

Axial zyklisch belastete Pfähle

T 2207

T 2207

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

O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss

Im Auftrag des
Instituts für Bautechnik, Berlin

A x i a l z y k l i s c h b e l a s t e t e P f ä h l e

Bericht

über ergänzende Versuche der 3. Versuchsreihe
zum Forschungsvorhaben

Az. IV/1-5-436/85

mit bewertender Schlußbeurteilung aller Versuche

März 1990

24 Seiten
6 Anlagen (17 Blatt einschließlich 2 Fotos)

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. H.W. Koreck
Dipl.-Ing. P. Schwarz

Inhalt

	Seite
Kurzfassung	II
Summary	IV
<u>Bericht</u>	
1.	1
2.	2
2.1	2
2.2	3
2.2.1	3
2.2.2	4
2.2.3	5
2.2.4	6
2.3	6
3.	7
3.1	7
3.2	9
3.3	11
3.4	15
3.5	16
3.6	18
4.	19
5.	21
6.	23

Forschungsvorhaben

Axial zyklisch belastete Pfähle

3. Versuchsreihe

Az IV/1-4-436/85 des Instituts für Bautechnik, Berlin

- Kurzfassung -

In der 3. Versuchsreihe wurden in der Versuchsgrube des Prüfamtes die zyklischen Versuche an den mit 200 000 Lastwechseln vorbelasteten Pfählen der 2. Reihe fortgesetzt, und zwar wurden 2 Pfähle mit vergrößerten Lastspannen bis zum Versagen weiter beansprucht und 2 Pfähle wurden bei gleicher Lastspanne wie in der 2. Versuchsreihe, aber bei gefluteter Grube als Tastversuche durchgeführt.

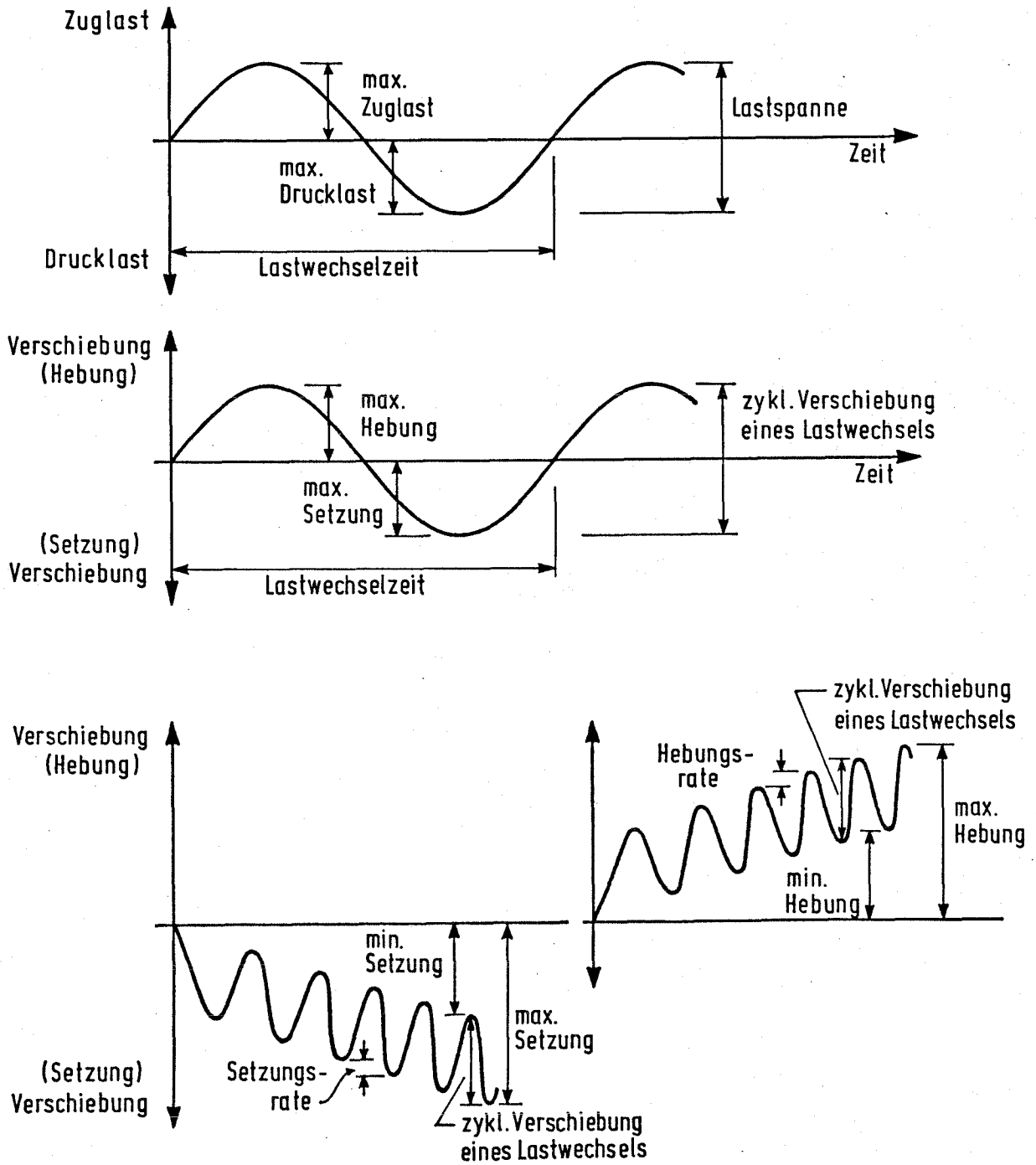
Die mit etwa gleicher Wechsellastspanne, aber mit unterschiedlichem Anteil an Zug- und Drucklast durchgeführten Versuche versagten bei 84.000 (überwiegend Zug) und 148 000 (überwiegend Druck) Lastwechseln.

Bei gefluteter Grube mußte einer der Versuche mit gleicher Lastspanne wie in der 2. Versuchsreihe bereits nach wenigen Lastwechseln wegen Versagens abgebrochen werden, was vermutlich auf die Verminderung der Scherfestigkeit (Kapillarkohäsion) zurückgeführt werden kann. Der 2. Versuch mußte sofort abgebrochen werden, was wahrscheinlich auf die statischen Versuche nach dem zyklischen Versuch in der 2. Versuchsreihe zurückzuführen ist.

Nach dem Ausgraben wurde bei 3 von den 5 Pfählen eine Verdickung im Fußbereich festgestellt, was die Auswertung der Versuchsergebnisse erschwert und eine Überarbeitung der Bezugslastanteile der 2. Versuchsreihe vom Dezember 1988 erforderlich machte.

