.60	11.22	108	3.28	14.50	118	1.015
9.92	11.60	111	3.40	15.00	148	1.045
10.31	12.05	112	3.45	15.50	189	1.086
10.62	12.41	116	3.59	16.00	247	1.144
9.53	11.14	62	1.86	13.00	245	1.142
7.96	9.31	23	0.69	10.00	243	1.140
5.81	6.79	7	0.21	7.00	239	1.136
3.68	4.30	- 10	-0.30	4.00	234	1.131
1.80	2.11	- 4	-0.11	2.00	226	1.123
				0	219	1.116

Belastungsschleife 7

3.16	3.69	10	0.31	4.00	6	1.122
5.66	6.62	45	1.38	8.00	15	1.131
8.30	9.70	74	2.30	12.00	36	1.152
9.34	10.92	83	2.58	13.50	57	1.173
10.15	11.87	100	3.13	15.00	96	1.212
10.67	12.47	113	3.53	16.00	141	1.257
(11.5	13.40	114	3.60) ¹	17.00	195	1.311
(12.2	14.31	116	3.69) ¹	18.00	256	1.372
				15.00	255	1.371
				12.00	253	1.369
				9.00	251	1.367
				6.00	246	1.362
				3.00	238	1.354
				0	227	1.343

) ¹ Rechenwerte

Pfahl 4

Pfahl-					Setzung	
spitzendruck Q_s	mantelreibung Q_m			Q_{ges}		gesamt
[MN/m ²]	[MN]	[KN/m ²]	[MN]	[MN]	[mm]	[mm]

Belastungsschleife 1

0.28	0.35	21	0.70	1.05	6	6
0.73	0.90	31	1.03	1.93	16	16
1.57	1.93	31	1.04	2.97	55	55
1.98	2.43	28	0.92	3.35	76	76
2.03	2.49	31	1.01	3.50	84	84
0	0	0	0	0	77	77

Belastungsschleife 2

0.30	0.37	25	0.72	1.09	8	85
0.63	0.78	40	1.18	1.96	10	87
1.12	1.38	57	1.68	3.06	14	91
1.60	1.97	65	1.93	3.90	23	100
1.99	2.44	70	2.09	4.53	36	113
2.28	2.80	75	2.22	5.02	49	126
2.54	3.11	78	2.33	5.44	62	139
2.82	3.46	82	2.45	5.91	78	155
3.08	3.78	85	2.53	6.31	95	172
3.12	3.83	86	2.56	6.39	96	173
3.52	4.32	91	2.73	7.05	125	202
3.65	4.48	92	2.81	7.29	144	221
3.81	4.67	94	2.83	7.50	147	224
4.05	4.97	96	2.89	7.86	170	247
4.42	5.42	100	3.02	8.44	203	280
4.90	6.02	104	3.16	9.18	254	331
0	0	0	0	0	231	308

Pfahl 5

Pfahl-				Setzung	
spitzendruck Q_s	mantelreibung Q_m			Q_{ges}	gesamt
[MN/m ²]	[MN]	[KN/m ²]	[MN]	[MN]	[mm]

Belastungsschleife 1

0.10	0.13	12	0.41	0.54	1	1
0.29	0.35	21	0.70	1.05	3	3
0.43	0.52	28	0.93	1.45	6	6
0.74	0.91	30	1.00	1.91	14	14
1.16	1.42	30	1.01	2.43	29	29
1.51	1.85	31	1.05	2.90	47	47
1.86	2.28	33	1.11	3.39	63	63
2.32	2.85	29	0.99	3.84	81	81
2.49	3.06	31	1.04	4.10	90	90
0	0	0	0	0	81	81

Belastungsschleife 2

1.40	1.71	43	1.28	2.99	10	91
1.98	2.43	51	1.53	3.96	27	108
2.72	3.34	58	1.73	5.07	68	149
3.17	3.89	61	1.83	5.72	95	176
3.40	4.17	63	1.89	6.06	113	194
3.79	4.65	64	1.92	6.57	133	214
4.45	5.46	64	1.96	7.42	184	265
4.91	6.02	63	1.92	7.94	212	293
0	0	0	0	0	195	276

Verzeichnis der Anlagen

- 1 Last-Setzungsdiagramm Pfahl 1 bis $s \approx 30$ cm
- 2 Last-Setzungsdiagramm Pfahl 2 bis $s \approx 30$ cm
- 3 Last-Setzungsdiagramm Pfahl 4 bis $s \approx 30$ cm
- 4 Last-Setzungsdiagramm Pfahl 5 bis $s \approx 30$ cm
- 5 Last-Setzungsdiagramm Pfahl 1 bis $s \approx 1.3$ m
- 6 Last-Setzungsdiagramm Pfahl 2 bis $s \approx 1.3$ m
- 7 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleifen 1 und 2
- 8 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 3
- 9 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 4
- 10 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 5
- 11 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 6
- 12 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleifen 1 und 2
- 13 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 3
- 14 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 4
- 15 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 5
- 16 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 6

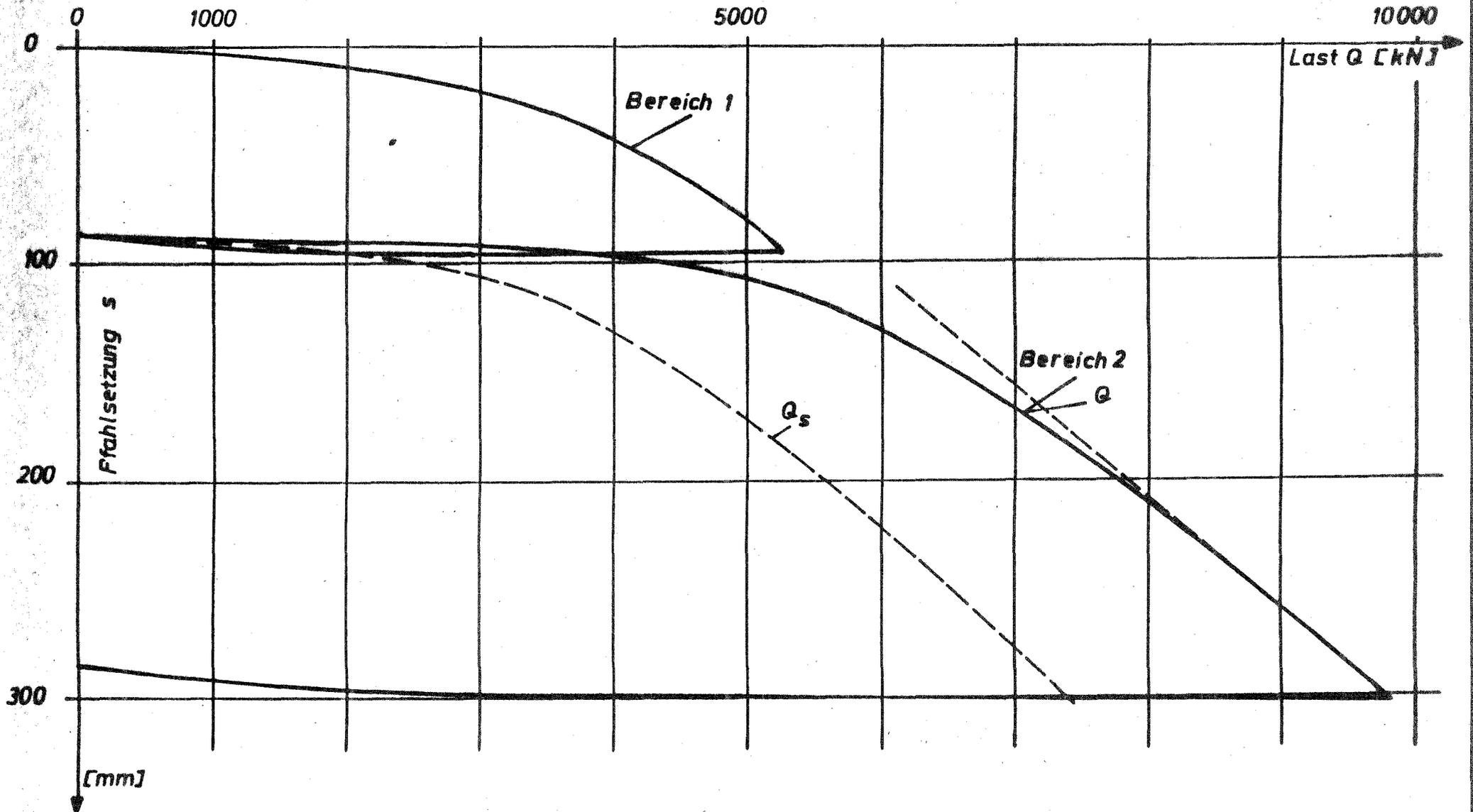
- 17 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 1
Gesamtlast-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 7
- 18 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 1
Gesamtlast-Verschiebungslinie Pfahl 1
Belastungsschleife 8
- 19 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleifen 1 und 2
- 20 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 3
- 21 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 4
- 22 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 5
- 23 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 6
- 24 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 7
- 25 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleifen 1 und 2
- 26 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 3
- 27 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 4
- 28 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 2
Gesamtlast-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 5

- 29 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 2
Gesamtlast-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 6
- 30 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 2
Gesamtlast-Verschiebungslinie Pfahl 2
Belastungsschleife 7
- 31 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 4
Belastungsschleifen 1 und 2
- 32 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 4
Belastungsschleifen 1 und 2
- 33 Mantelreibungs-Verschiebungslinie Pfahl 5
Belastungsschleifen 1 und 2
- 34 Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie Pfahl 5
Belastungsschleifen 1 und 2
- 35 Nachsondierung S 1n
- 36 Nachsondierung S 2n
- 37 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlmantelkraft Pfahl 1
- 38 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlmantelkraft Pfahl 2
- 39 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlmantelkraft Pfahl 4
- 40 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlmantelkraft Pfahl 5
- 41 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlfußkraft Pfahl 1
Belastungsschleifen 1 und 2
- 42 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlfußkraft Pfahl 1
Belastungsschleife 8
- 43 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlfußkraft Pfahl 2
Belastungsschleifen 1 und 2
- 44 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlfußkraft Pfahl 2
Belastungsschleife 7

- 45 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlfußkraft Pfahl 4
Belastungsschleifen 1 und 2
- 46 Vergleich mit DIN 4014, Pfahlfußkraft Pfahl 5
Belastungsschleifen 1 und 2
- 47 Vergleich mit DIN 4014, Gesamtlast Pfahl 1
Belastungsschleifen 1 und 2
- 48 Vergleich mit DIN 4014, Gesamtlast Pfahl 1
Belastungsschleife 8
- 49 Vergleich mit DIN 4014, Gesamtlast Pfahl 2
Belastungsschleifen 1 und 2
- 50 Vergleich mit DIN 4014, Gesamtlast Pfahl 2
Belastungsschleife 7
- 51 Vergleich mit DIN 4014, Gesamtlast Pfahl 4
Belastungsschleifen 1 und 2
- 52 Vergleich mit DIN 4014, Gesamtlast Pfahl 5
Belastungsschleifen 1 und 2

Last - Setzungsdiagramm

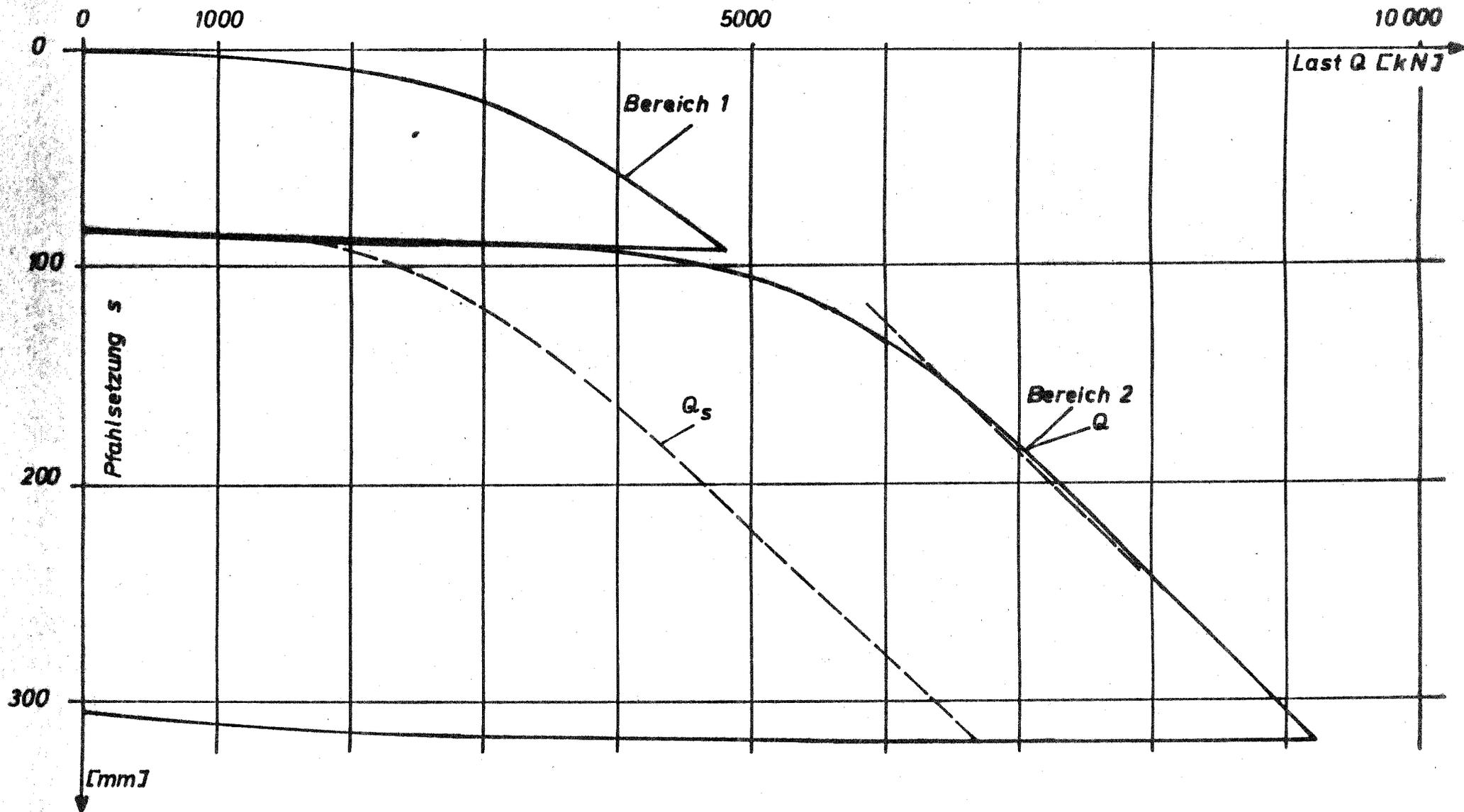
Pfahl 1



Anlage 1

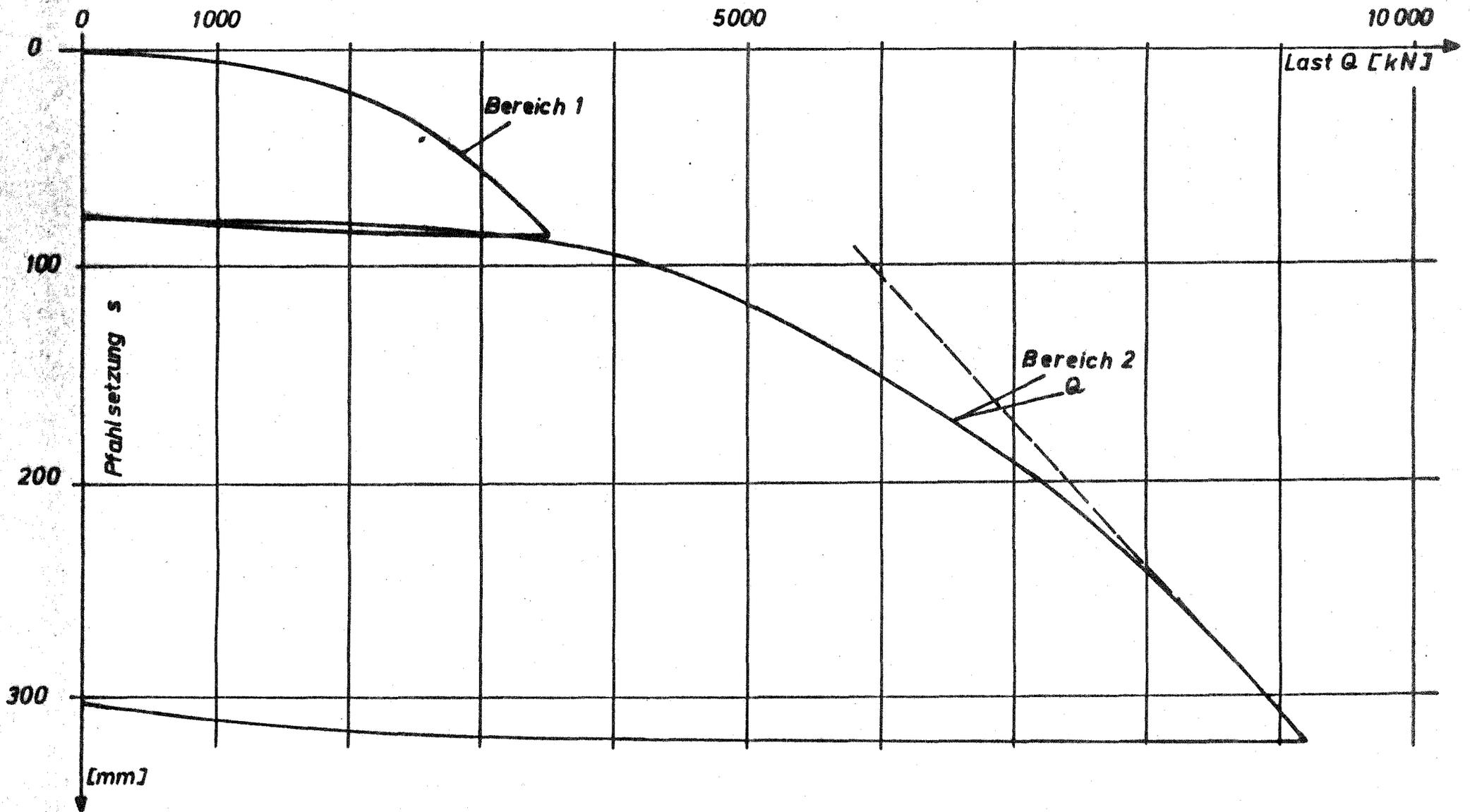
Last - Setzungsdiagramm

Pfahl 2



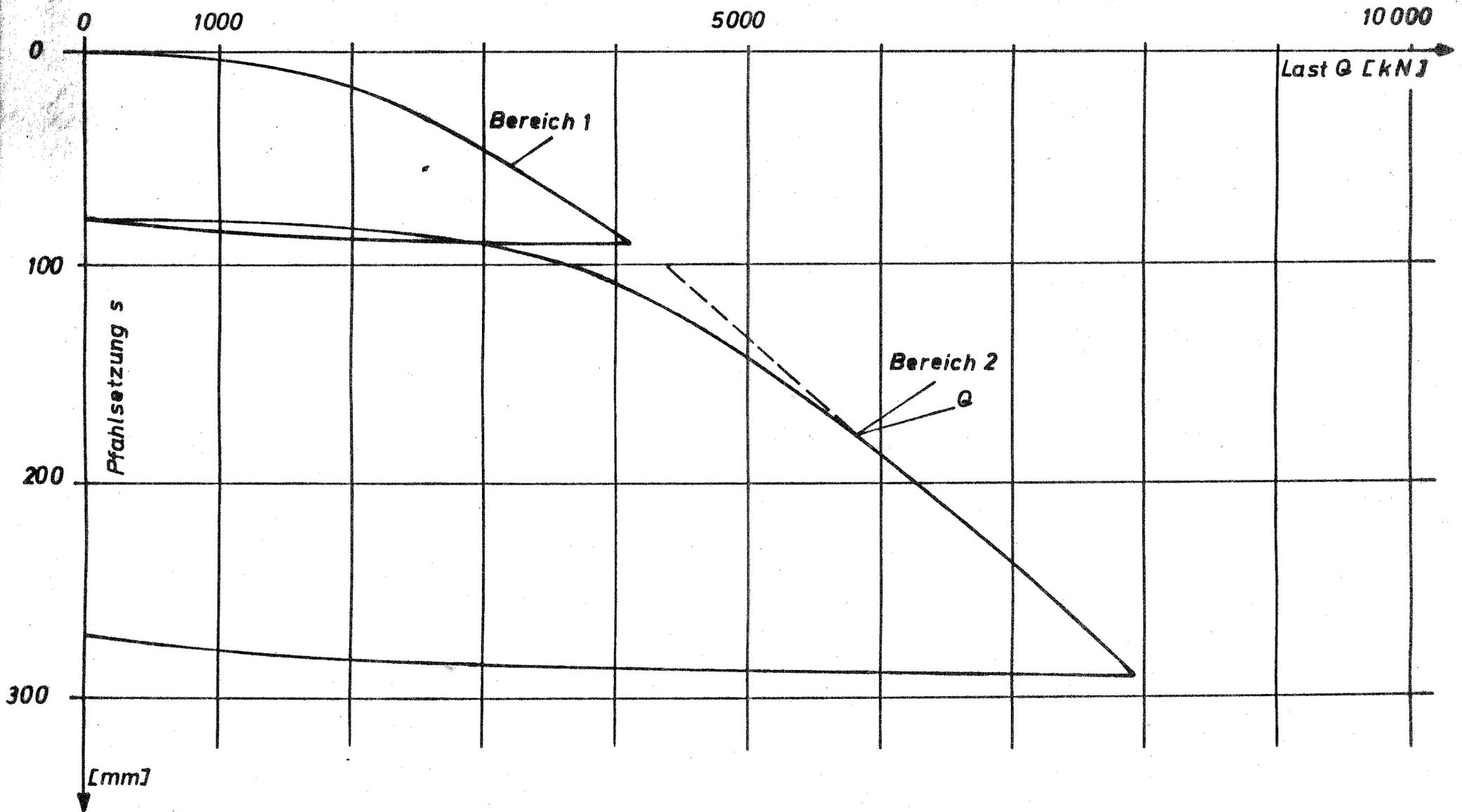
Last - Setzungsdiagramm

Pfahl 4

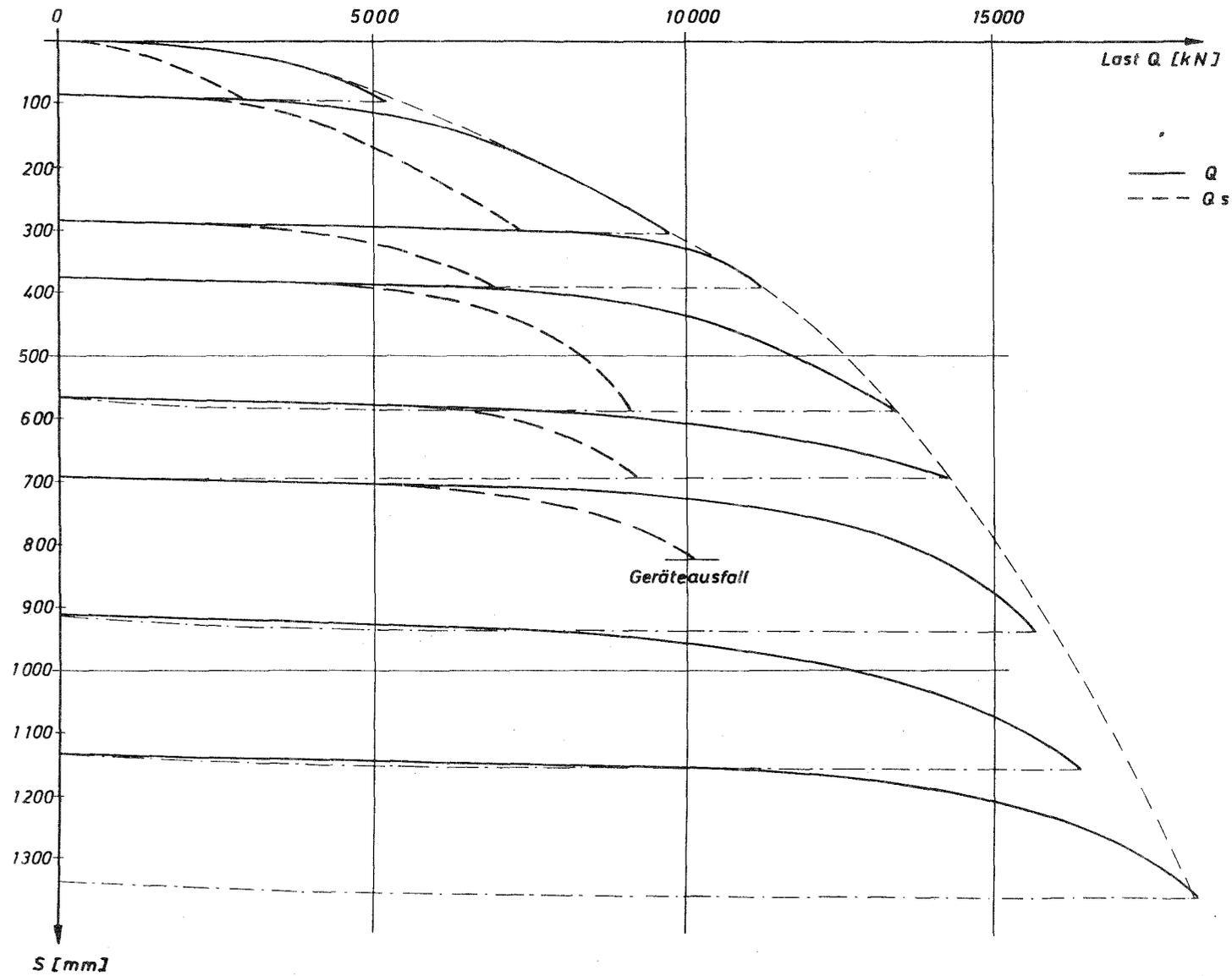


Last - Setzungsdiagramm

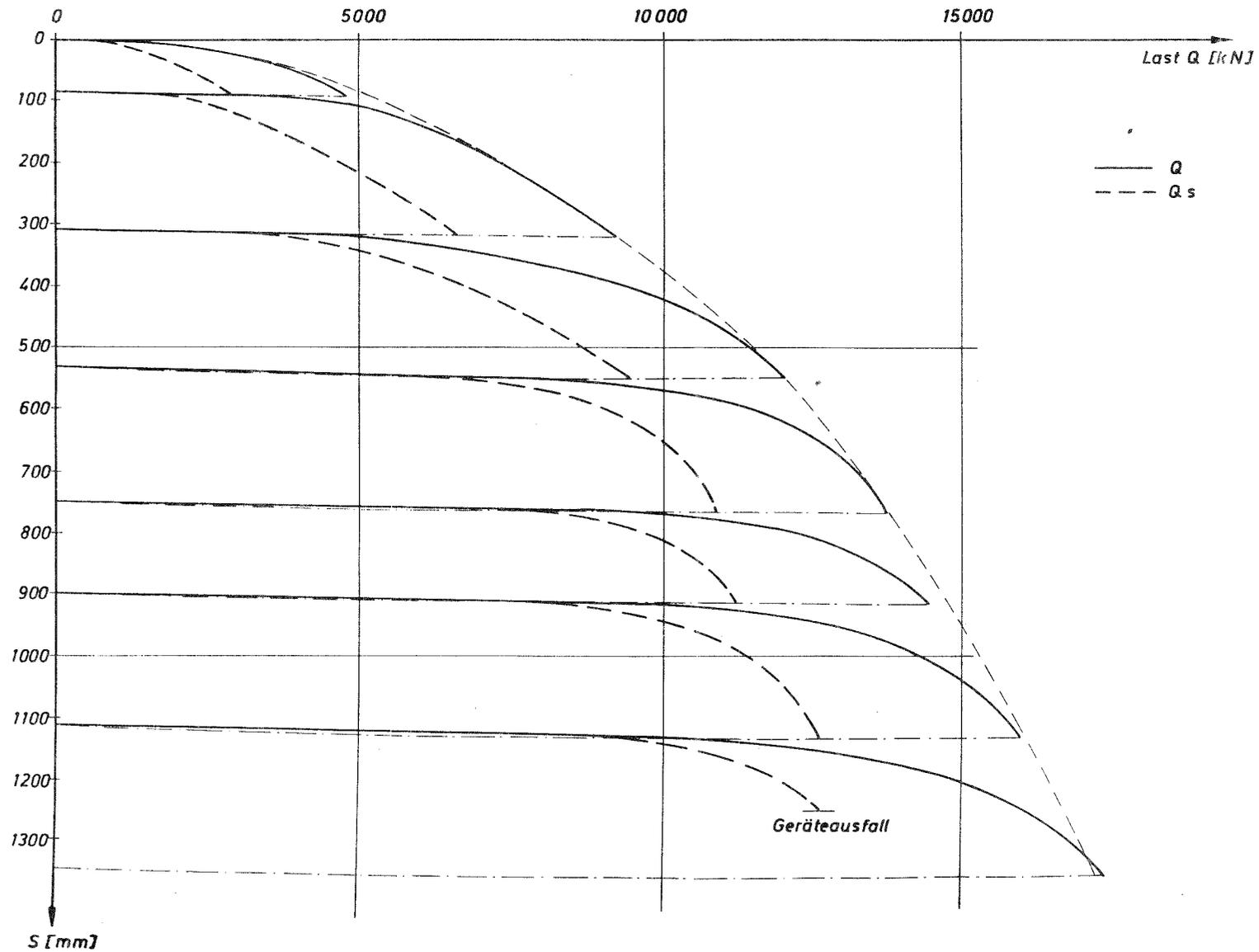
Pfahl 5



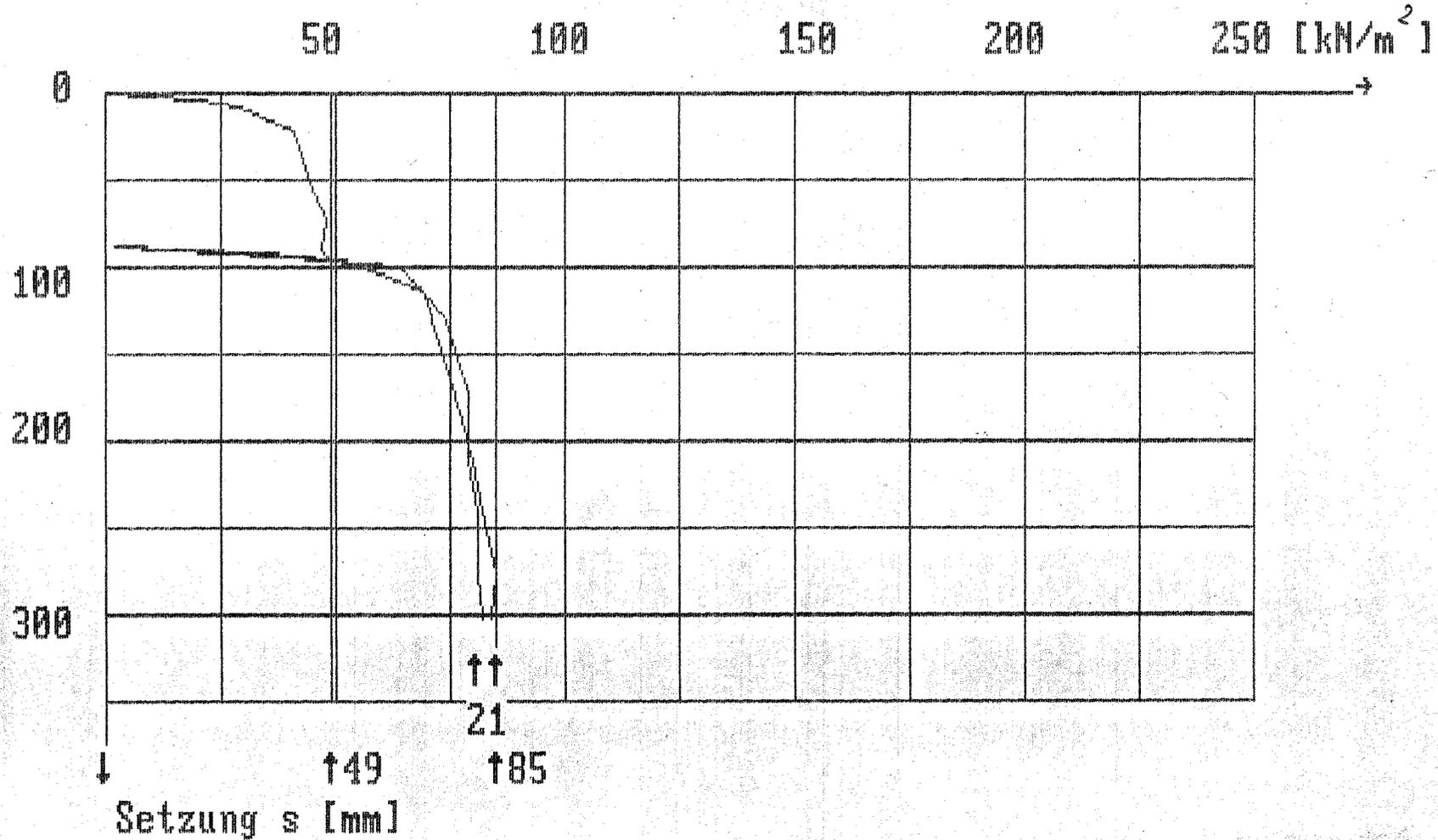
Last-Setzungsdiagramm Pfahl 1



Last-Setzungsdiagramm Pfahl 2



Mantelreibungs-Verschiebungslinie

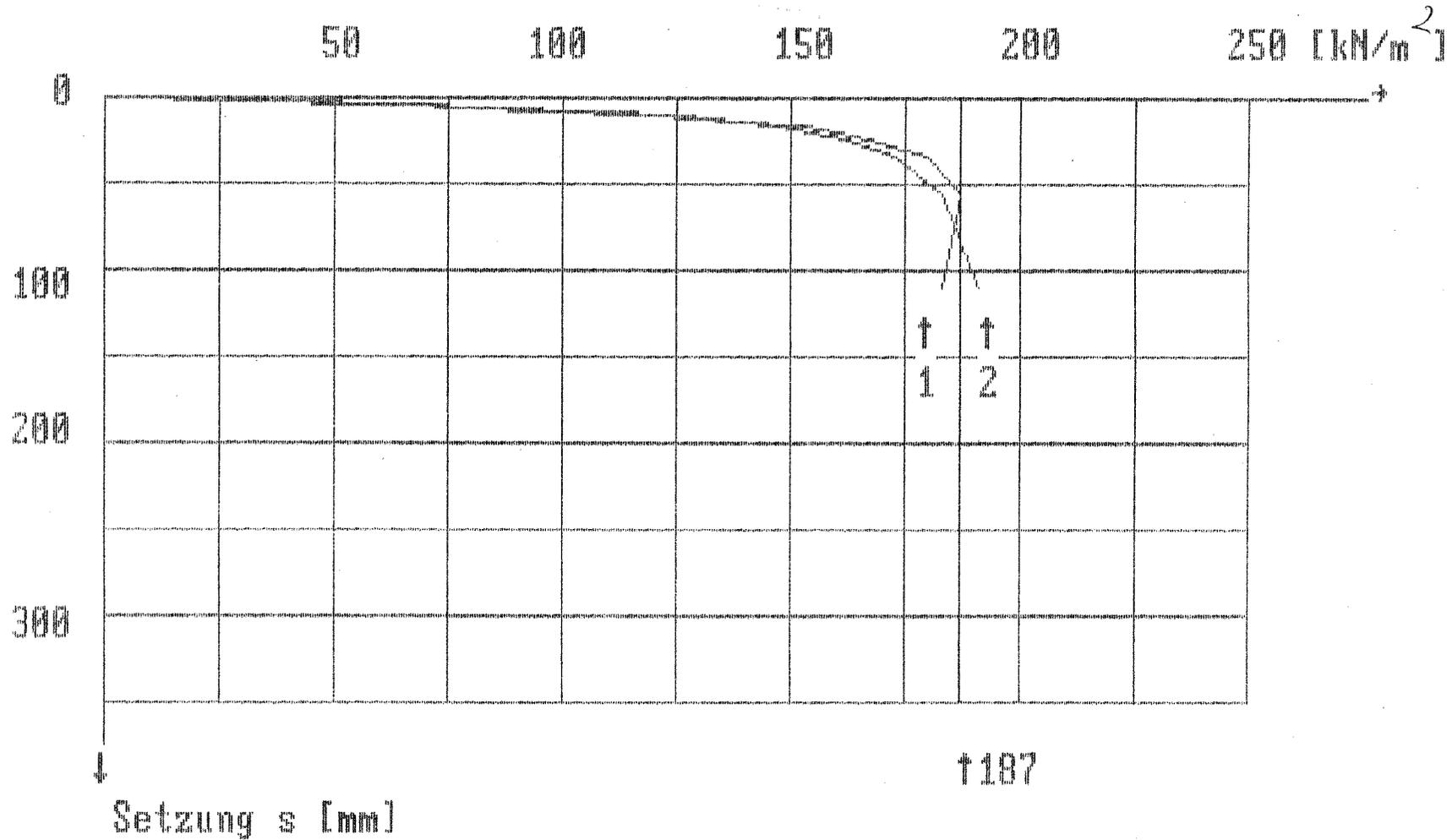


Pfahl 1

Belastungsschleifen 1 und 2

1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Mantelreibungs-Verschiebungslinie

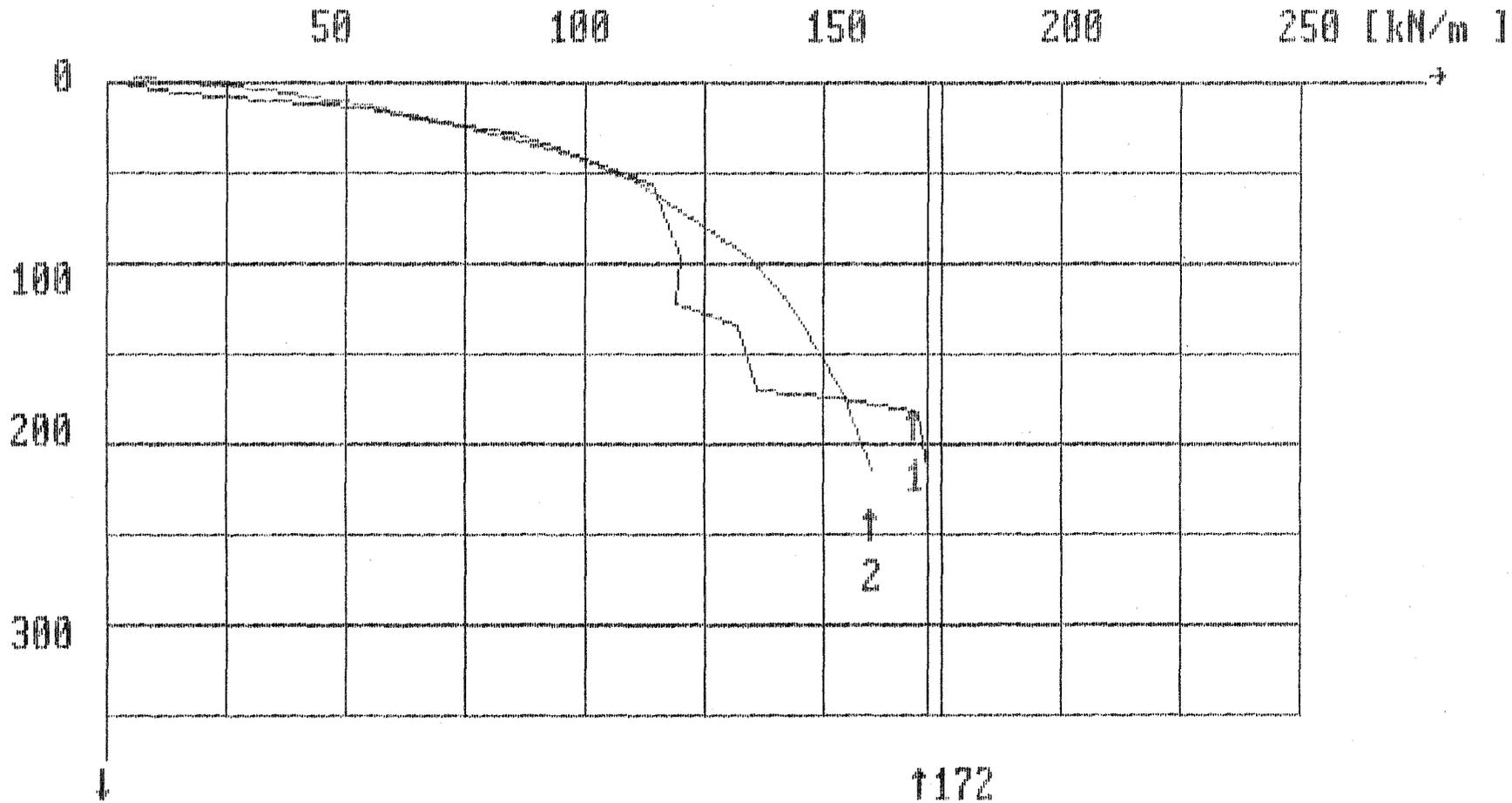


1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 1
Belastungsschleife 3

Anlage 8

Mantelreibung-Verschiebungslinie

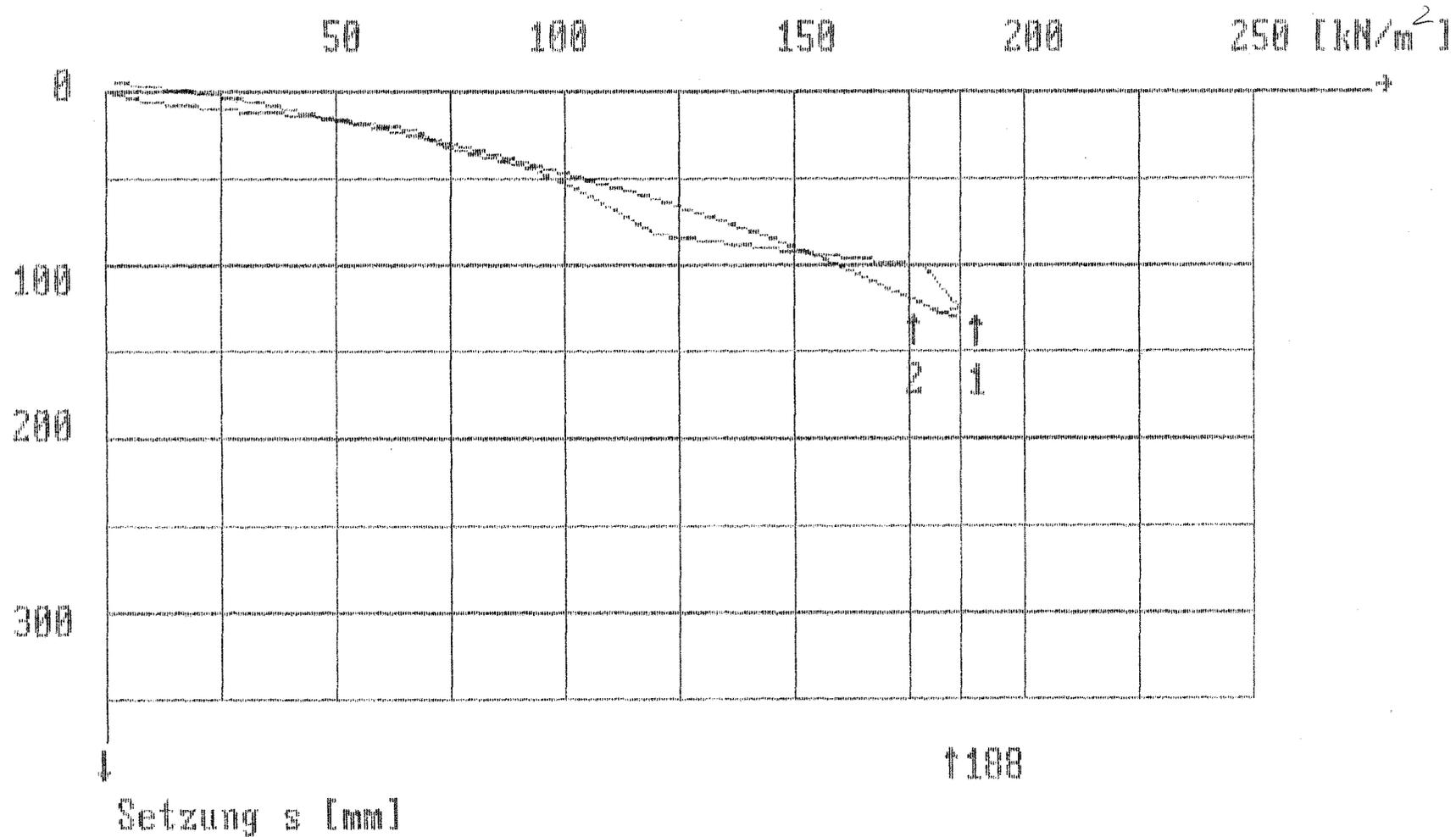


Setzung s [mm]

Pfahl 1
Belastungsschleife 4

1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

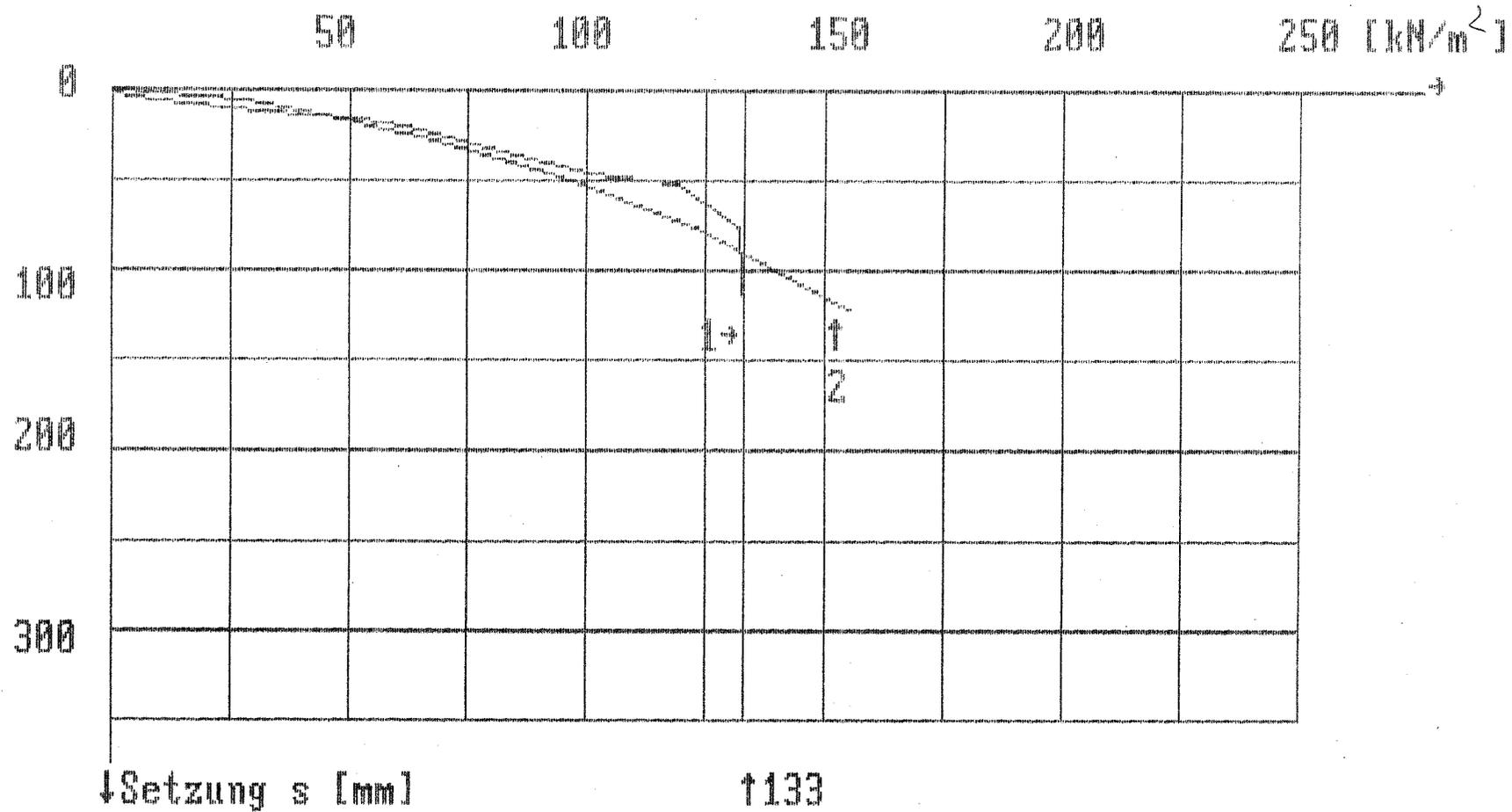
Mantelreibung-Verschiebungslinie



1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 1
Belastungsschleife 5

Mantelreibung-Verschiebungslinie



↓Setzung s [mm]