Die Ergebnisse der 3. Versuchsreihe ergänzen die Ergebnisse der 1. und 2. Reihe, wobei jedoch der Einfluß der Vorbelastung mit 200 000 Lastwechseln einer kleineren Lastspanne zu berücksichtigen ist. Die wichtigste Erkenntnis der 3. Versuchsreihe liegt in dem schnellen Versagen bei gefluteter Grube.

Definitionen



Research Project
Axial Cyclic Loaded Piles
3rd Test Series

Az. IV/1-4-436/85 - Institut für Bautechnik, Berlin

- Summary -

In a third test series the cyclic tests of the second series on small diameter piles were continued in the test pit of the Institute. All piles were preloaded during the second test series with 200.000 cycles without failure. Two of these piles were tested with a higher load span until failure occurred. Two piles were investigated under saturated soil conditions in the flooded test pit as preliminary test.

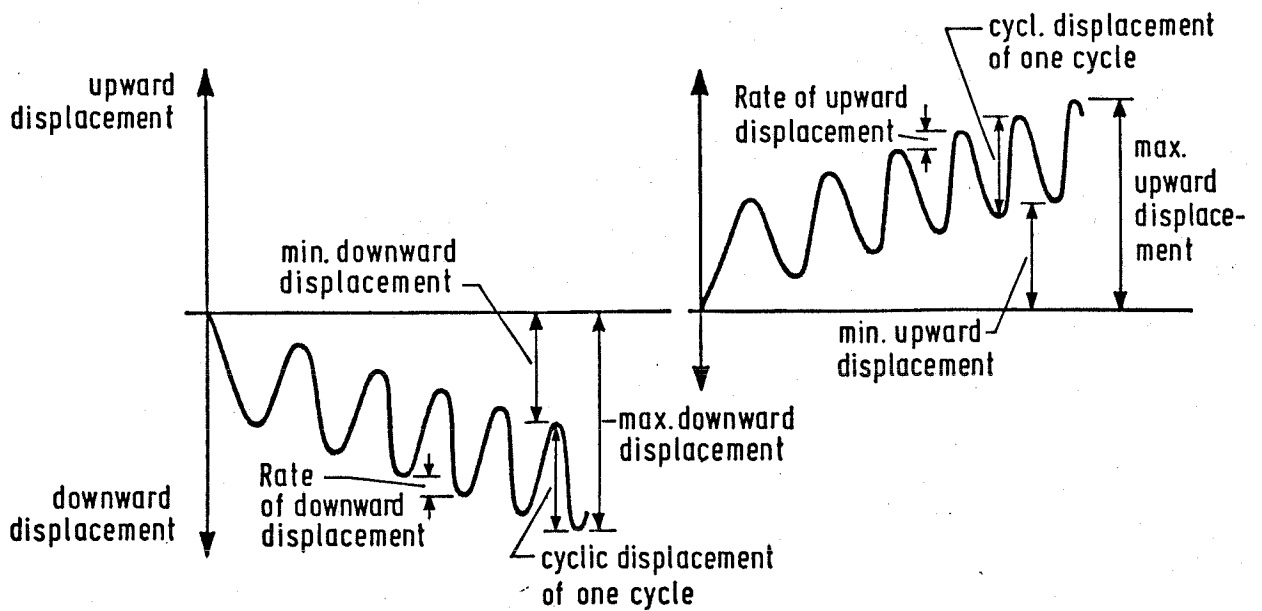
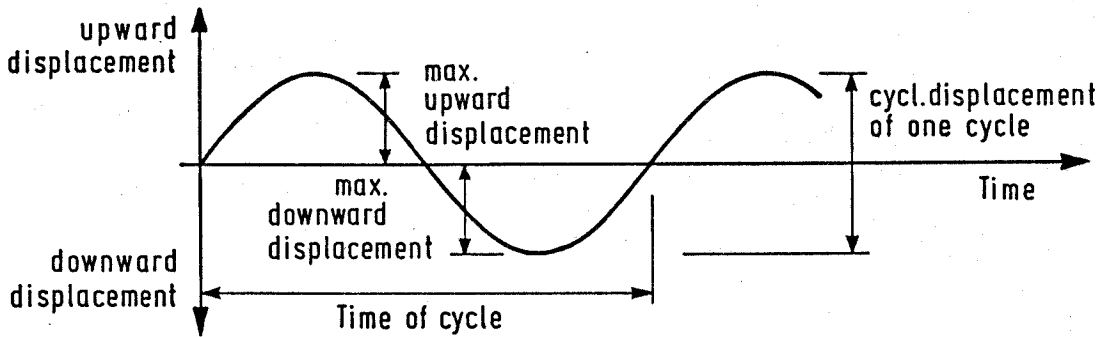
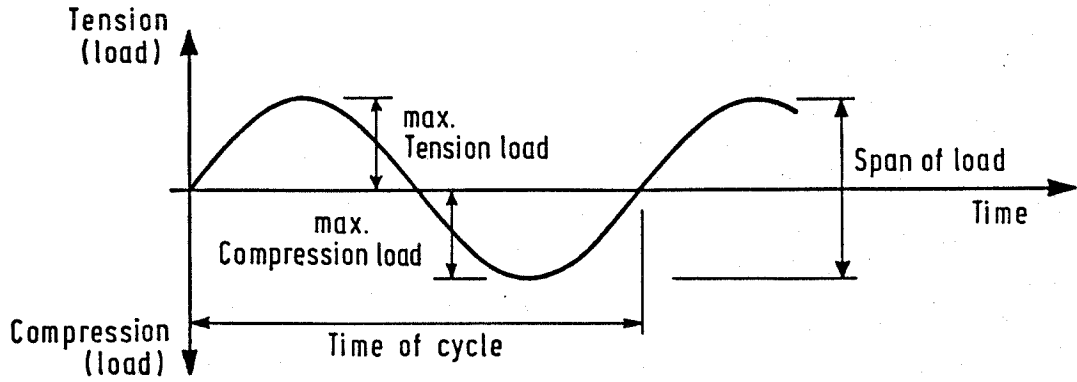
The two tests with a similar load span but a different tension and compression load contribution failed after 84 000 cycles (predominant tension load) and 148 000 cycles (predominant compression load).

Under flooded conditions one of the cyclic tests with the same load span as during the second test series had to be terminated after a few cycles due to failure. Presumably this was the result of a reduced shear strength (capillar cohesion). The second test failed immediately after loading probably as a consequence of the preceding static tests.