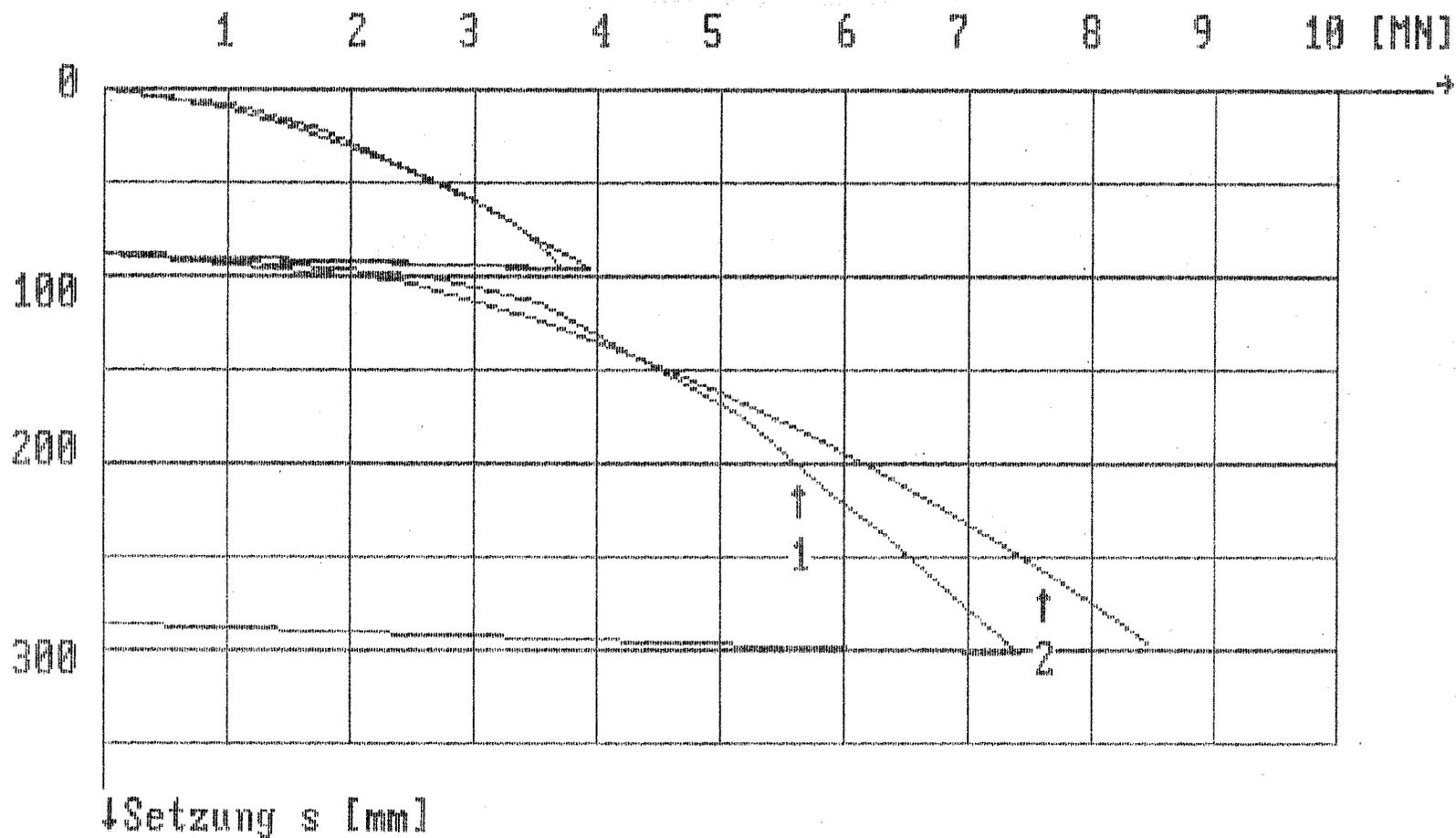
↑133

Pfahl 1

Belastungsschleife 6

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve

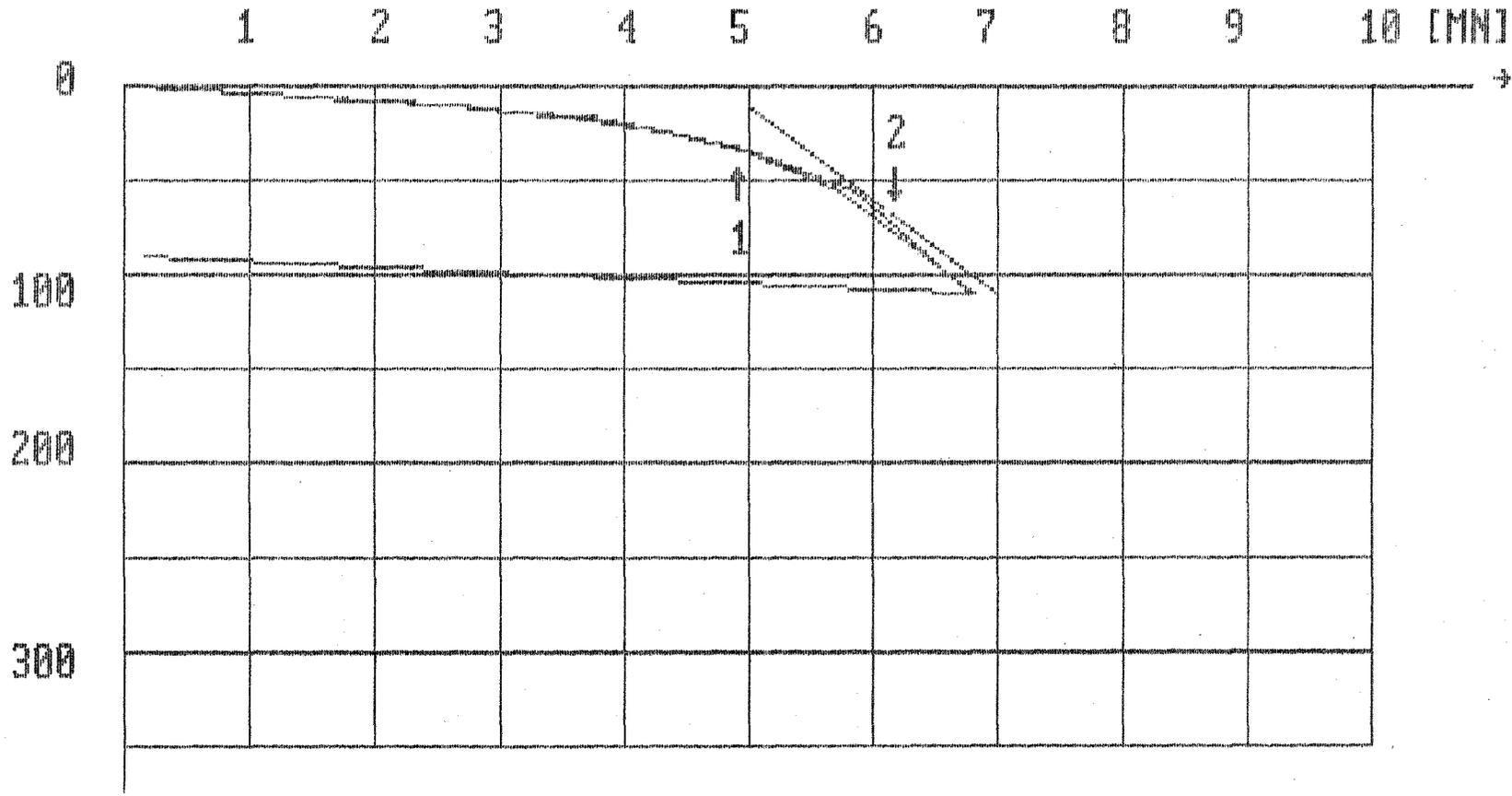
Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie



↓Setzung s [mm]
1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 1
Belastungsschleifen 1 und 2

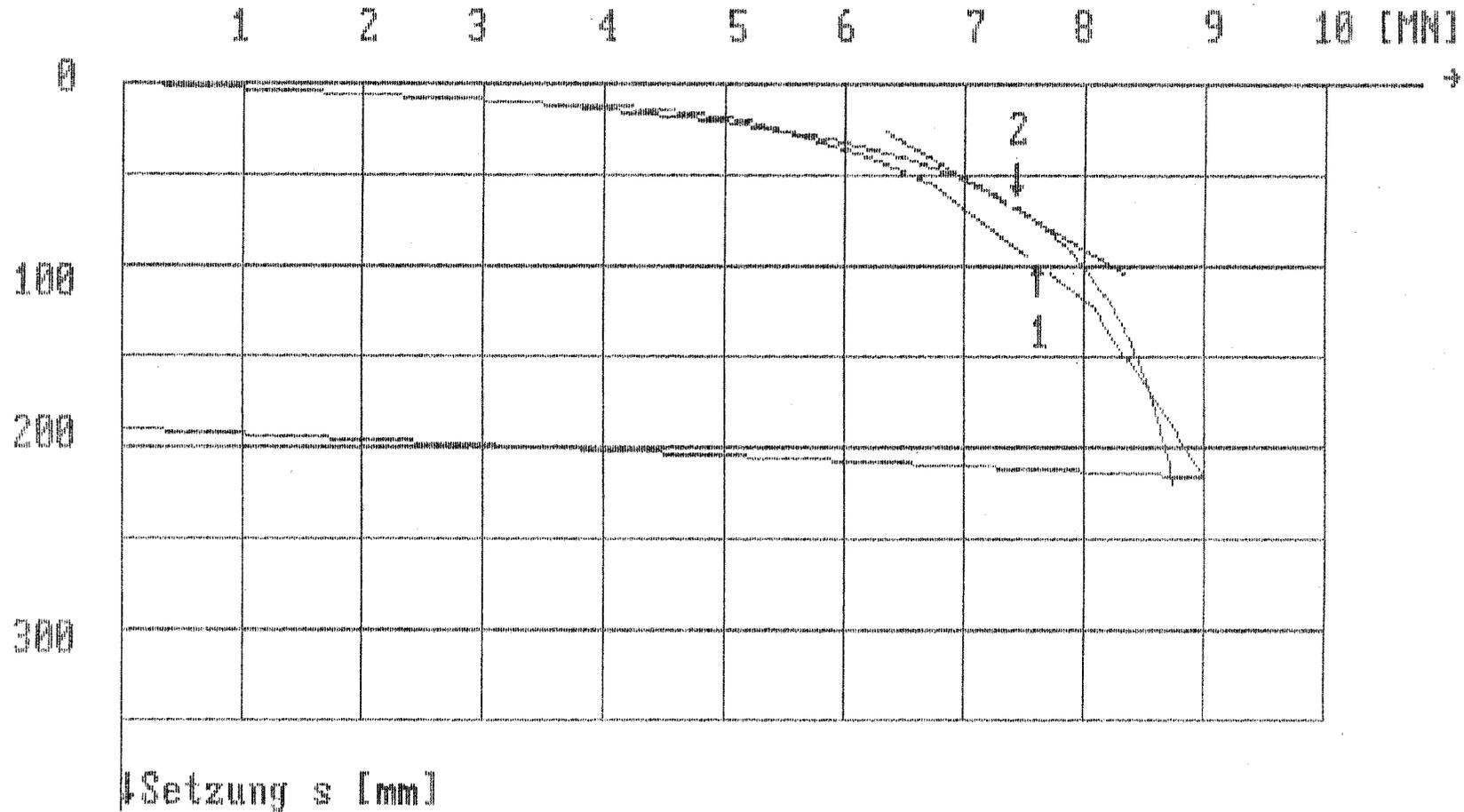
Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie



↓Setzung s [mm]
1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 1
Belastungsschleife 3

Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie

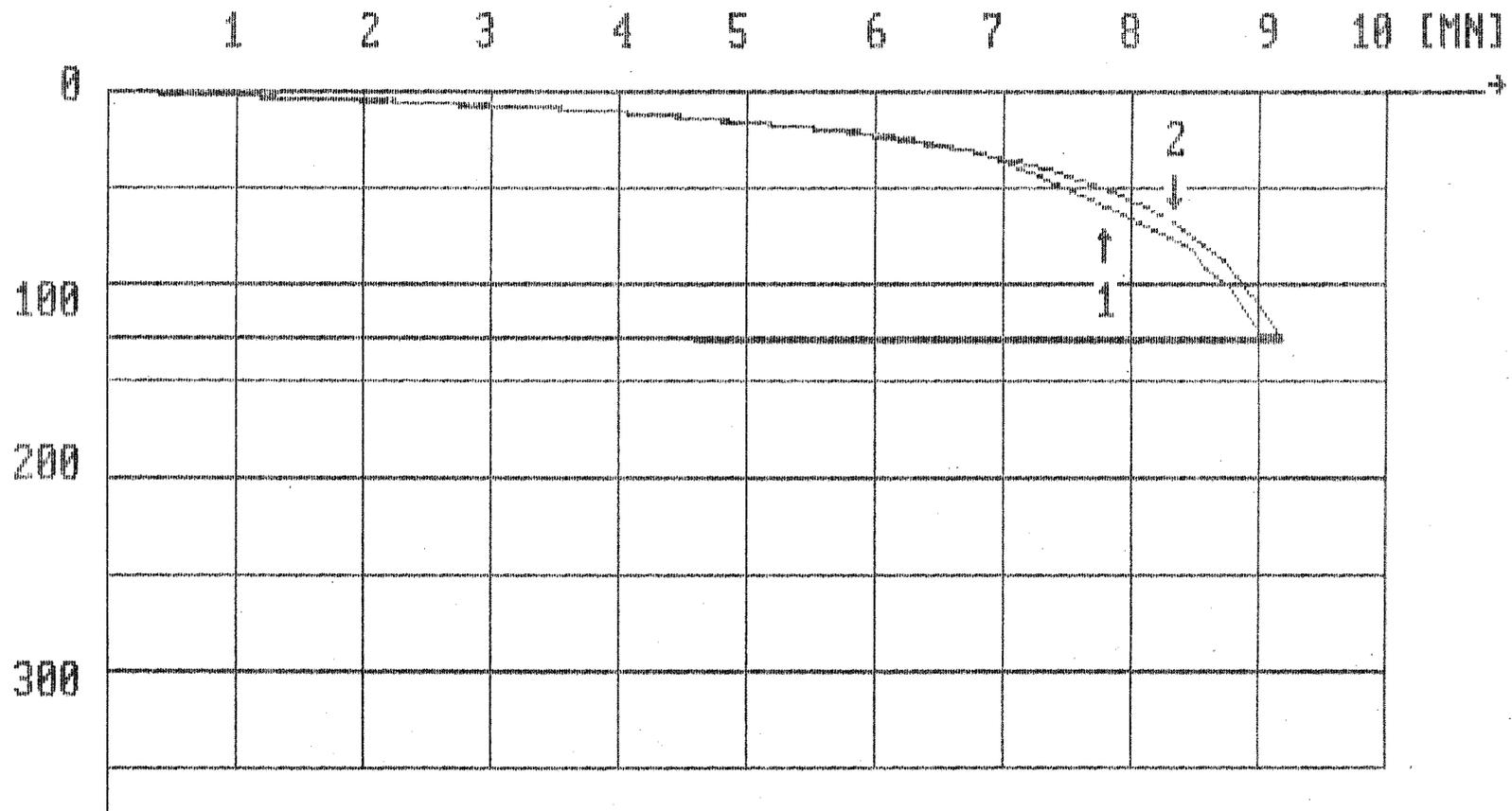


1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 1
Belastungsschleife 4

Anlage 14

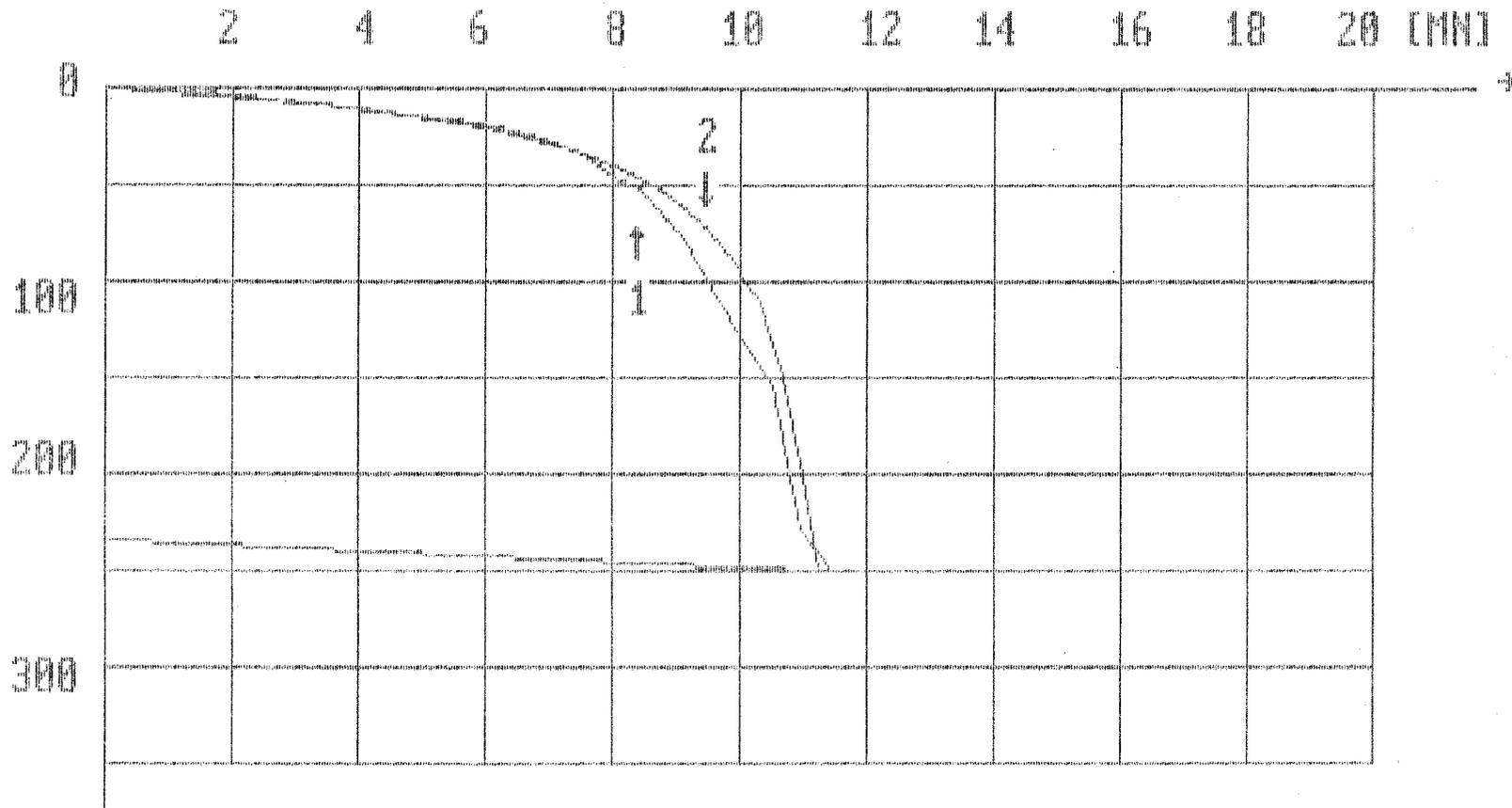
Pfahlsitzenwiderstands-Verschiebungslinie



↓ Setzung s [mm]

1 Versuchswerte Pfahl 1
2 Ausgleichkurve Belastungsschleife 5

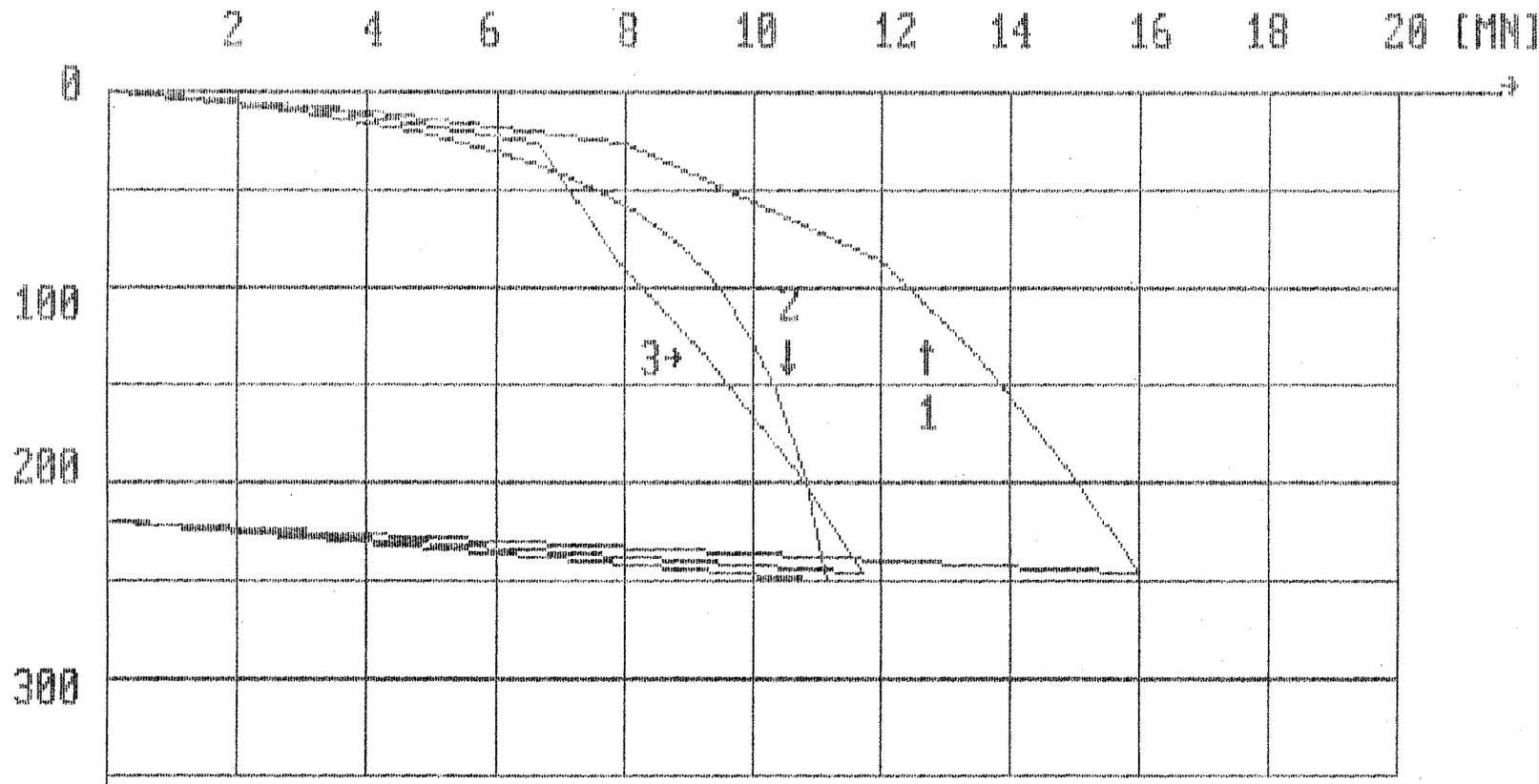
Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie



↓ Setzung s [mm]
1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 1
Belastungsschleife 6

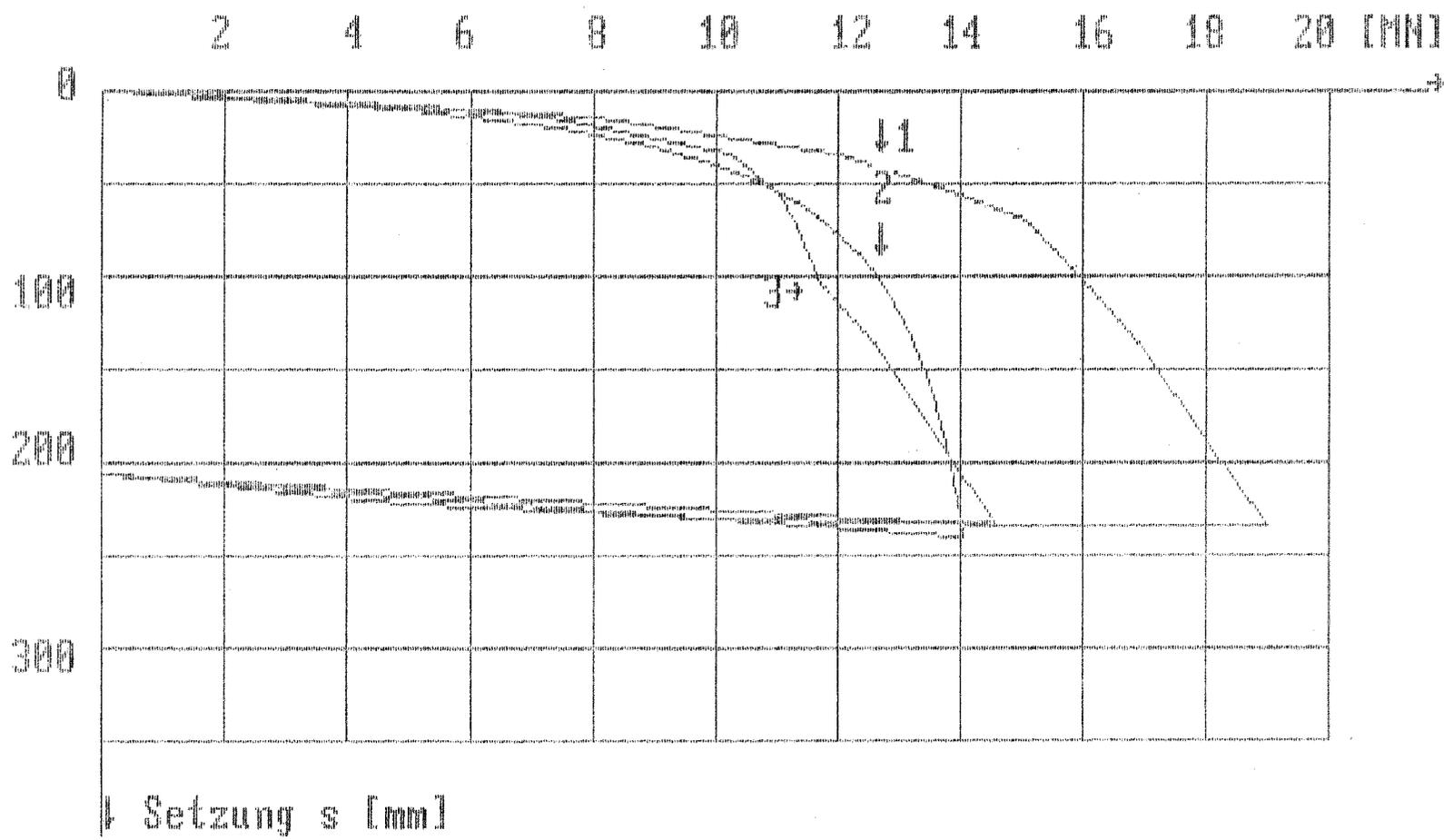
Gesamtlast-Verschiebungslinie



- ↓ Setzung s [mm]
- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve
- 3 Pfahlwiderstand

Pfahl 1
Belastungsschleife 7

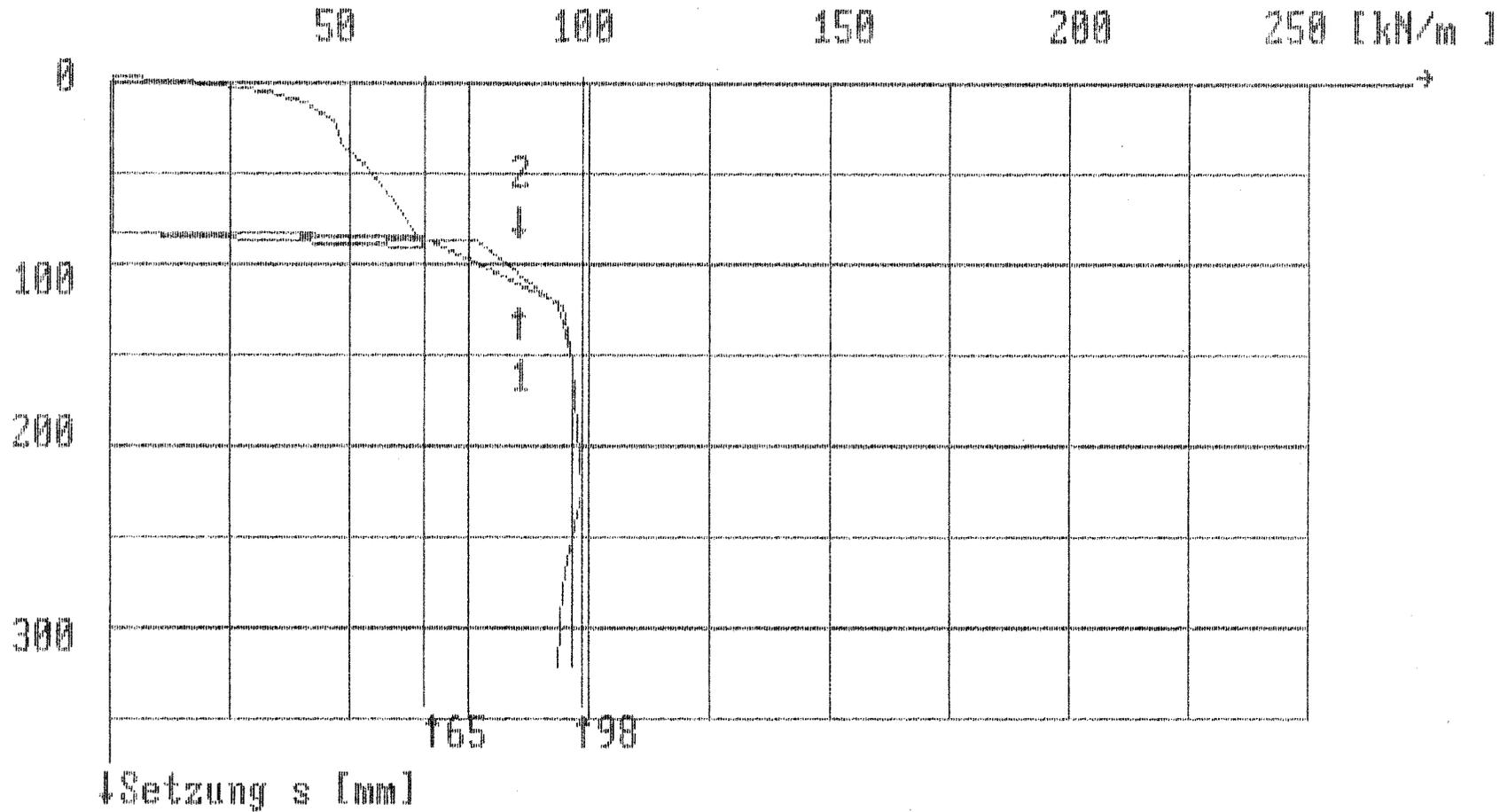
Gesamtlast-Verschiebungslinie



- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve
- 3 Pfahlwiderstand

Pfahl 1
Belastungsschleife 8

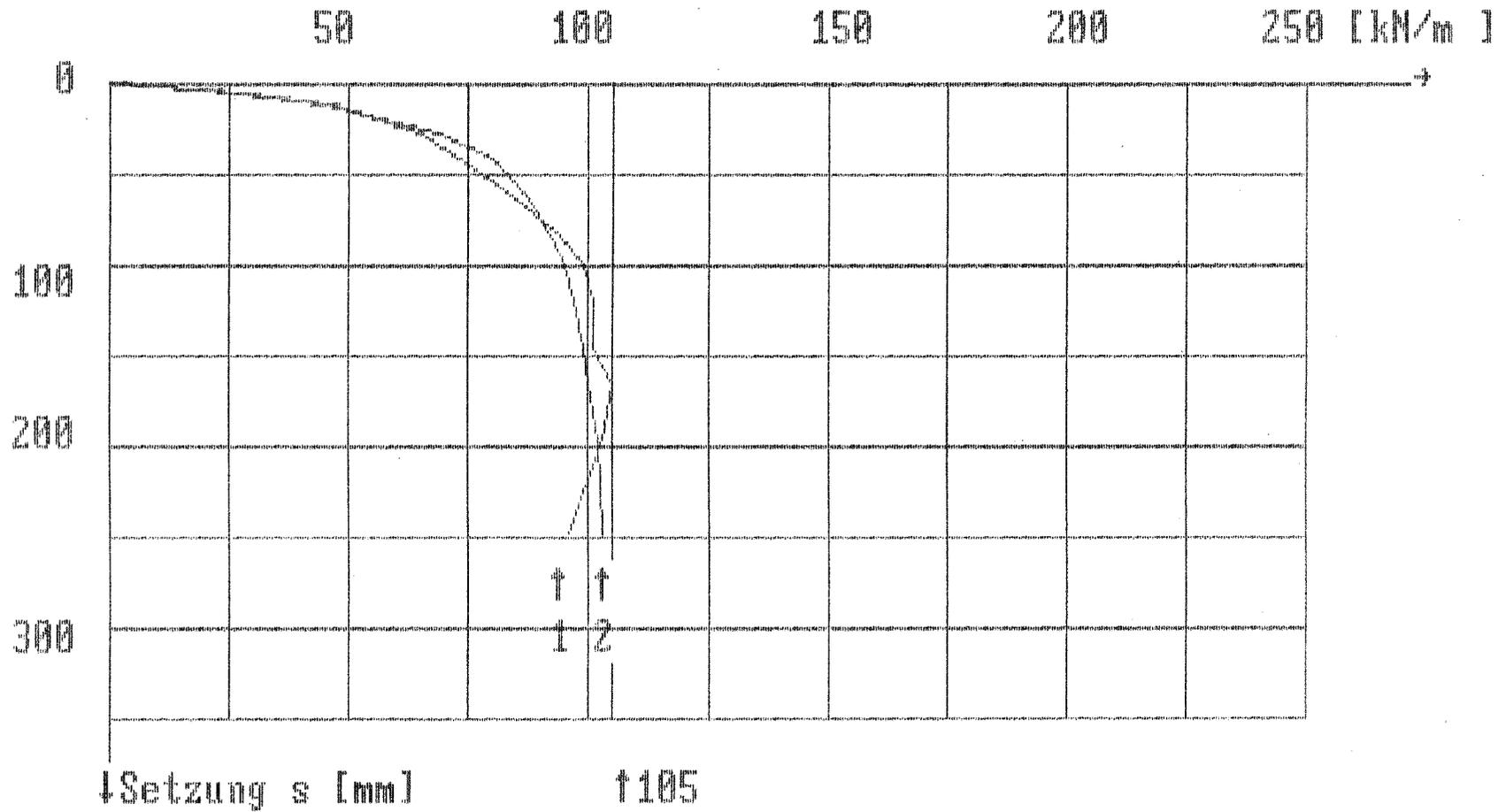
Mantelreibung-Verschiebungslinie



Pfahl 2
Belastungsschleifen 1 und 2

1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Mantelreibung-Verschiebungslinie



↓Setzung s [mm]