After excavation three of the piles showed a thickening at the lower end. This made the interpretation of the test results more difficult and required a revision of the presumed limit state loads of the second test report published in december 1988.

The results of the third series confirmed the results of the first and second series, however the influence of the preloading with 200 000 cycles of a lower load has to be considered. The main finding of the third series is the negative influence of the flooded condition.

Definitions



1. Vorbemerkungen

Die erste Versuchsreihe aus 5 Pfählen wurde mit unterschiedlichen Lastspannen in der Zeit vom 26.7.1983 bis zum 7.9.1984 als Vorversuchsreihe durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Schlußbericht vom Oktober 1984 zusammengestellt.

Die zweite Versuchsreihe ergänzte die erste Reihe durch 5 neue Pfähle, wobei die absoluten Lastspannen etwa konstant gehalten wurden, aber in unterschiedlichen Belastungsbereichen lagen. Diese Versuche wurden in der Zeit vom 17.2.1987 bis zum 13.10.1988 durchgeführt, und zwar jeweils bis zu 200000 Lastwechsel ohne ein Versagen zu erreichen. Die Ergebnisse wurden, ohne daß die Pfähle ausgegraben waren, im Schlußbericht vom Dezember 1988 zusammengestellt.

In der 3. Versuchsreihe wurden in der Zeit vom 12.12.1988 bis zum 1.8.1989 die Versuche der 2. Reihe fortgesetzt. Hierbei wurden 2 Pfähle mit einer höheren Lastspanne und 2 Pfähle nach einer Flutung der Versuchsgrube mit derselben Lastspanne wie in der 2. Reihe geprüft.

Nach diesen Versuchen wurden die Pfähle ausgegraben und vermessen. Die tatsächlichen Pfahlabmessungen machten eine Überarbeitung der Beurteilung im 2. Bericht vom Dezember 1988 notwendig. Der vorliegende 3. Bericht schließt mit einer überarbeiteten bewertenden Beurteilung aller Versuche.

2. Versuche und Versuchsergebnisse der 3. Reihe

2.1 Versuchsdaten und Versuchsdurchführung

Im Anschluß an die 2. Reihe wurden dieselben Pfähle, nachdem sie bereits zyklisch bis zu 200 000 Lastwechseln vorbelastet waren, zyklisch mit sinusförmiger Belastung weiter belastet. Pfahl 10 wurde nach der zyklischen Belastung noch einmal statisch auf Druck beansprucht.

Die Versuchsdaten sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Versuch	Versuchszeit	Ruhezeit Tage	Belastung		Last- spanne kN	LW für 10 mm Verschiebung
			min kN	max kN		
9/2	vom 12.12.1988 bis 12.01.1989	324	+150 (Zug)	-85 (Druck)	235	84 168
8/2	vom 29.03.1989 bis 23.05.1989	299	+85 (Zug)	-150 (Druck)	235	148 281
F l u t u n g						
10/2	26.06.1989	256	+150	-10	160	58
10/3	28.06.1989	2	s t a t i s c h			Bruchlast 150 kN
7/7	01.08.1989	311	+70 (Zug)	-85 (Druck)	155	1

Tab. 1 Zusammenstellung der Versuchsdaten

Die Ruhezeit bezieht sich jeweils auf das Ende des Versuches in der 2. Reihe.

Die Versuchsdurchführung erfolgte in der gleichen Weise, wie im Abschnitt 1.2.2 des Berichtes vom Dezember 1988 beschrieben. Die Lastwechselzeiten der einzelnen Versuche sowie die Zwangsunterbrechungen wurden in Tabelle 2 zusammengestellt.

Versuch	Lastwechselzeit		Unterbrechung	
	LWZ	ab LW	bei LW	für ... Std
9/2	20 Min	1	83 760	16
	1 Min	20		
	30 Sek	1 356		
	1 Min	82 420		
8/2	20 Min	1	148 120	10
	1 Min	30		
	30 Sek	5 785		
	1 Min	147 720		
	2 Min	148 080		

Tab. 2 Zusammenstellung der Lastwechselzeiten und Zwangsunterbrechungen

2.2 Versuchsergebnisse

2.2.1 Versuch 9/2

Dieser Versuch wurde durchgeführt, nachdem der Schwellastversuch 9/1 mit einer Lastspanne von 140 kN (zwischen 150 und 10 kN Zug) nach 203 534 Lastwechseln und einer bleibenden Hebung von 3,32 mm abgebrochen worden war. Nach einer Ruhezeit von 324 Tagen wurde der **Versuch 9/2** am selben Pfahl mit einer Lastspanne von 235 kN (zwischen 150 kN Zug und 85 kN Druck), d.h. mit einer Erhöhung um 95 kN nach der Druckseite fortgesetzt. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem bei Lastwechsel 84 168 die Hebung den Wert von 10 mm überschritten hatte. Auf **Anlage 1, Bl. 1** wurde das Zeit-Verschiebungs-Diagramm für die ersten 20 langsamen Lastwechsel in linearem Maßstab und auf **Anlage 1, Bl. 2** für den Gesamtversuch als Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm in halblogarithmischem Maßstab dargestellt. In diesen Diagrammen wurden außerdem die Gesamtverschiebungen und die zyklischen Verschiebungen eines Lastwechsels für den 1., 20., 1 000., 10 000., 50 000. und 80 000. Lastwechsel angegeben. Auf **Anlage 1, Bl. 3** wurde das Ende des Versuches ab Lastwechsel 83 200 im linearen Maßstab als Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm aufgetragen.

Auf **Anlage 1, Bl. 4** wurde das Last-Verschiebungs-Diagramm für die oben angegebenen Lastwechsel beim maximalen und minimalen Lastdurchgang dargestellt.

2.2.2 Versuch 8/2

Dieser Versuch wurde durchgeführt, nachdem der Versuch 8/1 mit einer Lastspanne von 160 kN (zwischen 150 kN Druck und 10 kN Zug) nach 201 600 Lastwechseln und einer bleibenden Setzung von 4,01 mm abgebrochen worden war. Nach einer Ruhezeit von 299 Tagen wurde der **Versuch 8/2** am selben Pfahl mit einer Lastspanne 235 kN (zwischen 85 kN Zug und 150 kN Druck), d.h. mit einer Erhöhung um 75 kN nach der Zugseite fortgesetzt.