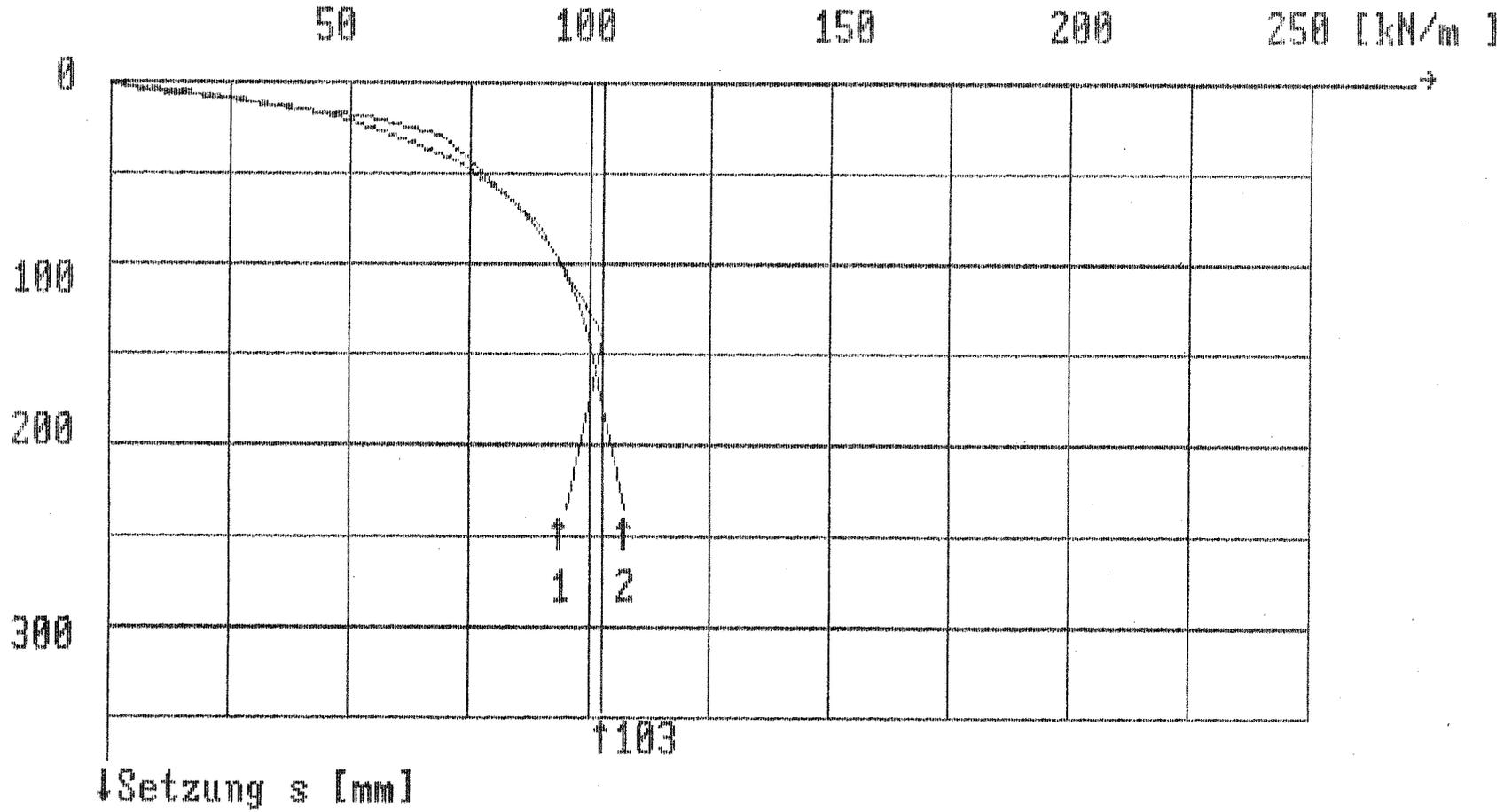
t105

Pfahl 2

Belastungsschleife 3

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve

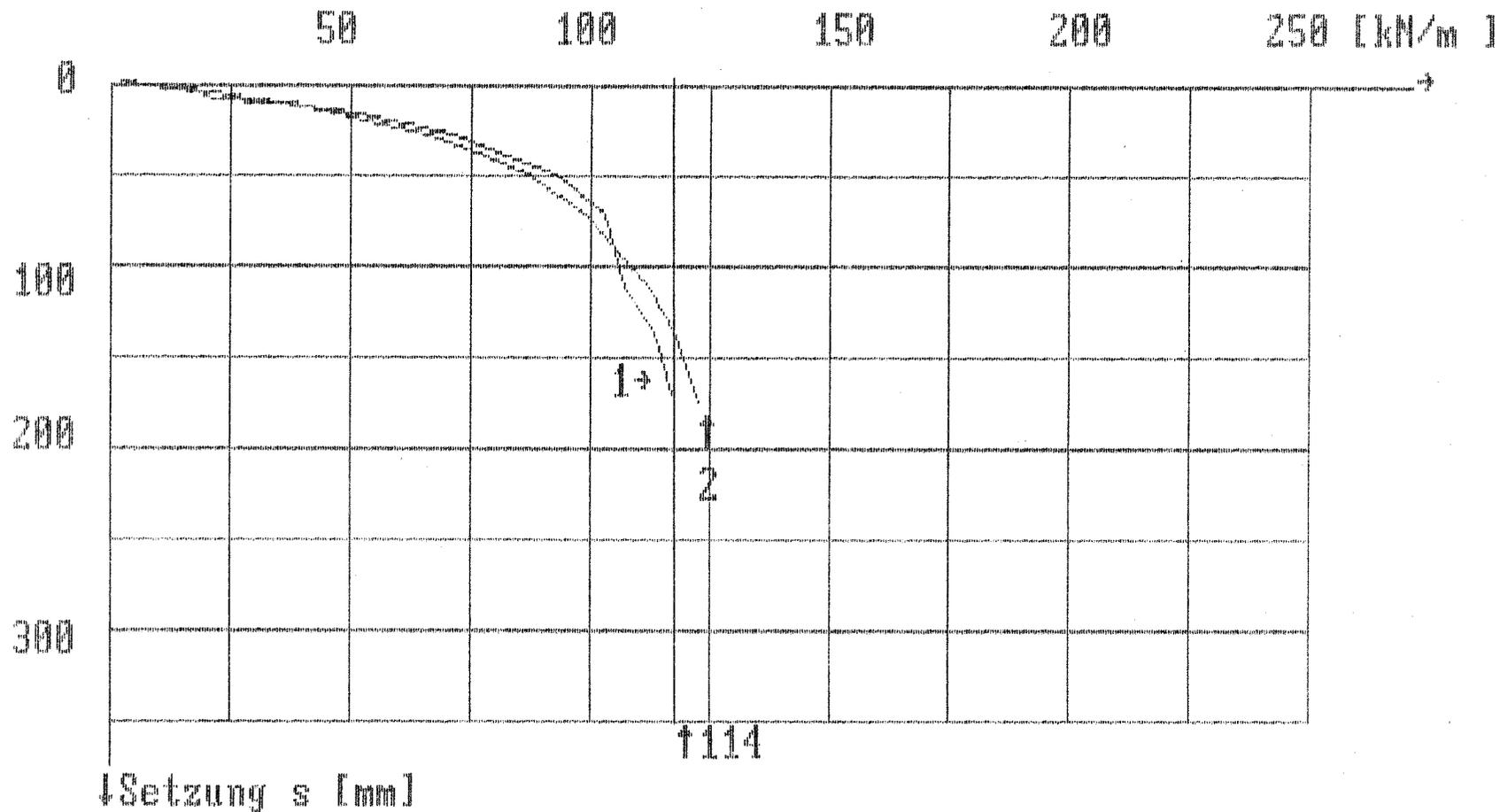
Mantelreibungs-Verschiebungslinie



Pfahl 2
Belastungsschleife 4

1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

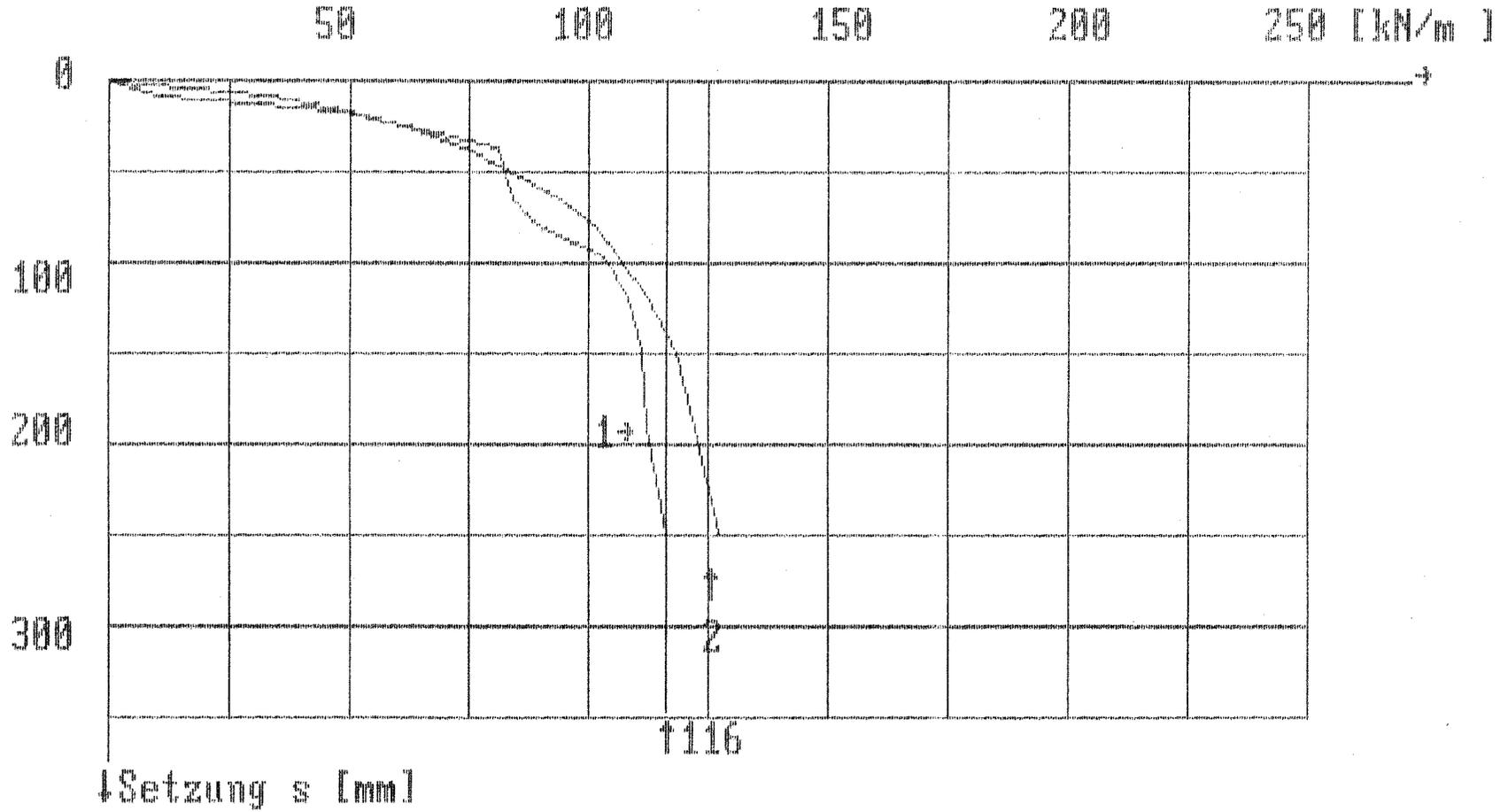
Mantelreibung-Verschiebungslinie



Pfahl 2
Belastungsschleife 5

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve

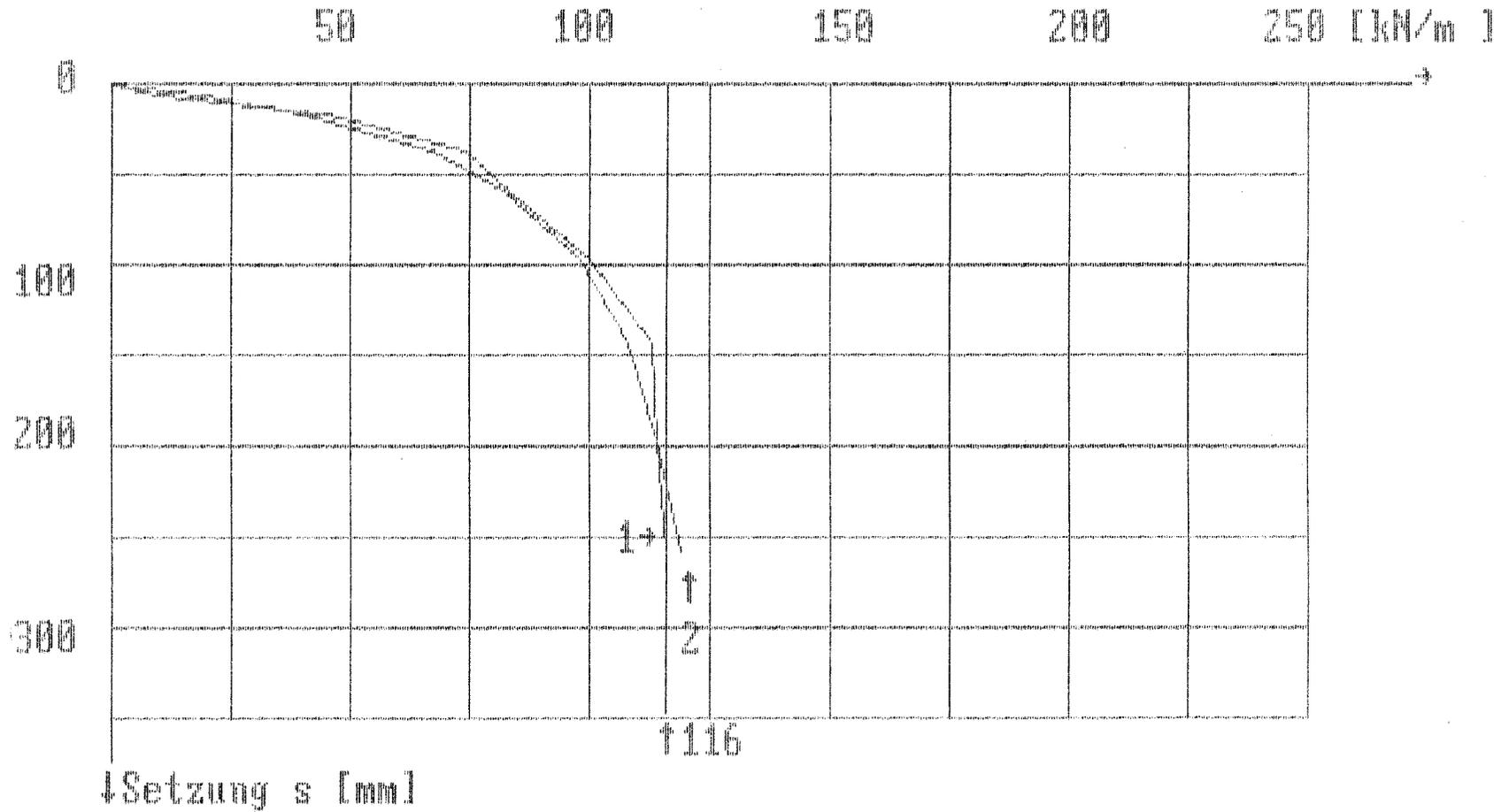
Mantelreibung-Verschiebungslinie



Pfahl 2
Belastungsschleife 6

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve

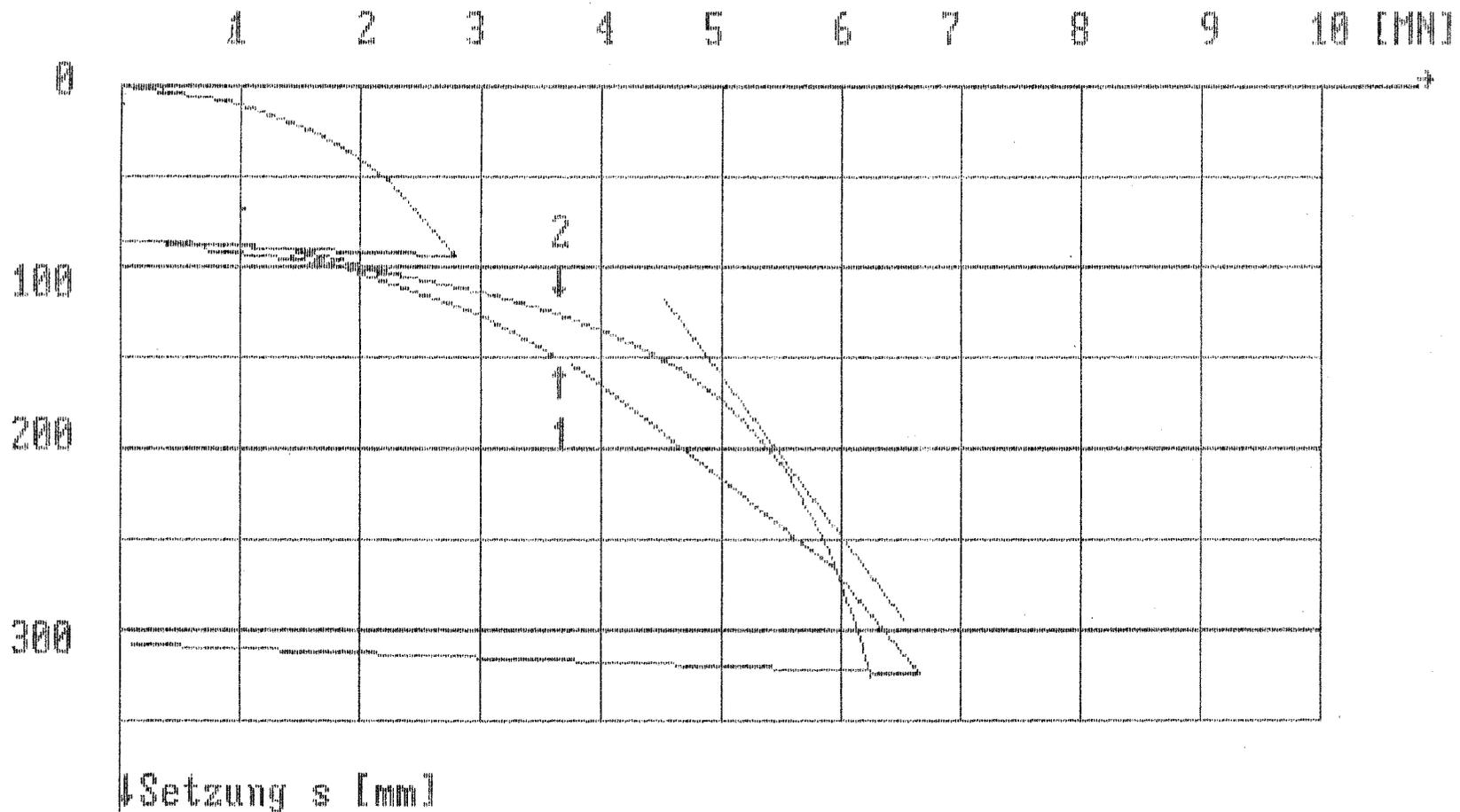
Mantelreibung-Verschiebungslinie



Pfahl 2
Belastungsschleife 7

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve

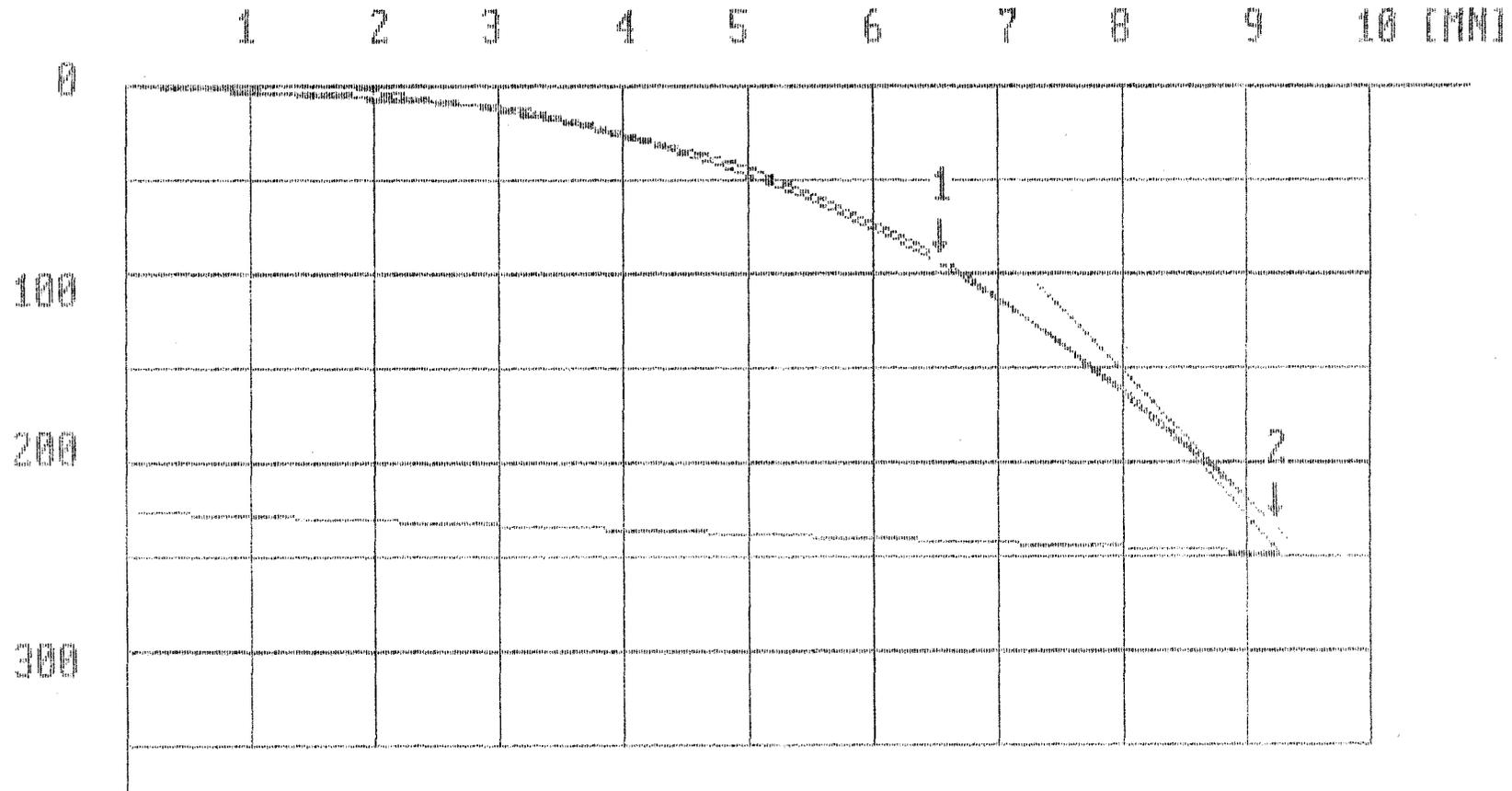
Pfahlsitzenwiderstands-Verschiebungslinie



1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 2
Belastungsschleifen 1 und 2

Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie



↓Setzung s [mm]

1 Versuchswerte

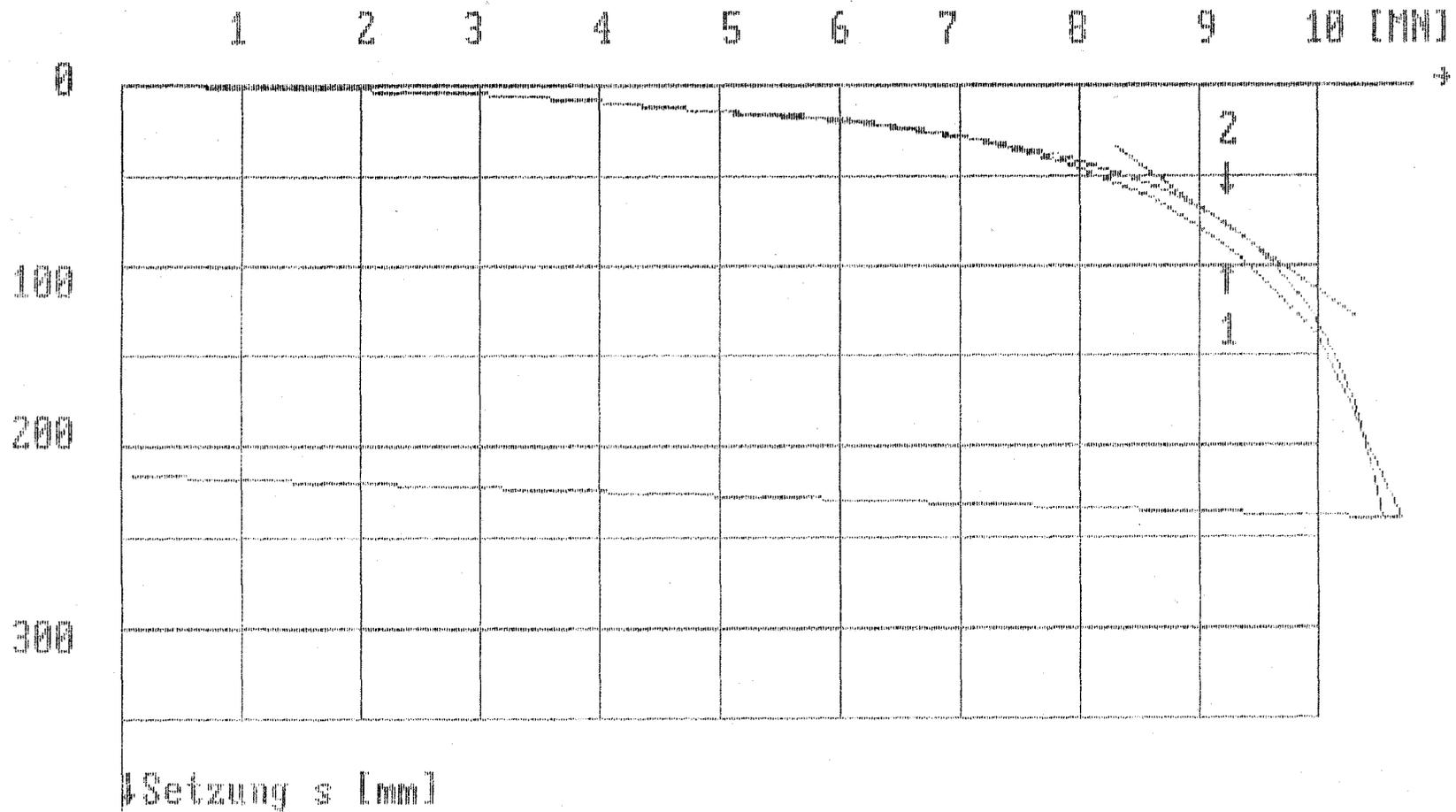
2 Ausgleichkurve

Pfahl 2

Belastungsschleife 3

Anlage 26

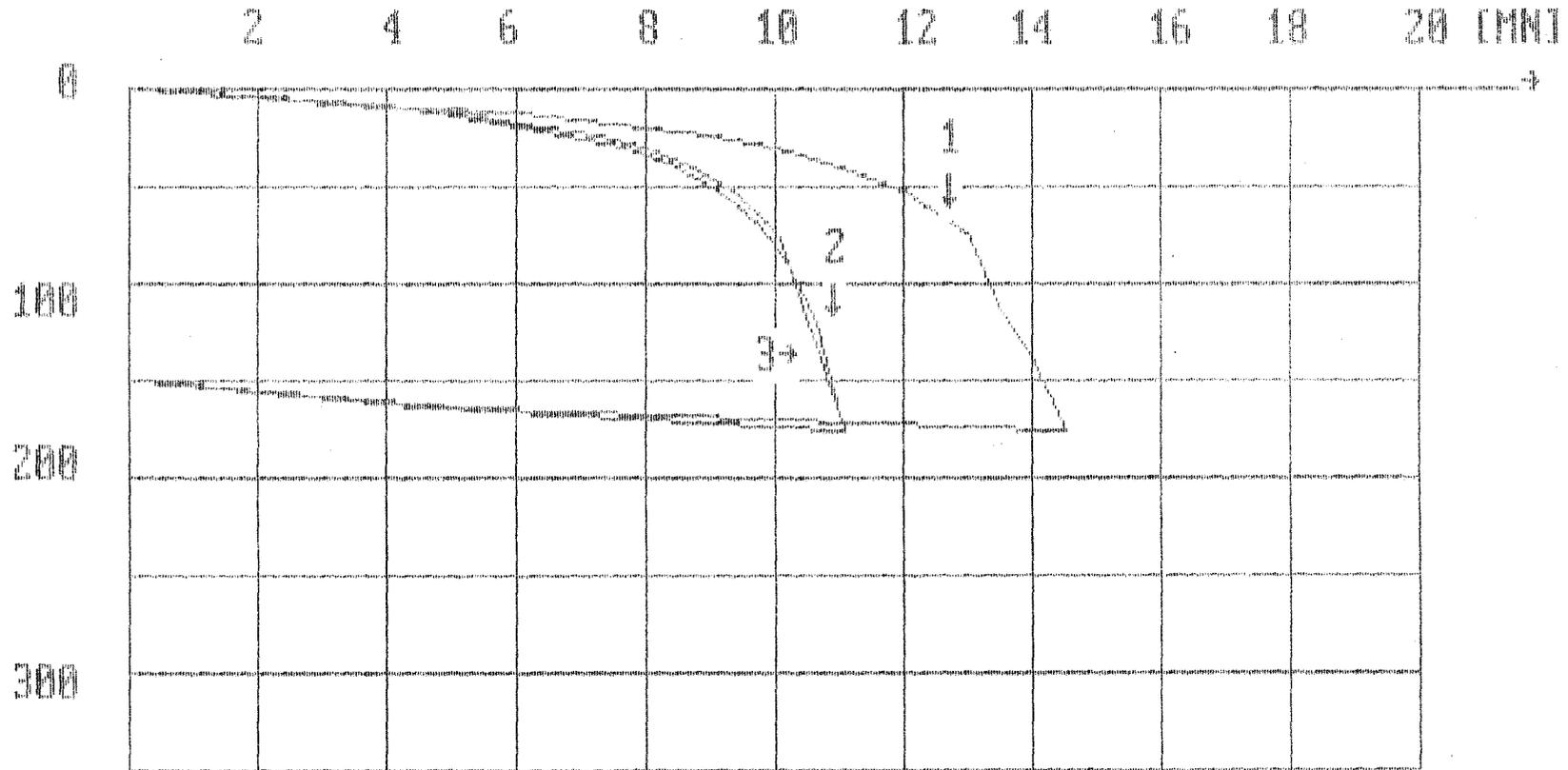
Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie



1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 2
Belastungsschleife 4

Gesamtlast-Verschiebungslinie

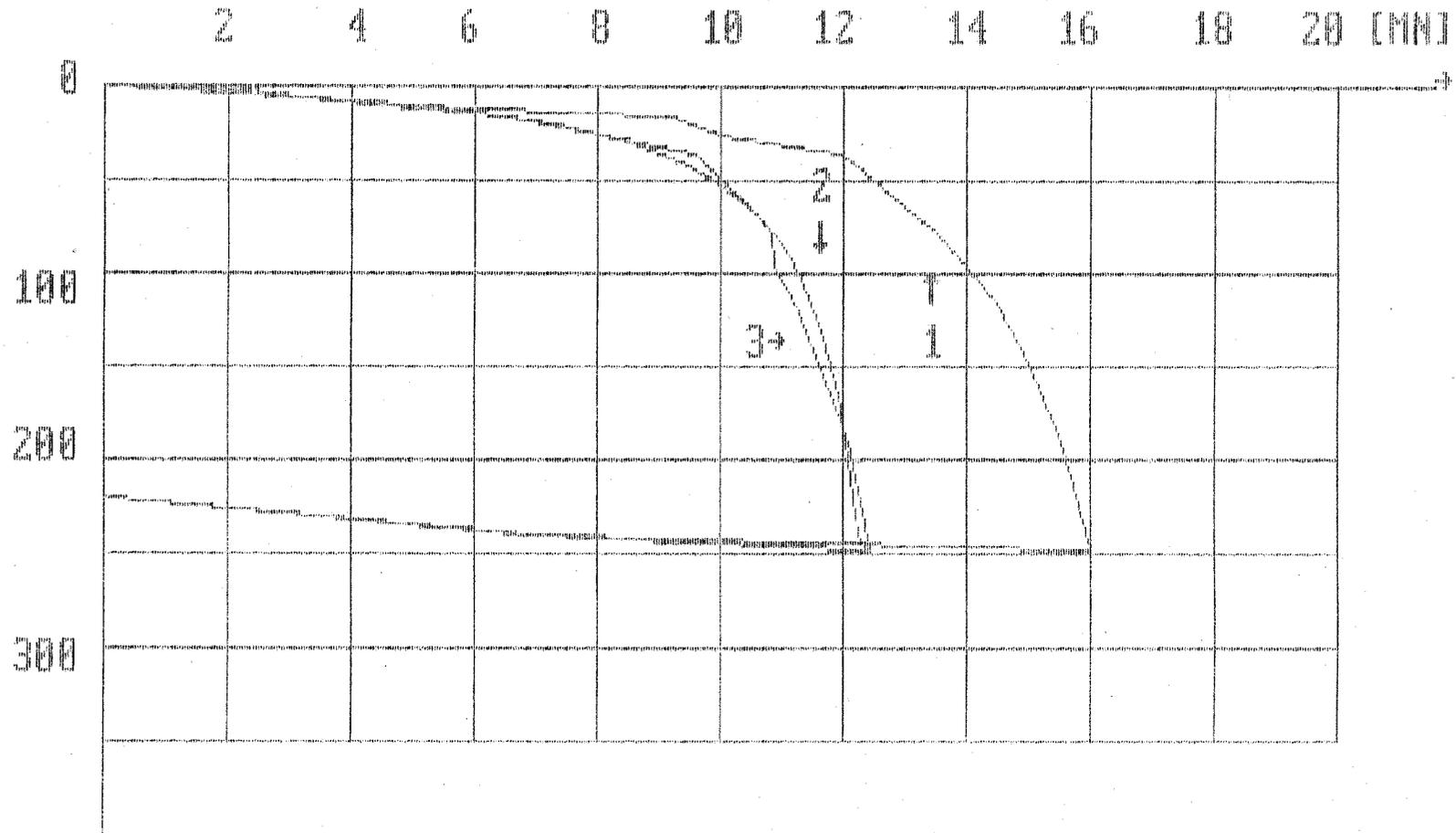


↓ Setzung s [mm]

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve
- 3 Pfahlwiderstand

Pfahl 2
Belastungsschleife 5

Gesamtlast-Verschiebungslinie



↓ Setzung s [mm]

1 Versuchswerte

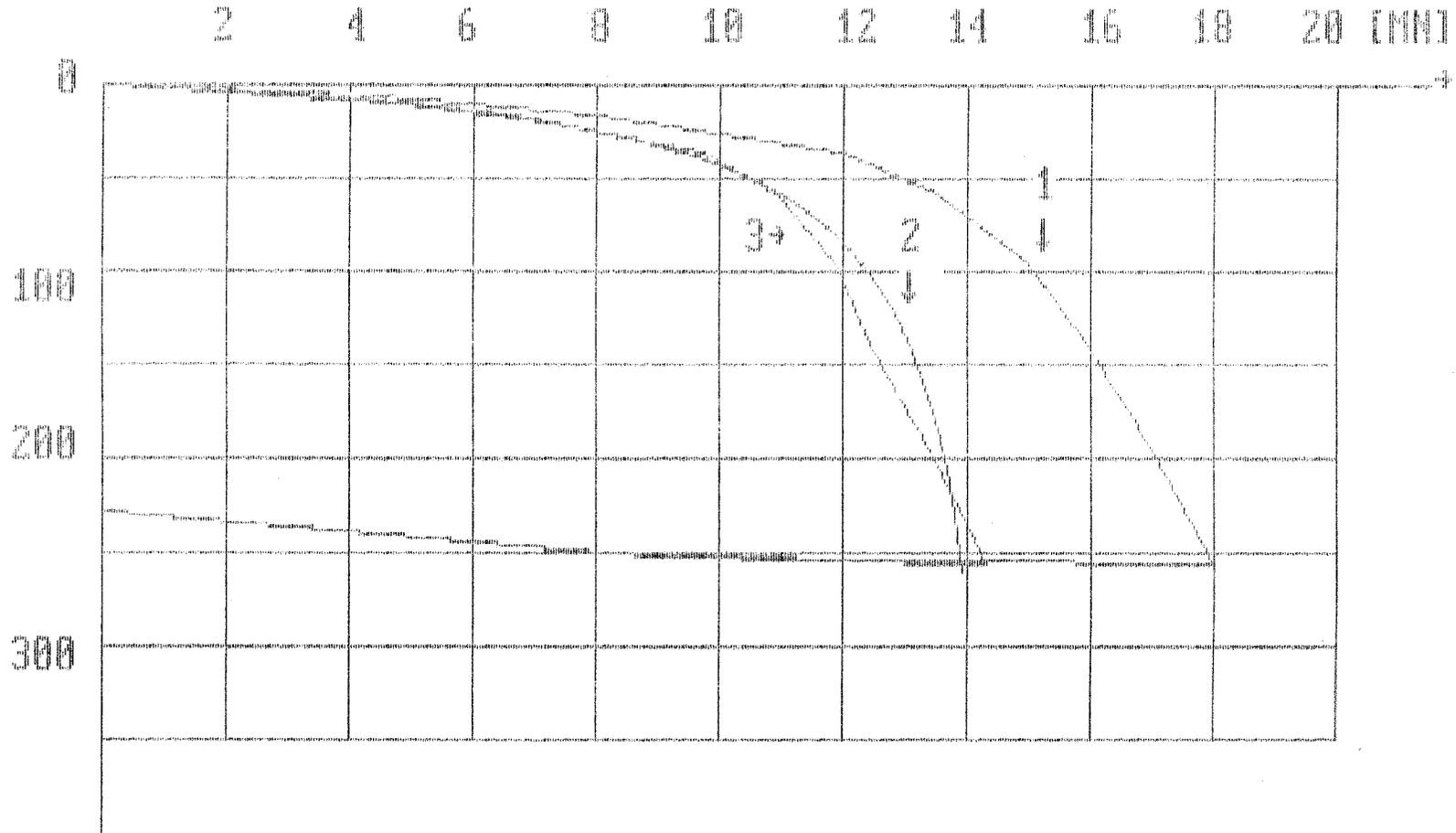
2 Ausgleichkurve

3 Pfahlwiderstand

Pfahl 2

Belastungsschleife 6

Gesamtlast-Verschiebungslinie

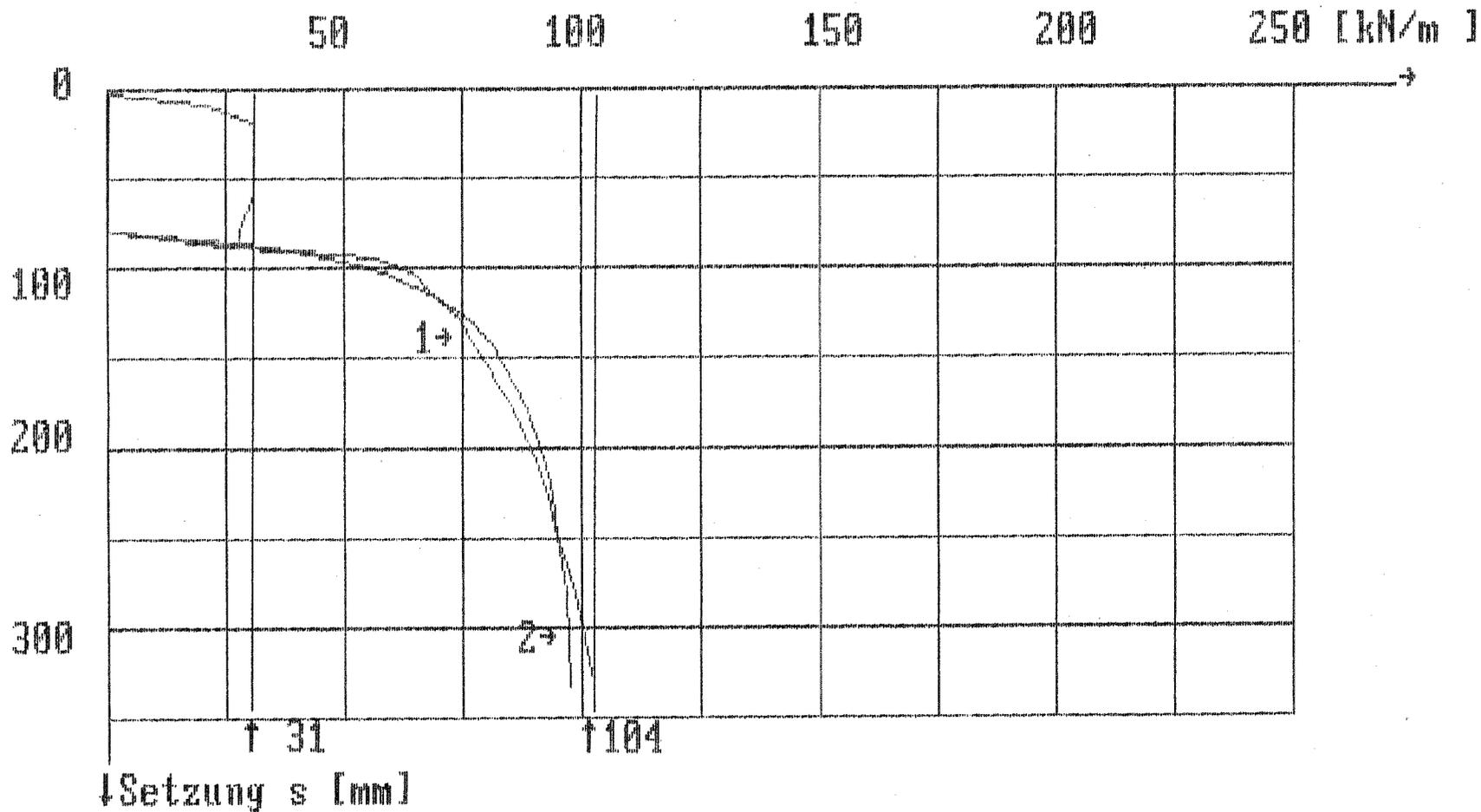


↓ Setzung s [mm]

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve
- 3 Pfahlwiderstand

Pfahl 2
Belastungsschleife 7

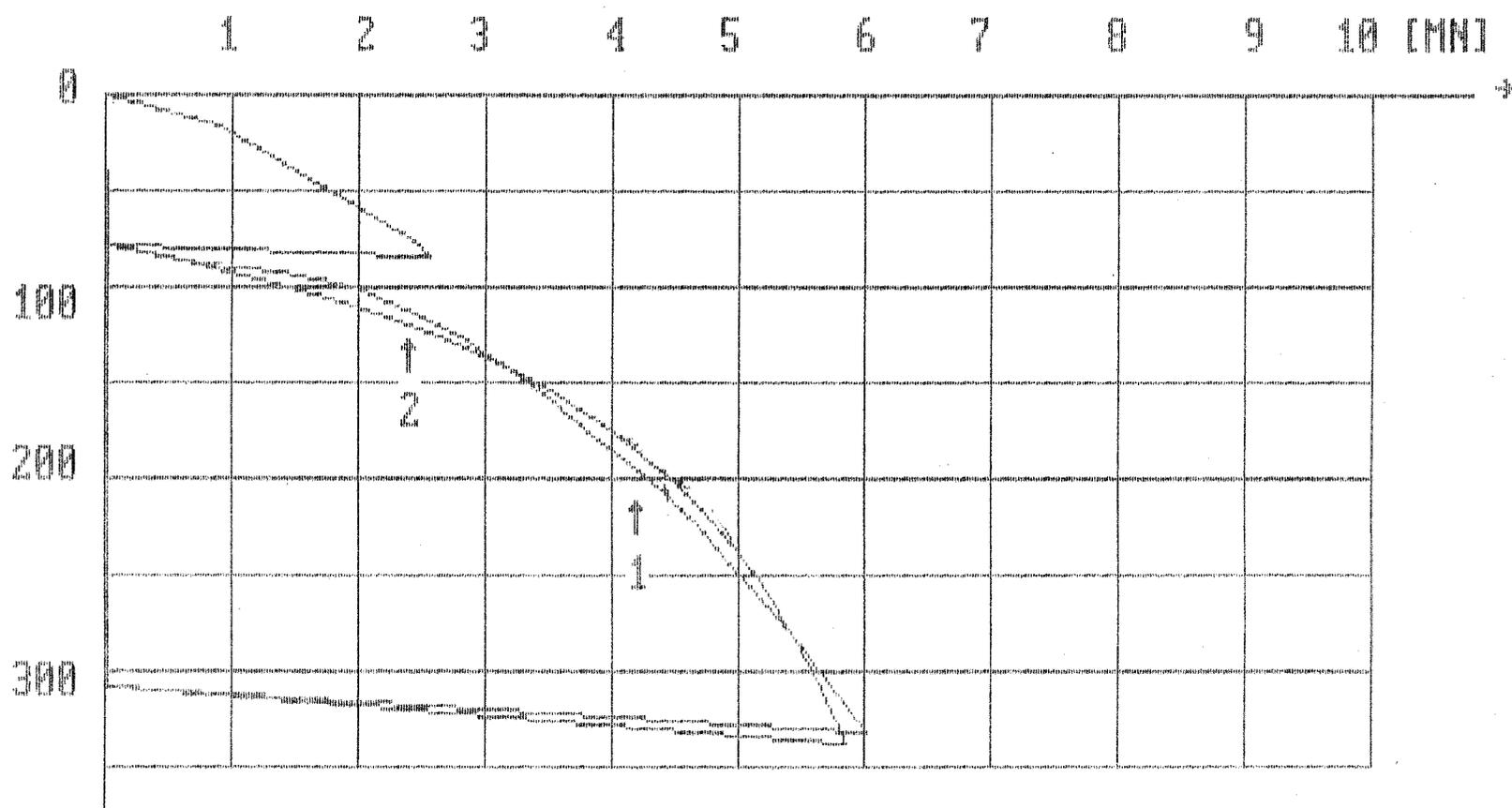
Mantelreibungs-Verschiebungslinie



Pfahl 4
Belastungsschleifen 1 und 2

- 1 Versuchswerte
- 2 Ausgleichkurve

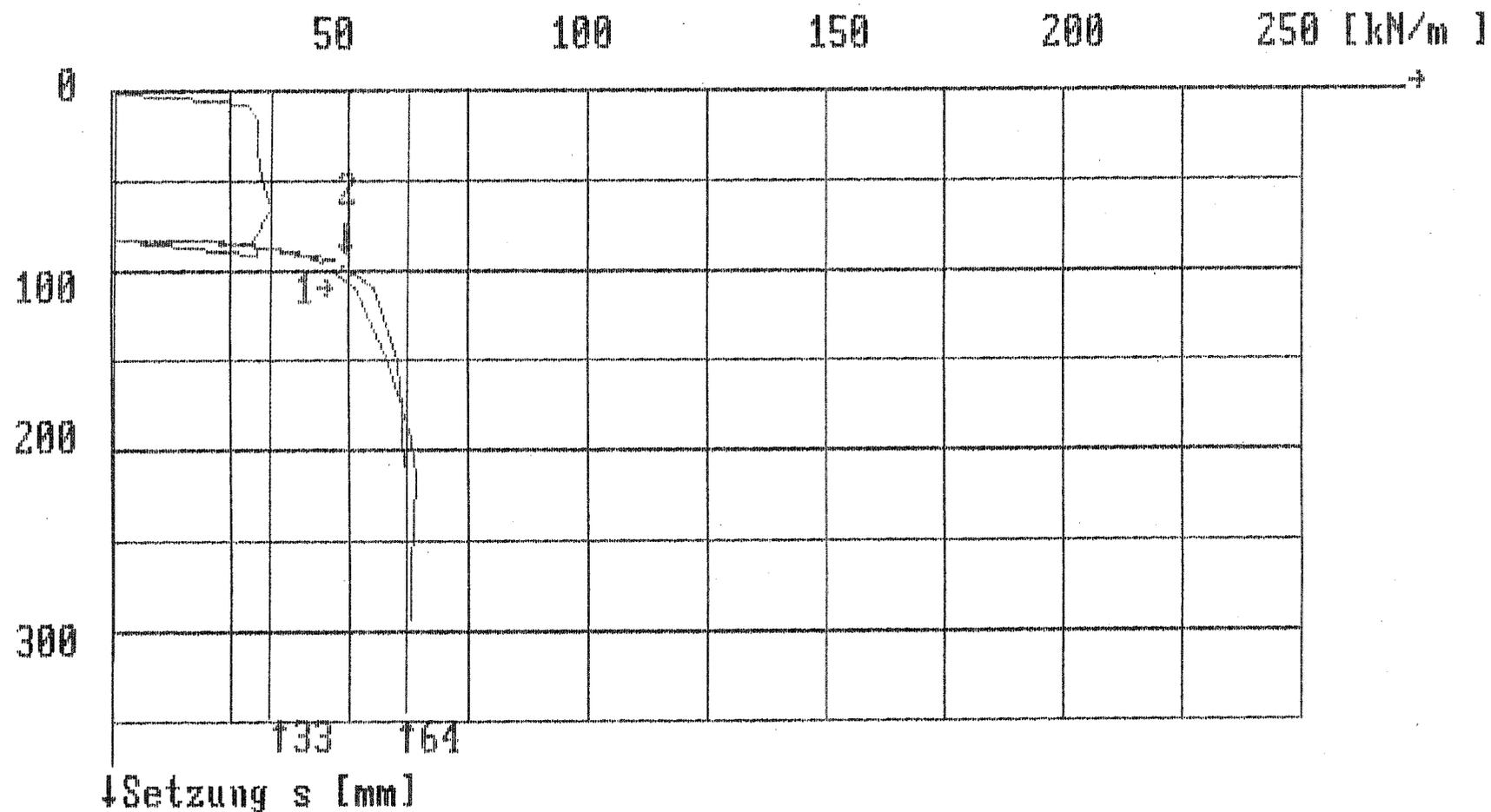
Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie



↓ Setzung s [mm]
 1 Versuchswerte
 2 Ausgleichkurve

Pfahl 4
 Belastungsschleifen 1 und 2

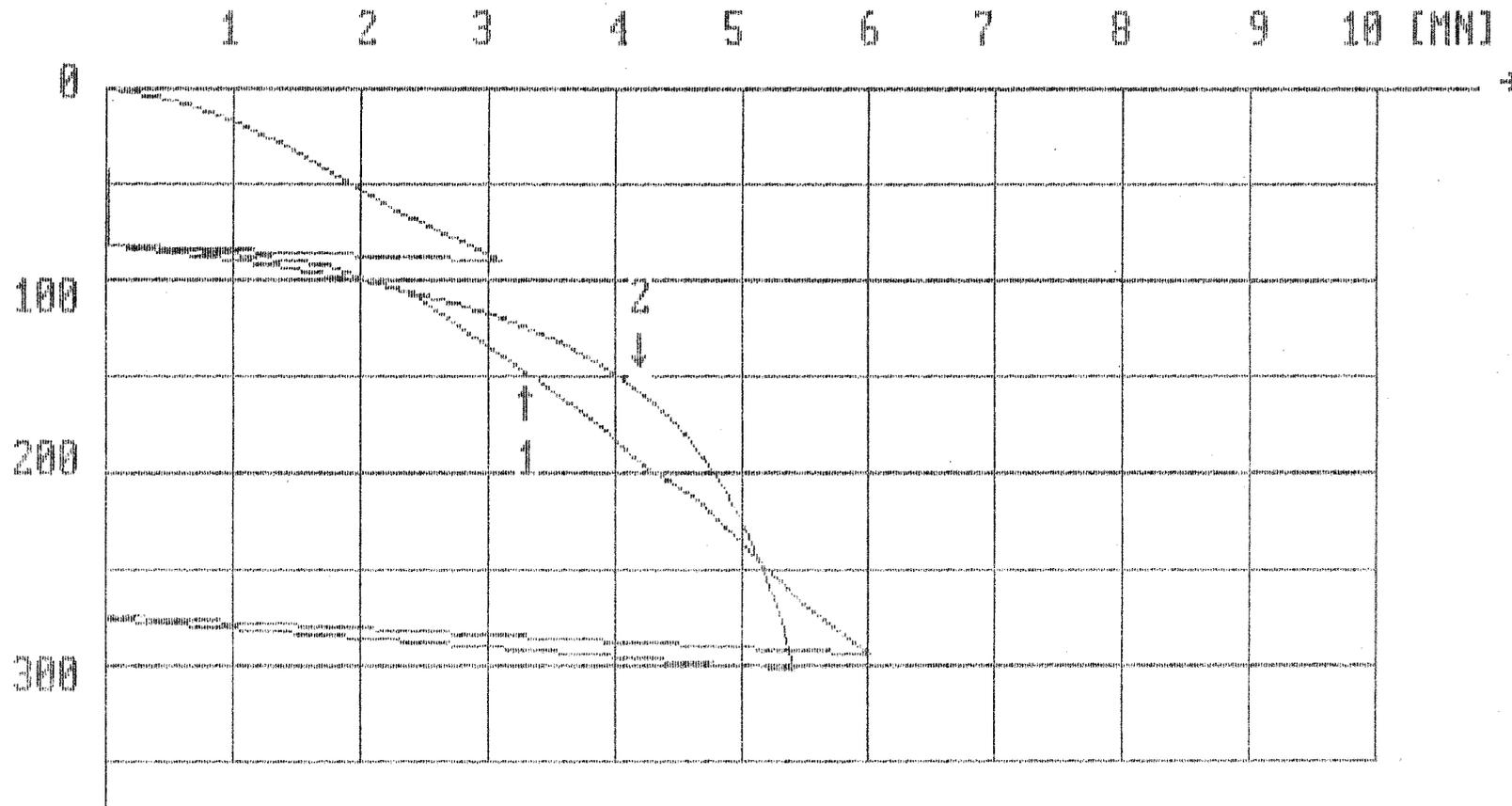
Mantelreibungs-Verschiebungslinie



Pfahl 5
Belastungsschleifen 1 und 2

1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahlspitzenwiderstands-Verschiebungslinie



↓ Setzung s [mm]
1 Versuchswerte
2 Ausgleichkurve

Pfahl 5
Belastungsschleifen 1 und 2

BS1

+41,47m NN

0 +41,38 m NN

10

20

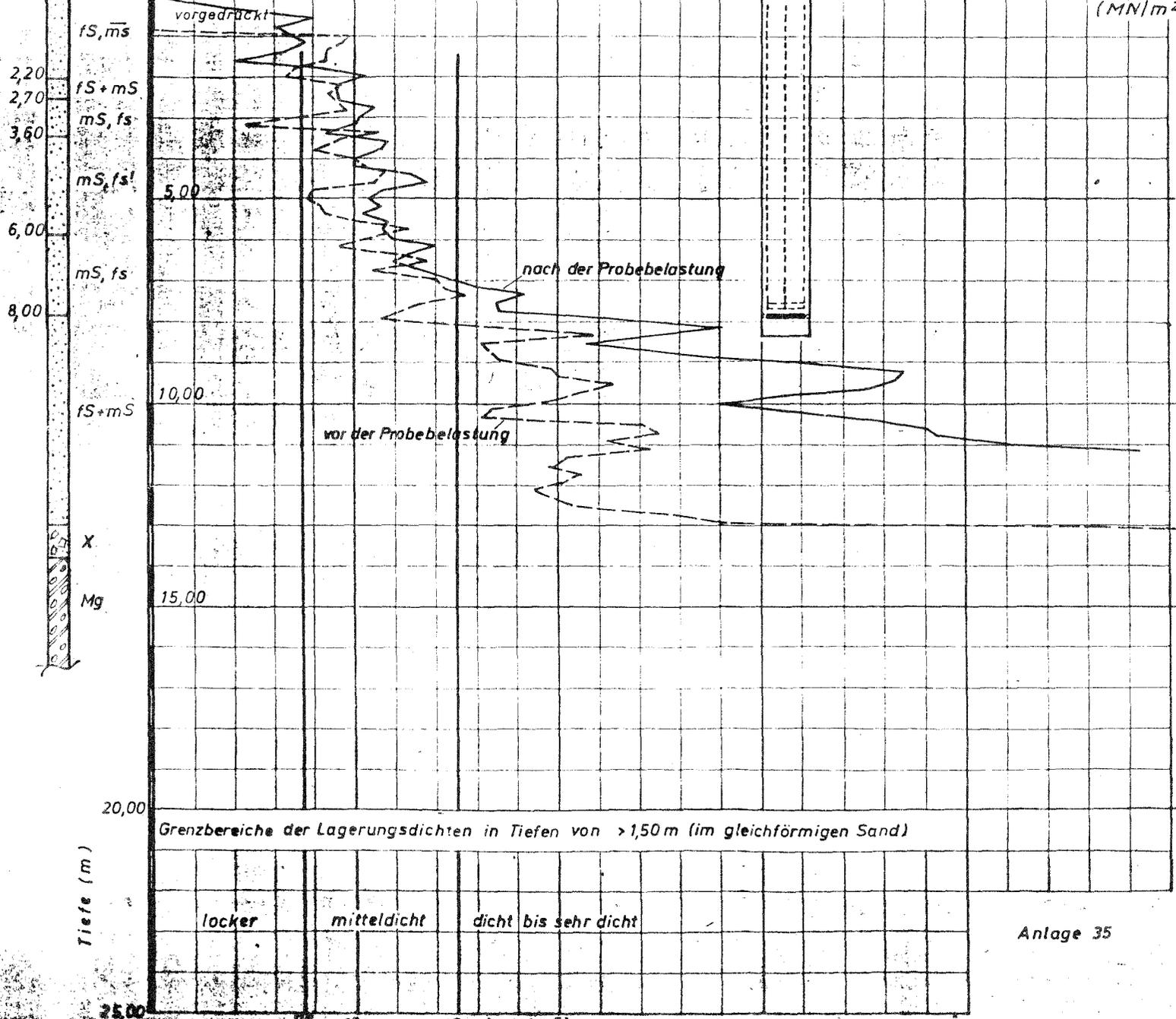
Pfahl 1

40

Spitzendruck

50

(MN/m²)



BS 1

+41,47m NN

0 ▽ +41,38 m NN

10

20

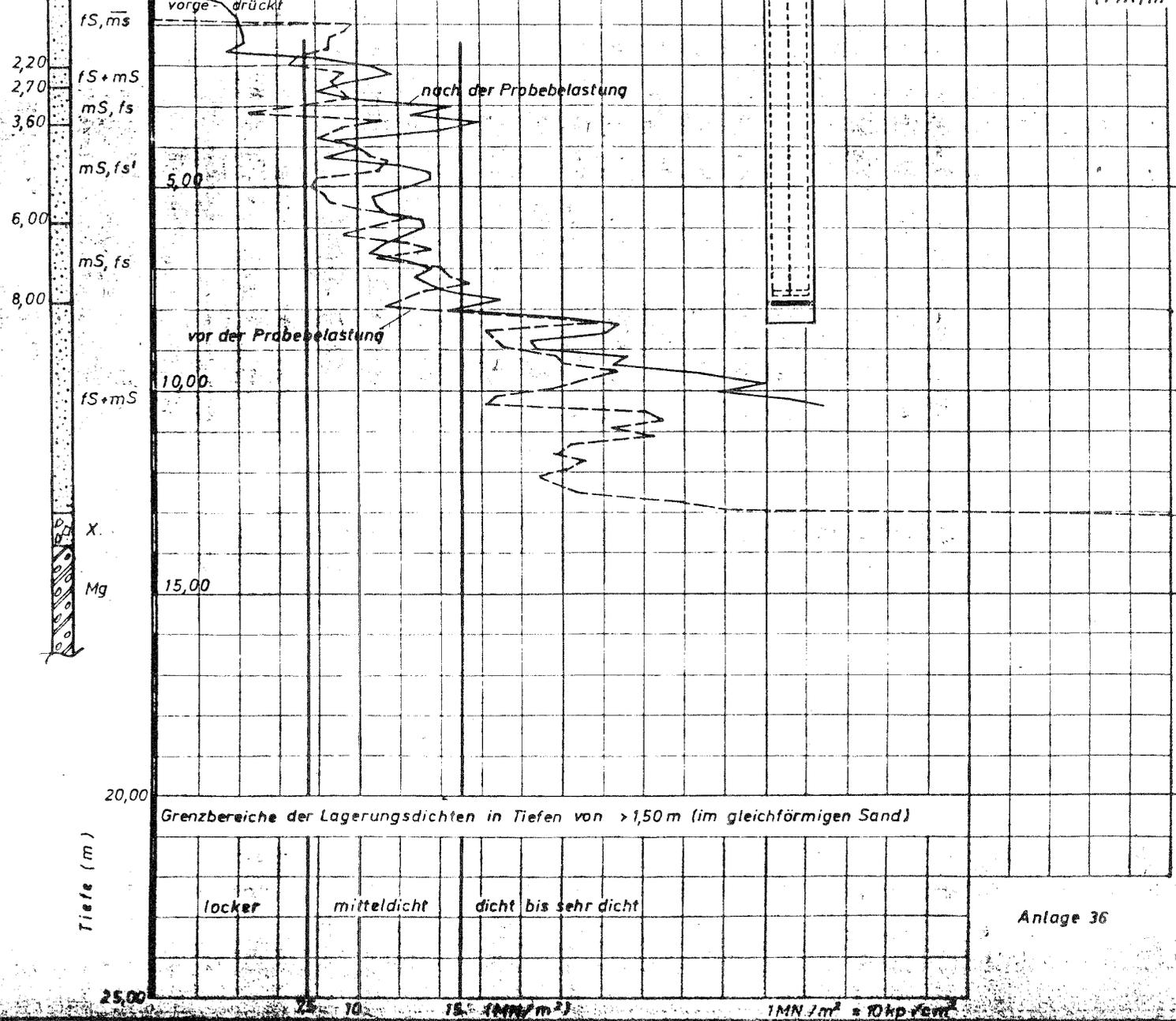
Pfahl 1

40

Spitzendruck

50

(MN/m²)



Grenzbereiche der Lagerungsdichten in Tiefen von >1,50 m (im gleichförmigen Sand)

locker

mitteldicht

dicht bis sehr dicht

Anlage 36

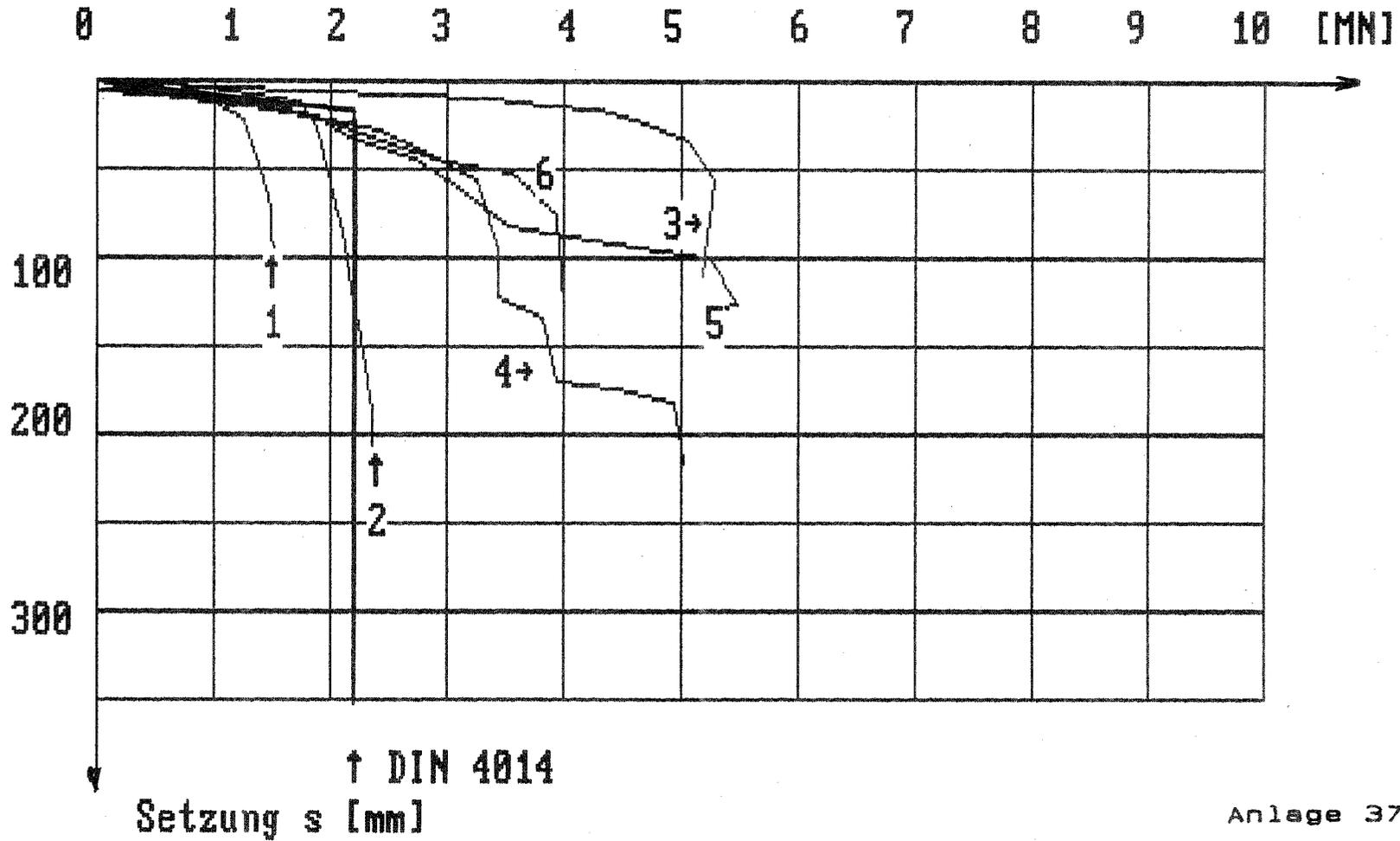
25,00

10

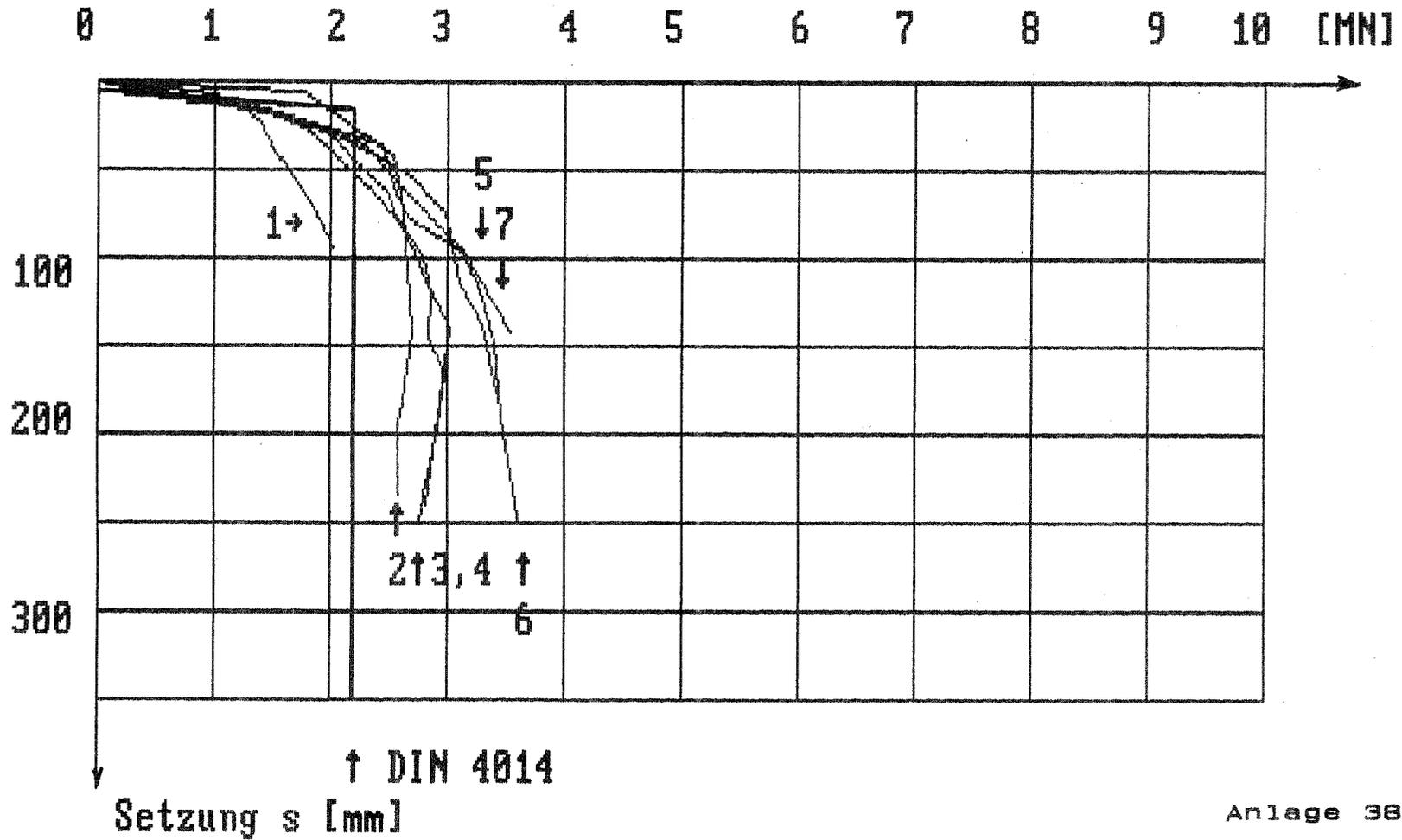
15 (MN/m²)