Auf **Anlage 2, Bl. 1** wurde das Zeit-Verschiebungs-Diagramm für die ersten 30 langsamen Lastwechsel in linearem Maßstab dargestellt. Durch eine falsche Eingabe in der Steuerung wurden die ersten 10 Lastwechsel nur mit der halben geplanten Lastspanne von 117,5 kN (zwischen 42,5 kN Zug und 75 kN Druck) durchgeführt und erst ab dem 20. Lastwechsel mit der vorgegebenen Lastspanne von 235 kN begonnen. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem bei Lastwechsel 148 281 die Setzung den Wert von 10 mm überschritten hatte. Auf **Anlage 2, Bl. 2** wurde das Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm für den Gesamtversuch im halblogarithmischen Maßstab dargestellt. In beiden Diagrammen wurden außerdem die Gesamtverschiebungen und die zyklischen Verschiebungen eines Lastwechsels für den 1., 10., 30., 1 000., 10 000., 50 000. und 100 000. Lastwechsel angegeben. Auf **Anlage 2, Bl. 3** wurde das Ende des Versuchs ab Lastwechsel 147 400 im linearen Maßstab als Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm aufgetragen und auf **Anlage 2, Bl. 4**

wurde das Last-Verschiebungsdiagramm für die oben angegebenen Lastwechsel beim maximalen und minimalen Lastdurchgang dargestellt.

2.2.3 Versuch 10/2 und 10/3

Dieser Versuch wurde durchgeführt, nachdem der Versuch 10/1 mit einer Lastspanne von 160 kN (zwischen 10 kN Druck und 150 kN Zug) nach 200 300 Lastwechseln und einer bleibenden Hebung von 3,42 mm abgebrochen worden war. Nach einer Ruhezeit von 256 Tagen und einer Flutung der Versuchsgrube bis 0,6 m unterhalb des Grubenplanums (OK Verpreßkörper) wurde der **Versuch 10/2** am selben Pfahl mit derselben Belastung fortgesetzt. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem beim 58. Lastwechsel die Hebung einen Wert von 10 mm überschritten hatte.

Auf **Anlage 3, Bl. 1** wurde das Zeit-Verschiebungs-Diagramm für die ersten 20 langsamen Lastwechsel im linearen Maßstab dargestellt. Auf **Anlage 3, Bl. 2** wurde der Gesamtversuch im halblogarithmischen Maßstab und auf **Anlage 3, Bl. 3** im linearen Maßstab aufgetragen. In beiden Diagrammen wurden außerdem die Gesamtverschiebungen für die zyklischen Verschiebungen eines Lastwechsels für den 1., 20. und 50. Lastwechsel angegeben. Auf **Anlage 3, Bl. 4** wurde das Last-Verschiebungs-Diagramm für die oben angegebenen Lastwechsel beim maximalen und minimalen Lastdurchgang dargestellt.

Zwei Tage nach der zyklischen Belastung wurde der Pfahl nochmals statisch auf Druck belastet. Das Ergebnis dieses Versuches **10/3** ist auf **Anlage 3, Bl. 5** als Last-Verschiebungs-Diagramm und auf **Anlage 3, Bl. 6** als Zeit-Verschiebungs-Diagramm aufgetragen.

2.2.4 Versuch 7/7

Dieser Versuch am Pfahl 7 wurde durchgeführt, nachdem der Pfahl im Versuch 7/1 mit einer Lastspanne von 155 kN (zwischen 85 kN Druck und 70 kN Zug) nach 208 160 Lastwechseln bei einer bleibenden Setzung von 1,10 mm abgebrochen worden war und anschließend statisch zuerst auf Zug (Versuch 7/2) und in 4 weiteren statischen Versuchen (Versuch 7/3 bis 7/6) in wechselnden Richtungen jeweils bis zur Bruchlast belastet worden war. Vor der Versuchsdurchführung von **Versuch 7/7** wurde eine Ruhezeit von 311 Tagen eingelegt und die Grube in der Zwischenzeit bis 0,6 m unter dem Grubenplanum geflutet.

Der **Versuch 7/7** mußte bereits nach 70 Minuten abgebrochen werden, da die Gesamtverschiebungen größer als der Meßbereich, nämlich größer als 100 mm waren. Der kurze Versuchsablauf ist auf **Anlage 4** als Zeit-Verschiebungs-Diagramm dargestellt.

2.3 Ausbau der Pfähle

Nach dem Abschluß der Versuche wurden die Pfähle freigelegt und aus der Grube herausgehoben. Nach der Reinigung wurden sie in jeweils 5 Querschnitten und bei Unregelmäßigkeiten zusätzlich vermessen. Die Aufmaße sind auf **Anlage 5** zusammengestellt. Die Bilder 1 und 2 auf **Anlage 6** zeigen die ausgegrabenen Pfähle.

3. Beurteilung aller Ergebnisse

3.1 Versuchsprogramm

Die 6 zyklischen Versuche der 1. Versuchsreihe wurden als Tast-Versuche mit unterschiedlichen Lastspannen zwischen 90 und 270 kN als Wechsel- und Schwellversuche durchgeführt. Diese Versuche ließen erkennen, daß das Versagen der Pfähle sowohl von der Lastspanne als auch der Lastwechselzahl abhängt, d. h. je kleiner die Lastspanne, desto größer die Lastwechselzahl bis zum Versagen. Bei Schwellbelastung wurde selbst bei größeren Lastspannen kein plötzliches Versagen, aber eine konstante Zunahme der Verschiebungen festgestellt.

Die 4 zyklischen Versuche der 2. Versuchsreihe wurden mit etwa gleichbleibender Lastspanne zwischen 140 und 160 kN durchgeführt, wobei die Lastspannen in unterschiedlichen Zug- und Drucklastbereichen lagen.

Diese Versuche wurden bei 200 000 Lastwechseln ohne ein Versagen zu erreichen abgebrochen, jedoch war sowohl bei den Wechsel- wie Schwelllastversuchen eine ständige Zunahme der Verschiebungen festzustellen.

In der 3. Versuchsreihe wurden 2 Pfähle der 2. Reihe mit einer höheren Lastspanne, nämlich 235 kN, weiter belastet, und zwar bis das Bruchkriterium (10 mm Verschiebung) erreicht war. Zwei Pfähle wurden in dieser Reihe wiederum als Tastversuche bei gefluteter Versuchsgrube mit derselben Lastspanne, wie der Versuch in der 2. Reihe, fortgesetzt. Hierbei war bei einem Versuch bereits nach 58 Lastwechseln das Bruchkriterium erreicht, während beim 2. Ver-

such - vermutlich wegen der vorhergehenden Versuche, welche jeweils bis zum Bruch belastet waren - praktisch keine zyklische Last mehr aufgebracht werden konnte.