1 MN/m² = 10 kp/cm²

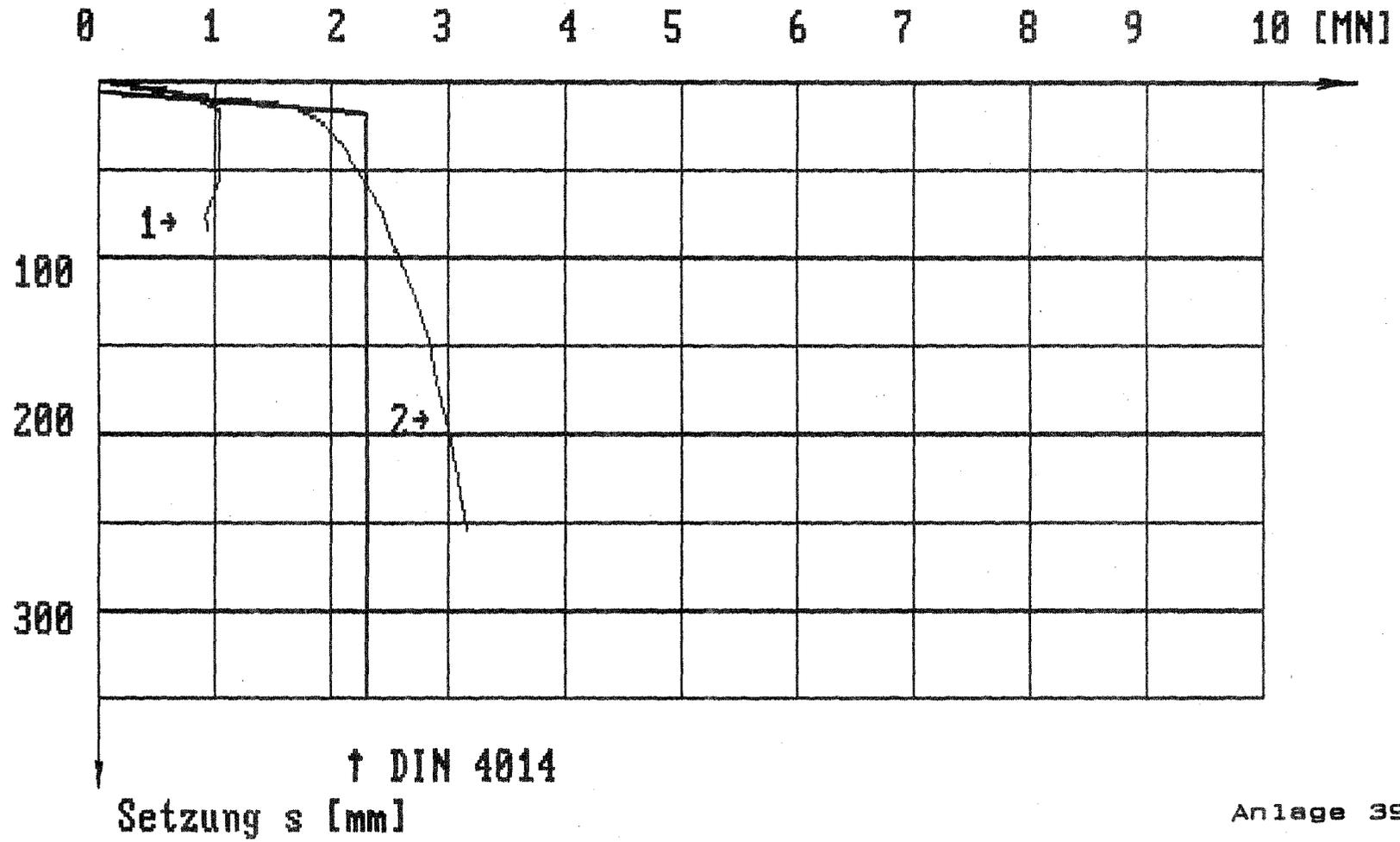
Pfahlmantelkraft Pfahl 1



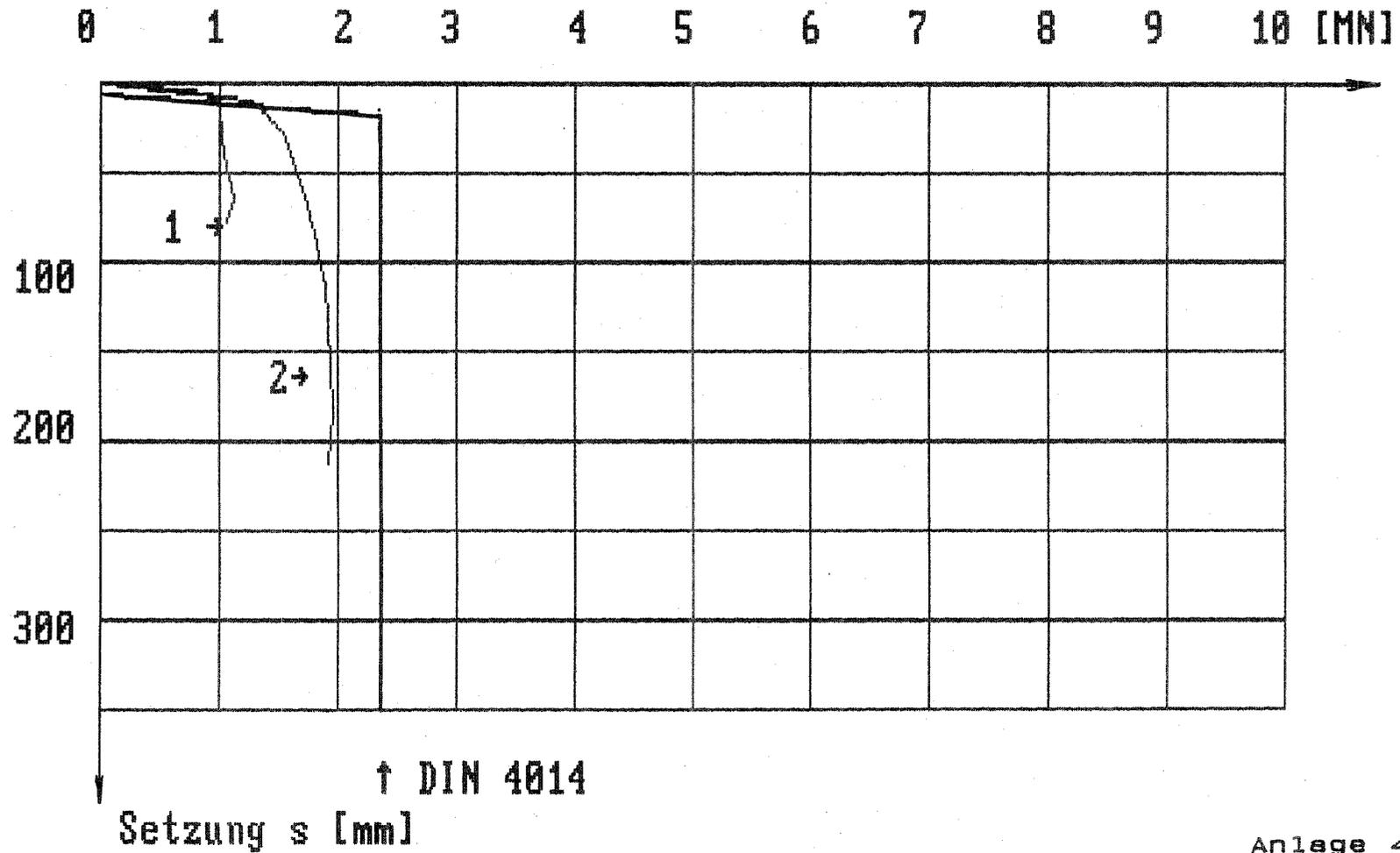
Pfahlmantelkraft Pfahl 2



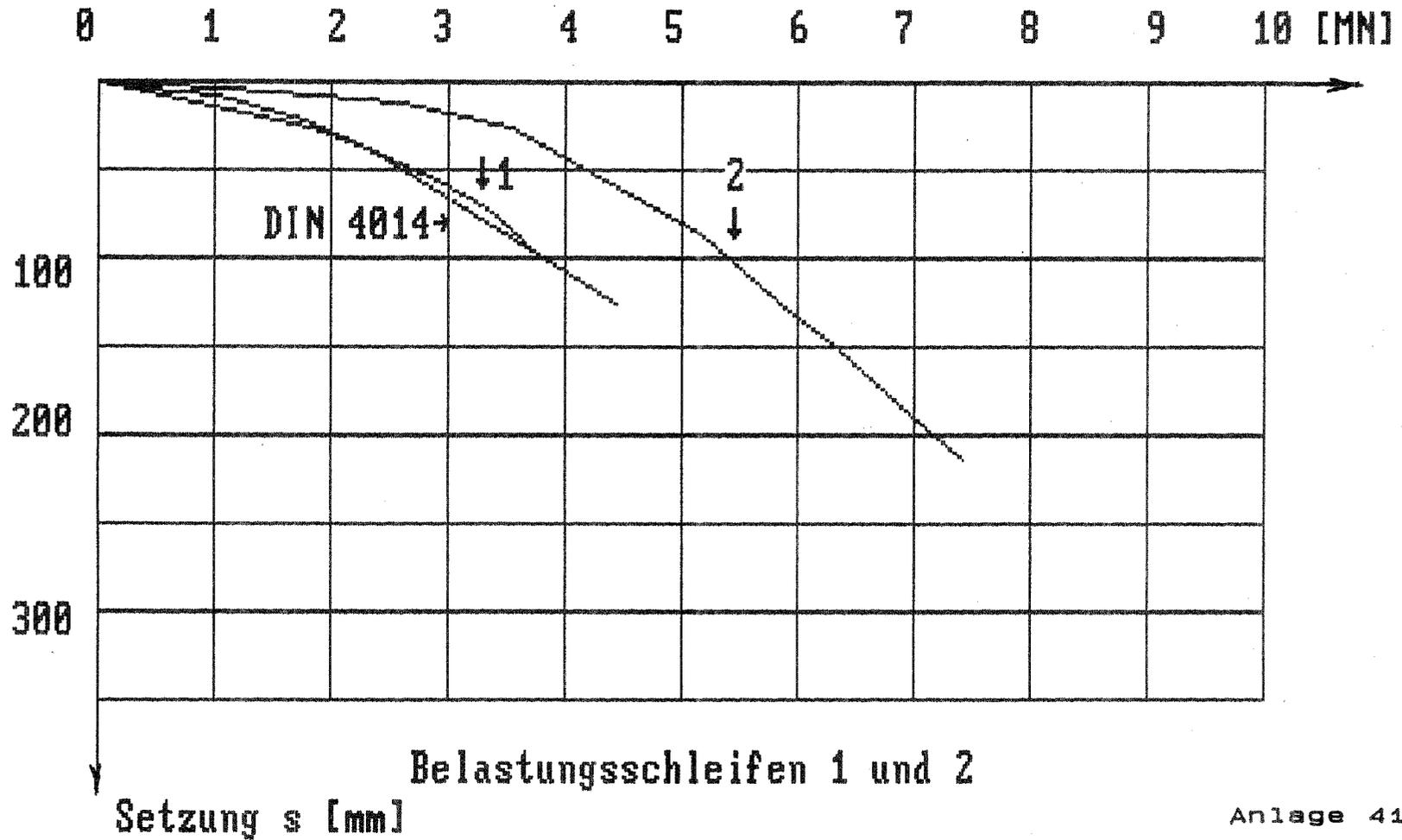
Pfahlmantelkraft Pfahl 4



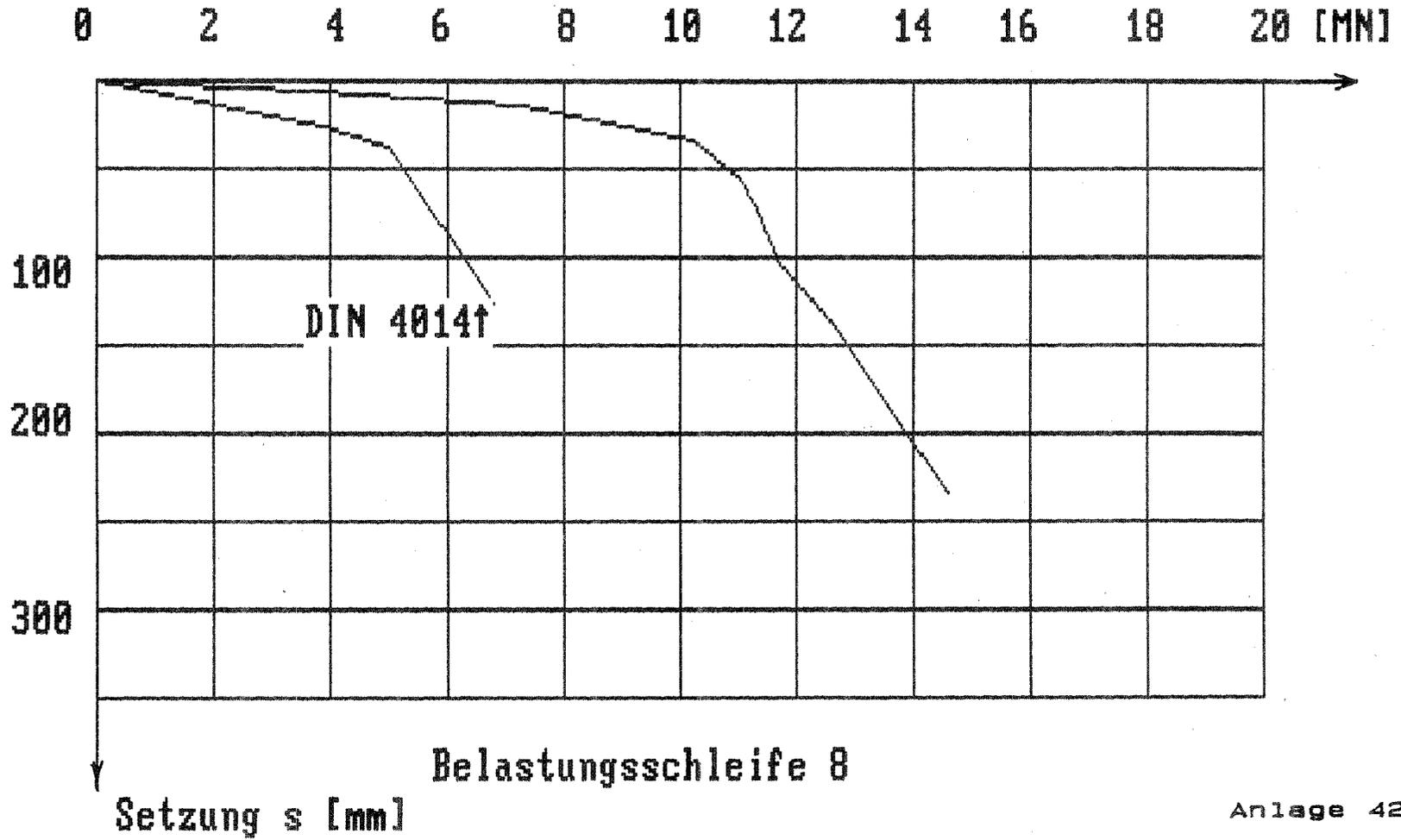
Pfahlmantelkraft Pfahl 5



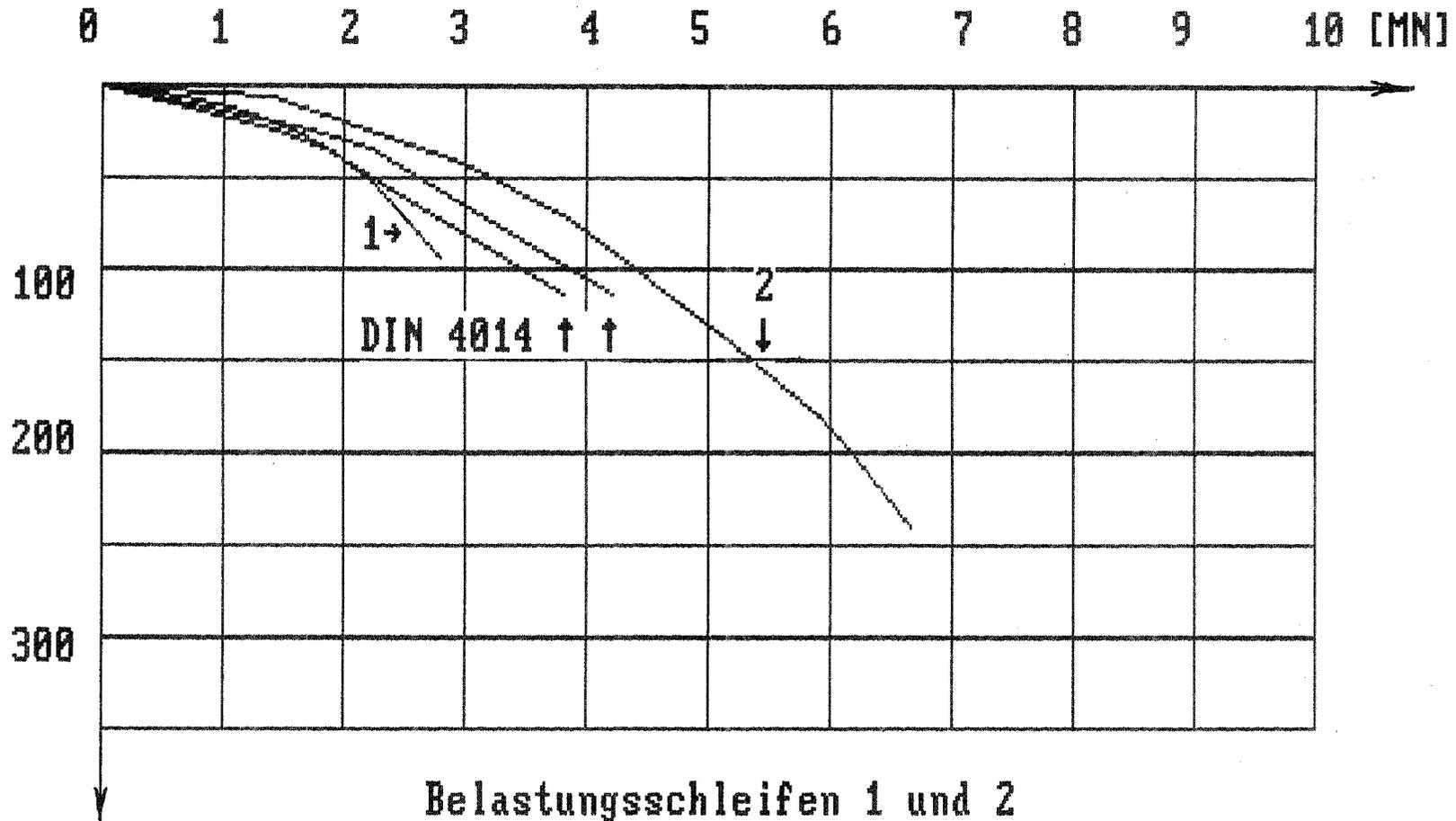
Pfahlfusskraft Pfahl 1



Pfahlfusskraft Pfahl 1

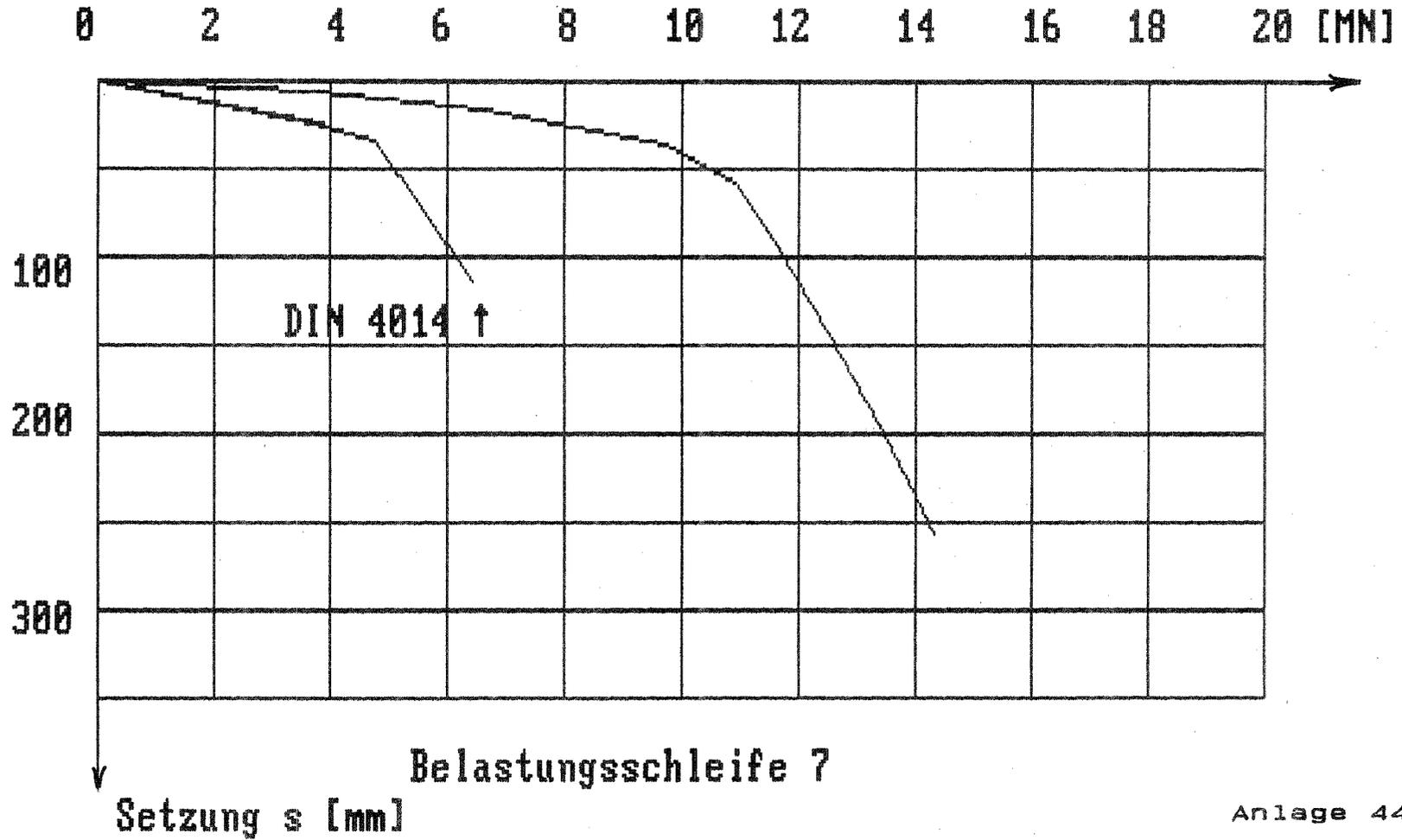


Pfahlfusskraft Pfahl 2

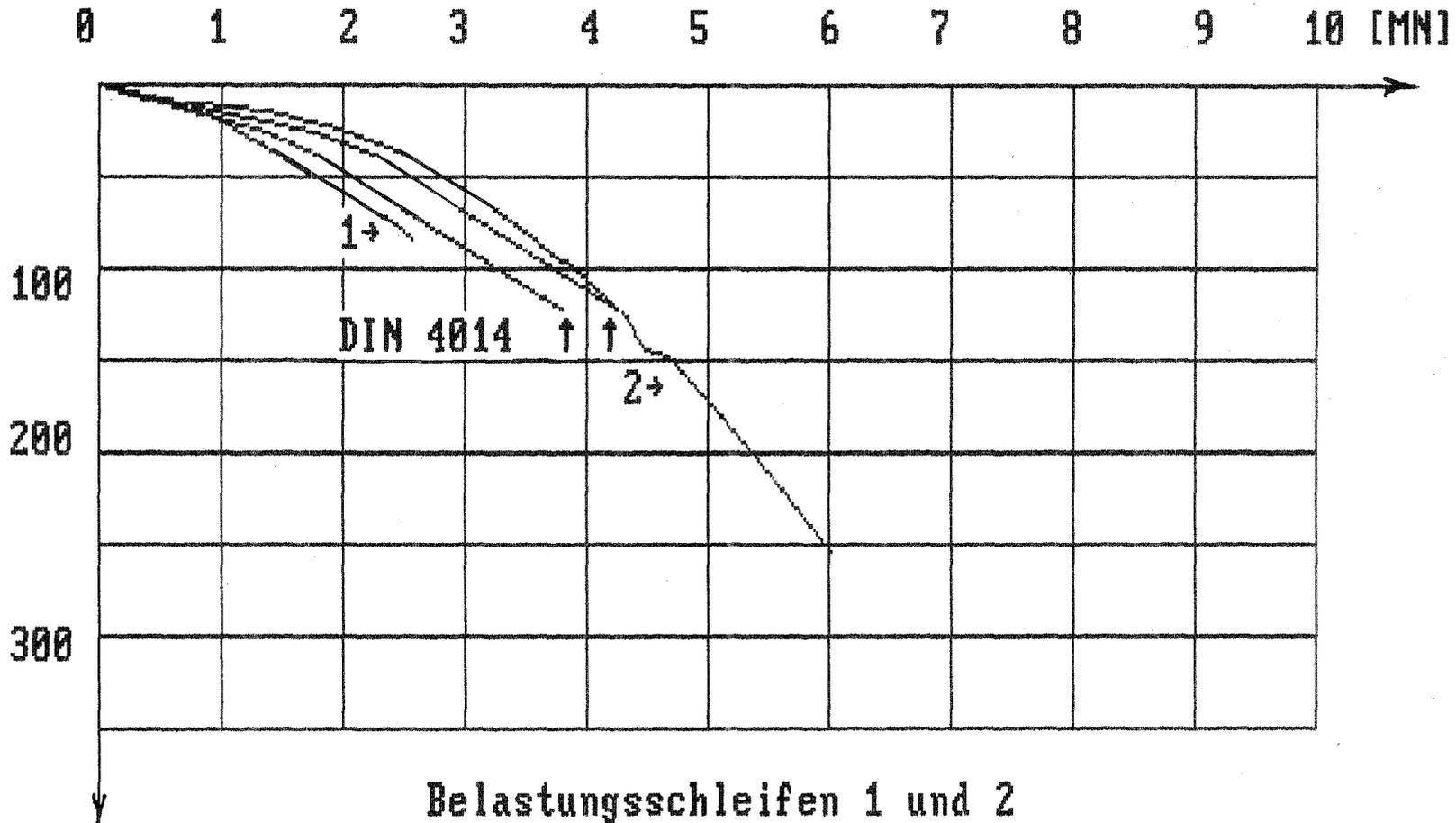


Belastungsschleifen 1 und 2
 Setzung s [mm]
 DIN-Werte mit Mittelwert und unterem Grenzwert
 des Sondierwiderstands

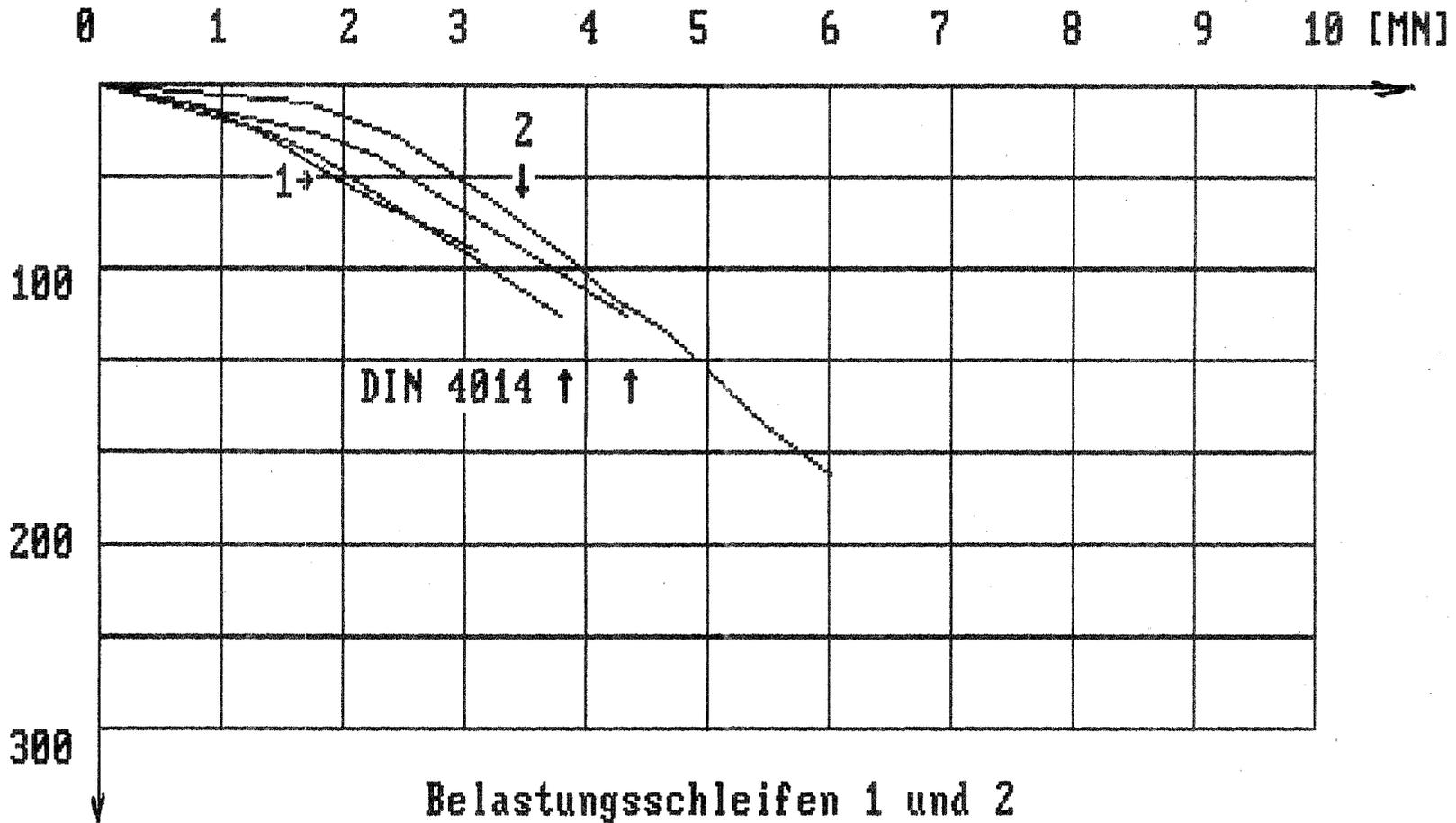
Pfahlfusskraft Pfahl 2



Pfahlfusskraft Pfahl 4

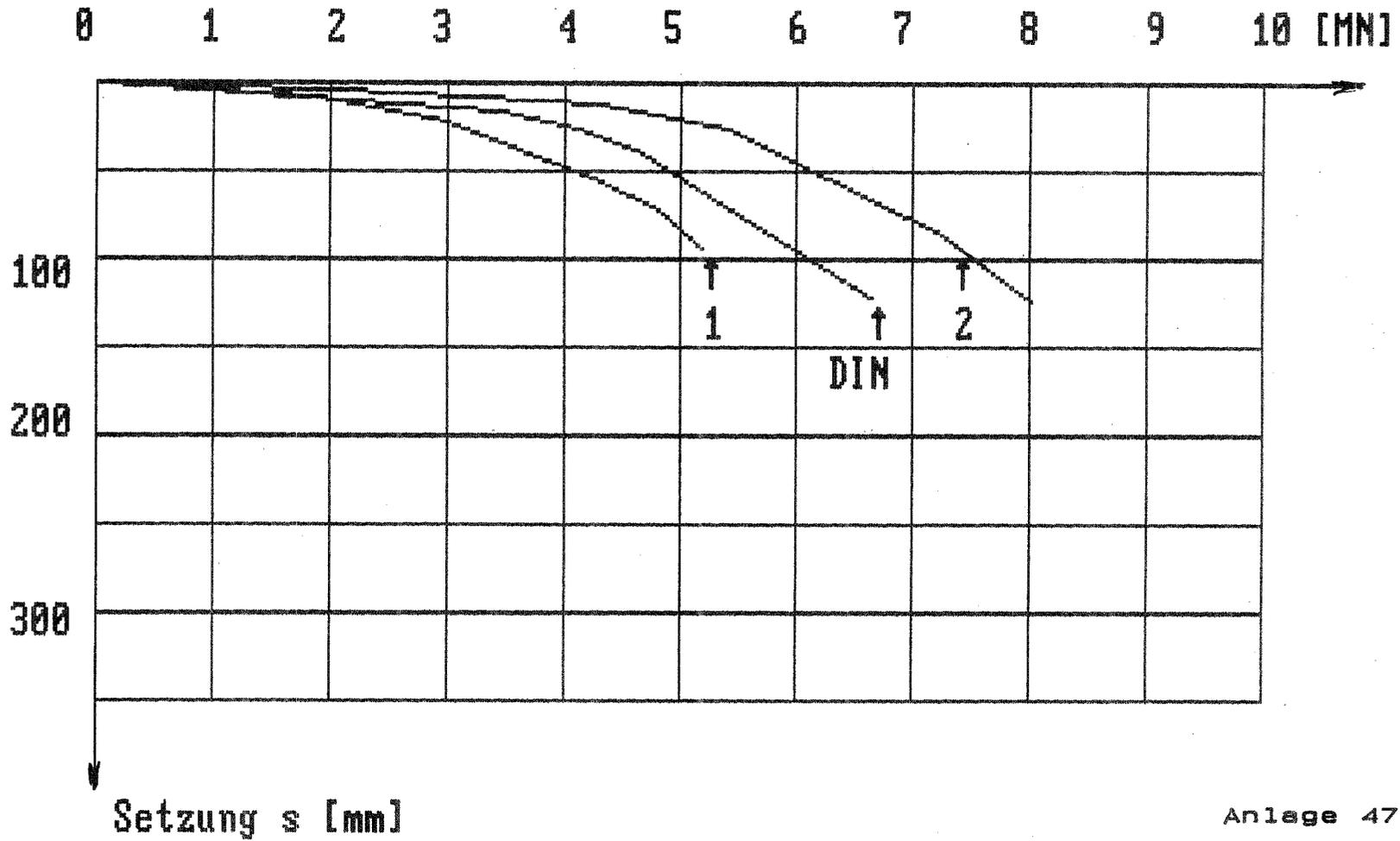


Pfahlfusskraft Pfahl 5

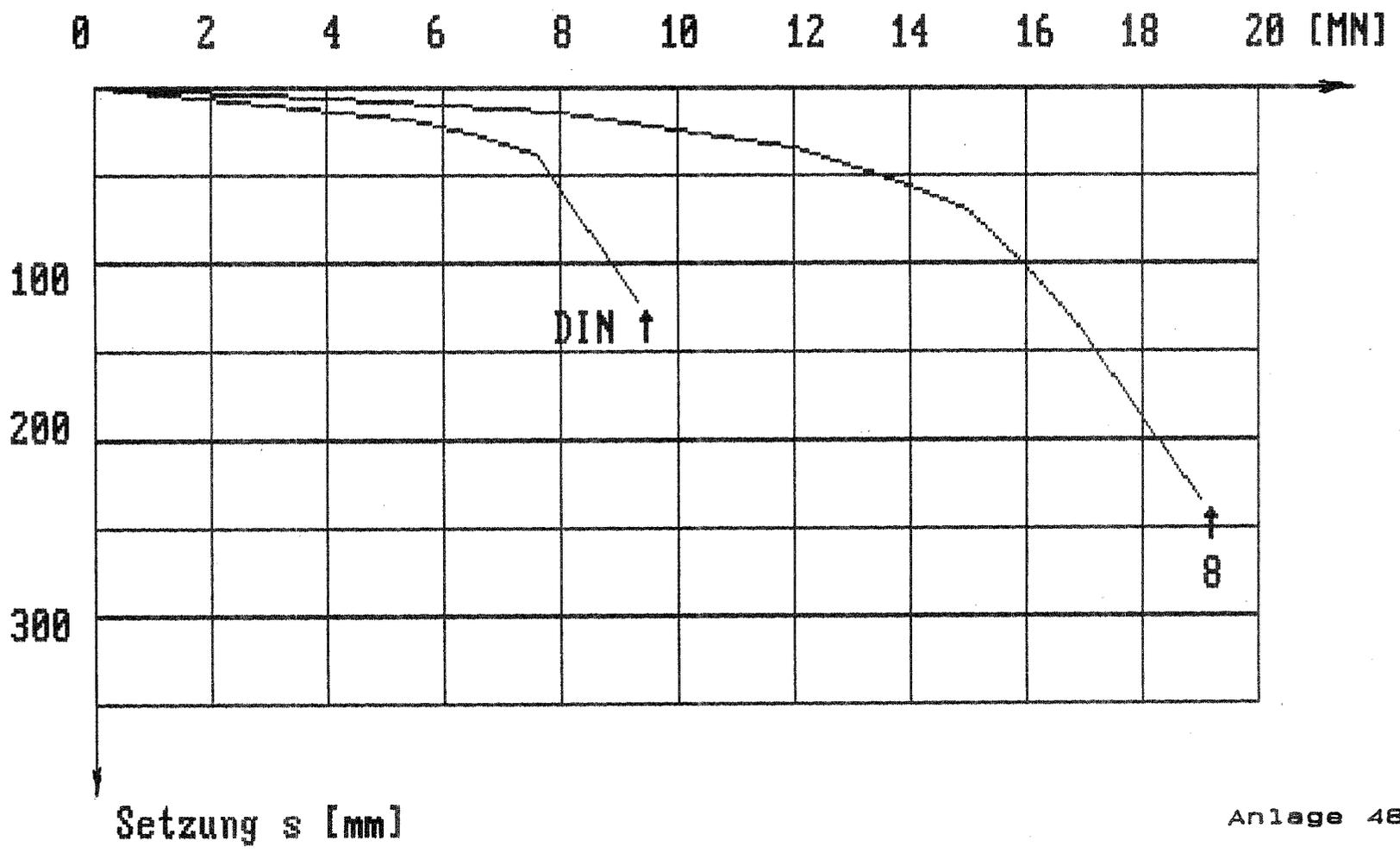


Belastungsschleifen 1 und 2
Setzung s [mm]
DIN-Werte mit Mittelwert und unterem Grenzwert
des Sondierwiderstands

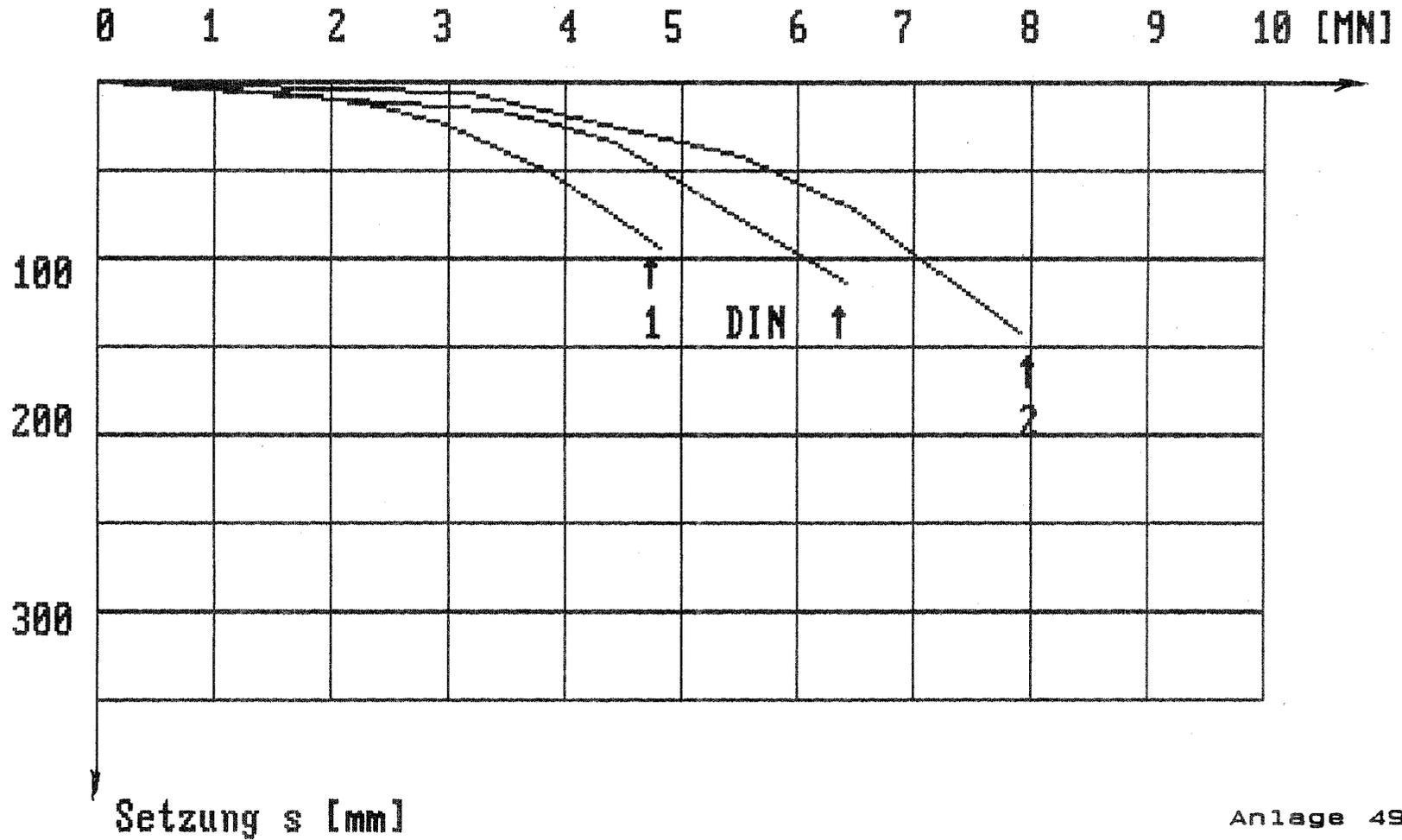
Gesamtlast Pfahl 1



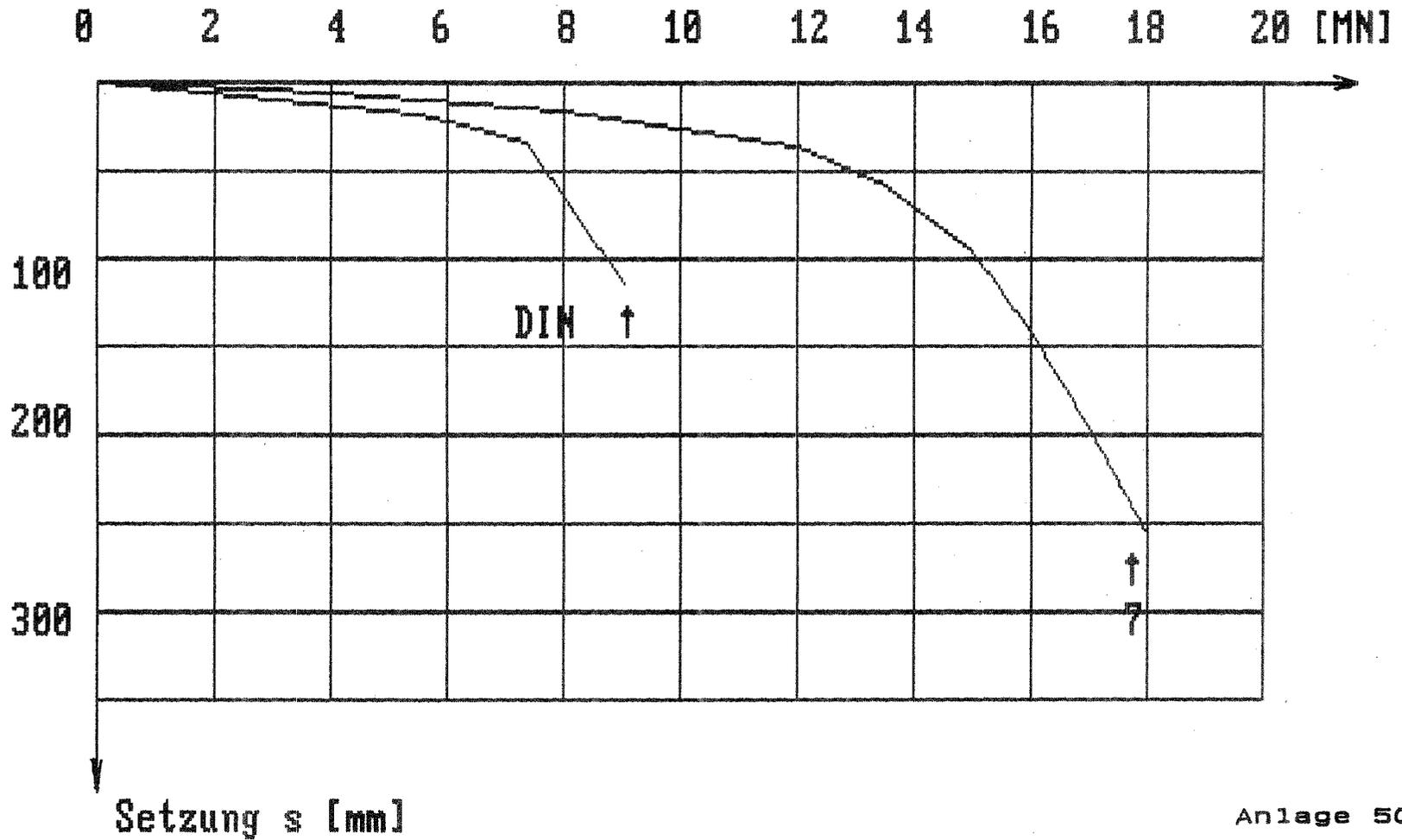
Gesamtlast Pfahl 1



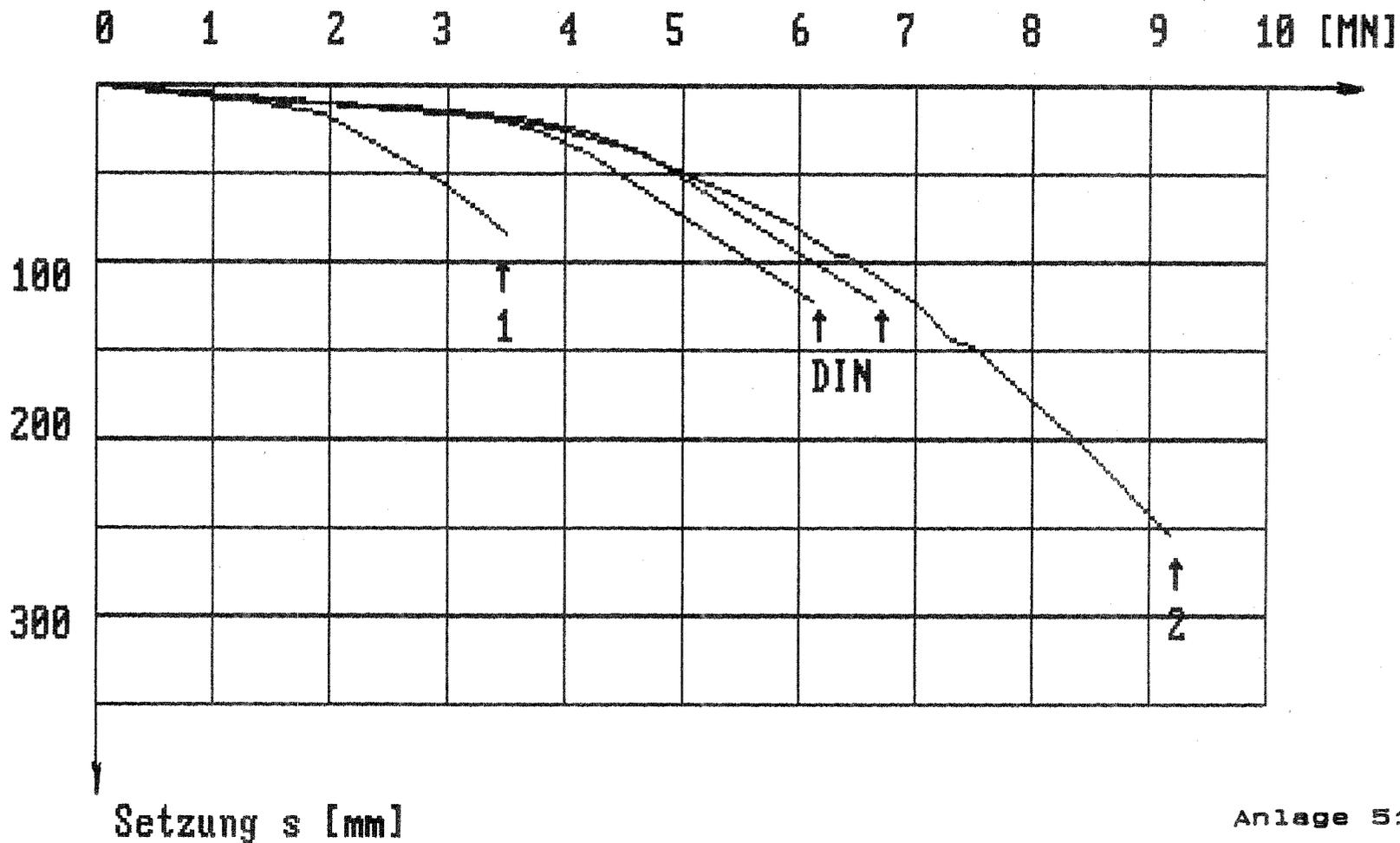
Gesamtlast Pfahl 2



Gesamtlast Pfahl 2



Gesamtlast Pfahl 4



Gesamtlast Pfahl 5