In Bild 1 sind die Lastspannen aller zyklischen Versuche der 1. 2. und 3. Reihe in ihrer Lage zur Nulllast zusammengestellt.

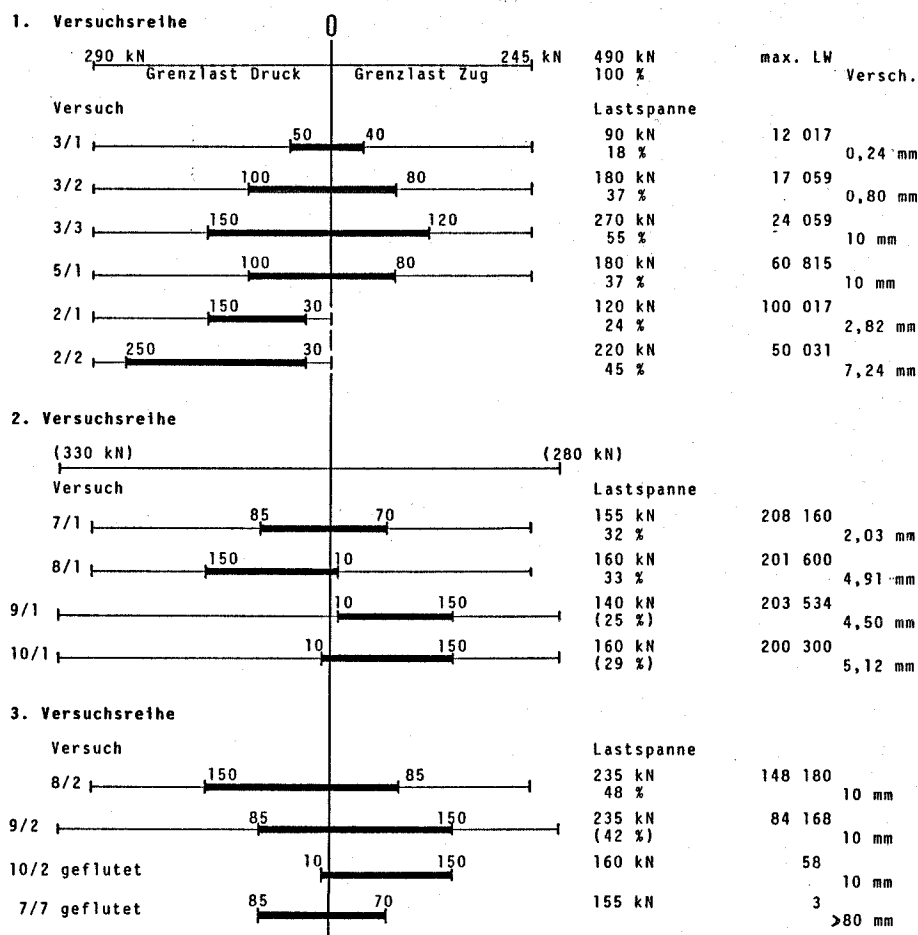


Bild 1 Zusammenstellung der Lastspannen - Bezugswerte, maximale Lastwechselzahl und maximale Verschiebungen aller Versuche

Nachdem sich während der Versuchsdurchführung der 2. Reihe gezeigt hatte, daß eine Verkürzung der Lastwechselzeit von 1 Minute auf 30 Sekunden praktisch keinen Einfluß auf den Versuchsablauf hatte, wurde auch bei den Versuchen der 3. Reihe die Lastwechselzeit entsprechend Tabelle 2 auf 30 Sekunden verkürzt. Jedoch wurde die Zeit bei Versuchsende wieder auf 1 Minute (Versuch 9/2) bzw. 2 Minuten (Versuch 8/2) verlängert.

Zur Versuchsdurchführung ist weiterhin anzumerken, daß sich die Zwangsunterbrechungen von 10 Stunden (Versuch 8/2) bzw. 16 Stunden (Versuch 9/2) auf den Versuchsablauf nicht ausgewirkt haben.

3.2 Versuchsauswertung und Bezugsgrößen

Als Bezugsgrößen dienten bei der Durchführung der Versuche die sog. Grenzlaster im Sinne der DIN 1054. Sie wurden in der 1. Reihe durch je einen statischen Druck- und Zugversuch aus der Last-Setzungs-Kurve ermittelt, und zwar als der Punkt der Kurve, bei dem der Pfahl merklich versinkt bzw. herausgezogen wird, was etwa einem Kriechmaß von 1,0 mm entspricht.

In der 2. Versuchreihe wurde nur ein statischer Zugversuch als Kalibrierversuch durchgeführt. Dieser Versuch ergab für die 1. Zugbeanspruchung für ein Kriechmaß von ca. 1,0 mm einen Wert von

$$Q_{gz} = 280 \text{ kN.}$$

Dieser Wert liegt etwas höher als der Vergleichswert der 1. Reihe (245 kN), was aufgrund der Ausgrabung der Pfähle (siehe Anlage 5 und 6) auf die Vergrößerung des Pfahlquerschnittes im unteren Pfahlbereich zurückgeführt werden kann.

Der Grenzwert als Bezugsgröße für die Drucklast der 2. Versuchsreihe wurde nicht durch einen eigenen Versuch ermittelt. Wird er proportional dem Verhältnis Zuggrenzlast/Druckgrenzlast der 1. Versuchsreihe errechnet, ergibt sich ein Wert von $Q_{gd} = 330 \text{ kN}$.

Als Bezugsgröße für die weitere Beurteilung wird die **doppelte Zuggrenzlast** zu

$$Q_{\text{Bezug}} = 2 \cdot Q_{gz} = 100 \%$$

neu eingeführt. Im Hinblick auf eine vergleichende Gegenüberstellung ist dieser Wert zweckmäßiger als der im 1. Bericht zugrundegelegte einfache Wert von Q_{gz} , da hierdurch bei Wechselbelastung Lastspannen von mehr als 100 % der Bezugsgröße ausgeschlossen werden.

Wie die Pfahlausgrabungen zeigen, ist die Herstellung der Pfähle der 2. Reihe nicht mit der Regelmäßigkeit erfolgt, wie die der 1. Reihe. Wie der Pfahl 6 haben auch die Pfähle 9 und 10 eine Verdickung im Fußbereich, während die Pfähle 7 und 8 den Abmessungen der Pfähle der 1. Reihe entsprechen. Mit Rücksicht auf die tatsächlich vorhandenen Abmessungen der Pfähle werden daher für die Pfähle der 2. Versuchsreihe für die weitere Beurteilung im vorliegenden Bericht folgende Bezugswerte zugrunde gelegt:

Pfahl	Bezugswert (Q_{gz}) in kN
7	490
8	490
9	560
10	560

In Bild 1 wurden neben den Lastspannen und den auf die jeweilige Bezugswerte bezogenen Prozenten auch die maximale Lastwechselzahl sowie die maximalen Verschiebungen bei Versuchsende angegeben.

3.3 Versuche mit Wechsellast

Die Ergebnisse der 3 Wechsellastversuche mit symmetrisch zum Belastungsnullpunkt liegender Lastspanne wurden in Bild 2 dargestellt. Der Versuch 7/1 mit 32 % der statischen Bezugslast aus der 2. Versuchsreihe fügt sich dabei gut in das Gesamtbild ein.

Beim Versuch 7/1 stellte sich bis zu 200 000 Lastwechseln kein Versagen ein. Aber aus dem Verlauf der etwa konstanten Zunahme sowohl der Verschiebungsraten eines Lastwechsels als auch der Zunahme der Gesamtverschiebung kann hypothetisch geschlossen werden, daß etwa nach einer Gesamtlastwechselzahl von 2 Mio eine Verschiebung von 10 mm erreicht würde.

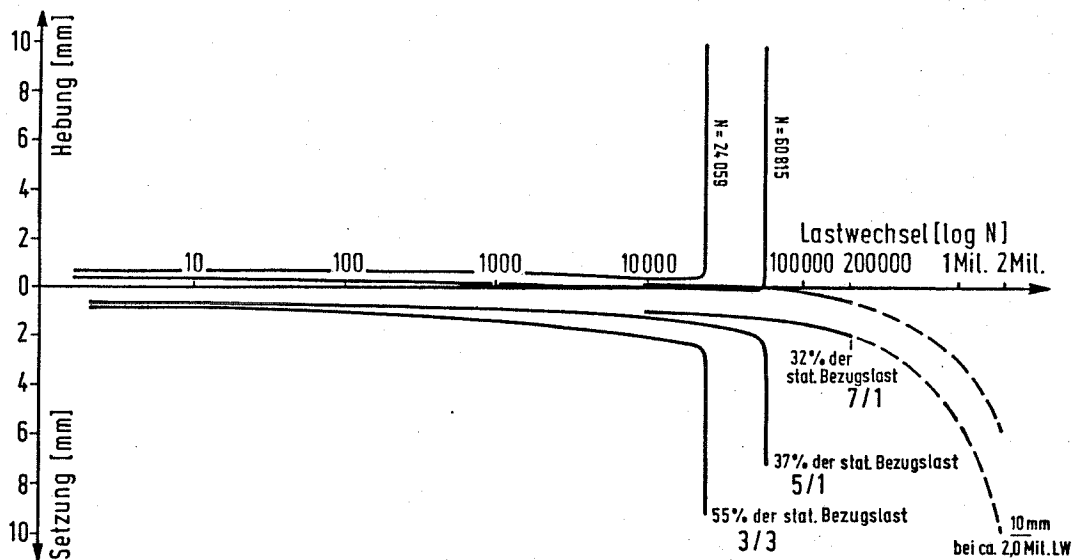


Bild 2 Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm der Versuche mit Wechsellast bei symmetrischer Belastung

Damit dürfte in der Regel auch das Ende der Gebrauchsfähigkeit der Konstruktionen über diesen Pfählen erreicht sein. Aufgrund des Versagens bei den beiden anderen Ver-

suchen (3/3 und 5/1) aus der 1. Versuchsreihe kann zusätzlich nicht ausgeschlossen werden, daß auch in diesem Fall zu einem früheren Zeitpunkt unvorhergesehen ein Versagen möglich ist.

Auch die Versuche 8/1 und 10/1 gehören streng genommen zu den Wechsellastversuchen. Die Lastspanne betrug 160 kN, jedoch war der jeweilige Wechsellastanteil mit 10 kN gegenüber dem Drucklastanteil (150 kN) bei Versuch 8/1 bzw. dem Zuglastanteil (150 kN) bei Versuch 10/1 nur gering. Mit einer Bezugslast von 33 % bzw. 29 % trat bei beiden Versuchen bis zu ca. 200 000 Lastwechseln, bei denen die Versuche abgebrochen wurden, kein Versagen ein. Die zyklischen Verschiebungen je Lastwechsel lagen am Ende der Versuche mit 1,21 und 1,68 mm etwa in der gleichen Größenordnung wie beim Versuch 7/1 (1,50 mm), der etwa mit der gleichen Lastspanne (155 kN) ausgeführt wurde, bei dem aber der Zug- und Drucklastanteil etwa gleich groß war.

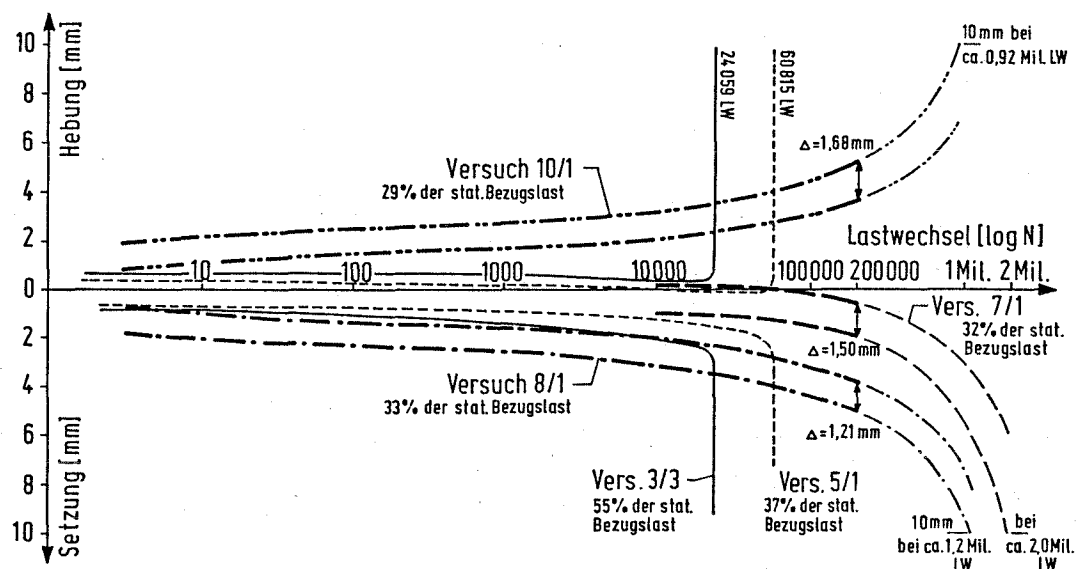


Bild 3: Vergleich der Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramme der Versuche mit symmetrischer und nicht symmetrischer Wechsellast der Versuchsreihen 1 und 2

Entsprechend dem gegenüber Versuch 7/1 höheren Druck- bzw. Zuglastanteil lagen die maximalen Gesamtverschiebungen am Ende der Versuche 8/1 und 10/1 mit 4,91 und 5,12 mm wesentlich über der des Versuches 7/1 (2,03 mm). Insgesamt passen sich auch die Ergebnisse der Versuche 8/1 und 10/1 gut in das Gesamtbild der Wechsellastversuche ein (siehe Bild 3), wobei jedoch die hypothetische Lastwechselzahl für das Versagenskriterium von 10 mm Gesamtverschiebung bereits bei 0,92 Mio (überwiegend Zug) bzw. bei 1,2 Mio (überwiegend Druck) gegenüber 2,0 Mio (symmetrisch) liegen dürfte.

Zu den Wechsellastversuchen gehören auch die Versuche 8/2 und 9/2 der 3. Versuchsreihe, deren Ergebnisse in Bild 4 dargestellt sind. Bei diesen Versuchen lag der Wechsellastbereich nicht symmetrisch zum Belastungsnullpunkt, sondern nach der Druckseite (Versuch 8/2) bzw. nach der Zugseite (Versuch 9/2) verschoben. Durch die gleiche Lastspanne von 235 kN war beabsichtigt, Vergleichsversuche mit etwa gleicher Auslastung durchzuführen. Nach dem Ausgraben der Pfähle mußte jedoch festgestellt werden, daß dies wegen der offensichtlichen Abweichungen von der zylindrischen Formvorgabe nicht der Fall war, so daß die gleichen Lastspannen nicht der gleichen Bezugslast, sondern 48 % (Versuch 8/2) und 42 % (Versuch 9/2) der statischen Bezugslasten entsprachen. Das Versagen trat wie bei den Versuchen 3/3 und 5/1 im Vergleich zur gesamten Lastwechselzahl relativ schnell ein. Beim Versuch 8/2 versagte der Pfahl trotz des größeren Bezugslastanteils erst nach 148 281 Lastwechseln gegenüber dem Versuch 9/2 mit dem kleineren Bezugslastanteil bei 84 168 Lastwechseln. Die größere Lastwechselzahl bei größerem Bezugslastanteil kann

möglicherweise dadurch erklärt werden, daß bei diesem Versuch der Drucklastanteil mit 150 kN gegenüber dem Zuglastanteil von 85 kN höher lag, während das Verhältnis beim Versuch 9/2 umgekehrt war.

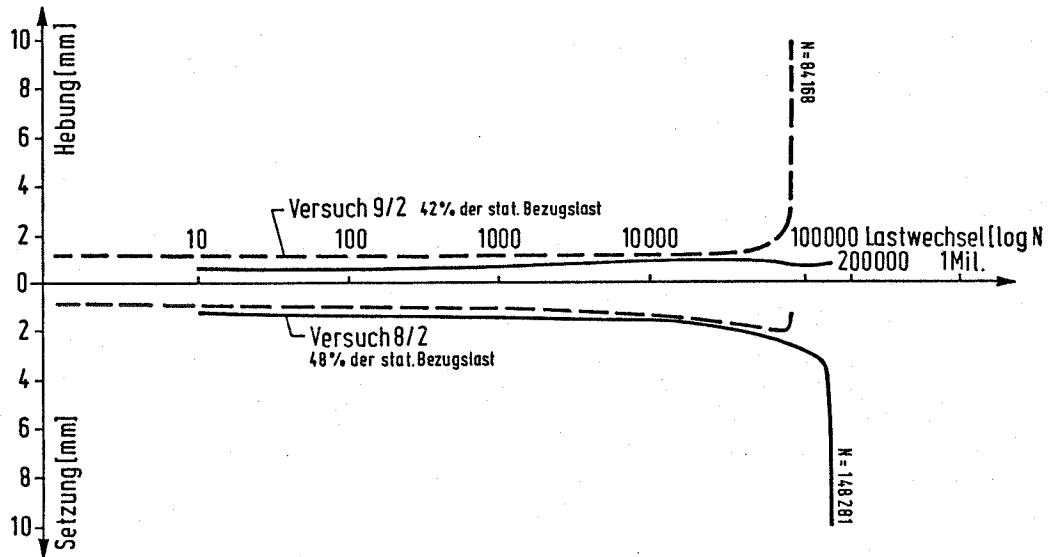


Bild 4 Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm der Versuchsreihe 3 mit Wechsellast bei nicht symmetrischer Belastung nach Vorbelastung mit 200 000 Lastwechseln

Ein Vergleich der Versuche 8/2 und 9/2 mit den Versuchen 3/3 und 5/1 in Bild 5 zeigt, daß die Versuche 8/2 und 9/2 einer größeren Lastwechselzahl bis zum Versagen standgehalten haben als die Versuche 3/3 und 5/1. Der Grund hierfür dürfte in erster Linie in der Vorbelastung mit 200 000 Lastwechseln liegen, die zu einer Verbesserung des Tragverhaltens geführt haben.

Eine ähnliche Verbesserung des Tragverhaltens konnte auch bei den statischen Versuchen 7/2, 7/3 und 7/4, welche nach der zyklischen Beanspruchung mit 200 000 Lastwechseln durchgeführt wurden, gegenüber den anderen rein statischen Versuchen festgestellt werden.

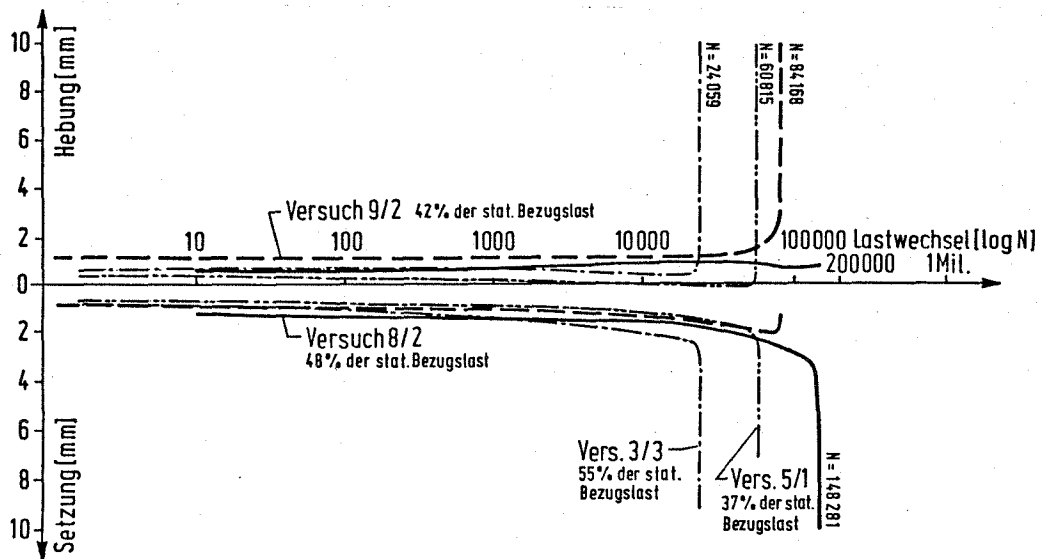


Bild 5: Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramme der Wechselastversuche der Versuchsreihen 1 und 3 mit schnellem Versagen

3.4 Versuche mit Schwelllast

Insgesamt wurden in der 1. Serie 2 Vorversuche mit Druck-Schwelllast und in der 2. Serie 1 Zug-Schwelllastversuch durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt. Beim Vergleich zwischen Druck- und Zugbelastung ist das günstigere Verhalten bei Druckbelastung der 1. Serie auffällig, was möglicherweise auf den Einfluß des Sohlwiderstandes zurückgeführt werden kann. Jedoch wurde bei den Vergleichsversuchen der 2. Serie 8/1 und 10/1 (siehe Bild 3) kein so markanter Unterschied zwischen überwiegend Druck- und Zugbeanspruchung festgestellt.

Der Versuch 9/1 mit einer Lastspanne von 140 kN entsprechend etwa 25 % der statischen Bezugslast bzw. 50 % der statischen Zuggrenzlast, läßt erkennen, daß die 10 mm Versagensgrenze etwa bei der hypothetischen Lastwechselzahl von 1,45 Mio erreicht würde.

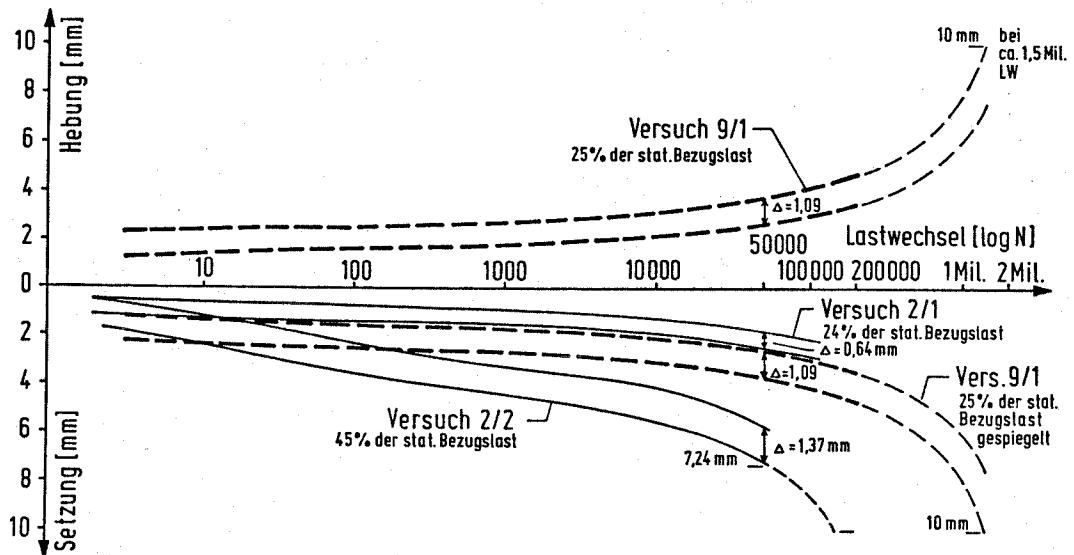


Bild 6: Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm aller Schwelllastversuche der Versuchsreihen 1 und 2

3.5 Versuche bei gefluteter Grube

Der Versuch 10/2 wurde mit derselben Lastspanne wie Versuch 10/1, nämlich 160 kN bei gefluteter Grube fortgesetzt, nachdem bereits eine Vorbelastung mit 200 000 Lastwechseln erfolgt war. Überraschend zeigte sich bereits während der ersten 20 Lastwechsel bei einer Lastwechselzeit von 20 Minuten sofort eine starke Zunahme der Verschiebung der einzelnen Lastwechsel als auch der Gesamtverschiebung und beim 58. Lastwechsel war die vorgegebene Versagensgrenze von 10 mm erreicht. Der Grund liegt wahrscheinlich in der starken Reduzierung der Scherfestigkeit

(Abbau der Kohäsion) durch die Flutung, denn der Schlammkornanteil der Korngrößen unter 0,06 mm \emptyset des Grubensandes lag mit 8 bis 18 % relativ hoch. Ein statischer Bezugswert ist für den gefluteten Zustand nicht vorhanden, aber es ist anzunehmen, daß auch dieser gegenüber dem Wert des erdfeuchten Bodens wesentlich niedriger liegen dürfte.

Der Versuch 7/7 wurde nach der zyklischen Beanspruchung mit 200 000 Lastwechseln (Versuch 7/1) und 5 weiteren statischen Beanspruchungen in wechselnden Richtungen (Versuch 7/2 bis 7/6) als zweite Wechselbelastung im gefluteten Zustand der Grube durchgeführt. Trotz der Ruhezeit von 311 Tagen nach der letzten statischen Beanspruchung stellten sich bereits bei der Lastwechselzeit von 20 Minuten sofort sehr große Verschiebungen mit Maximalwerten außerhalb des Meßbereiches von 100 mm ein, so daß der Versuch nach etwa 70 Minuten (3 Lastwechseln) abgebrochen werden mußte.

Offensichtlich trat trotz der relativ langen Ruhezeit von 311 Tagen nach dem letzten statischen Versuch, bei dem jedoch bereits 40 mm Hebungen und 40 mm Setzungen aufgetreten waren, keine Erholung ein und zusätzlich wirkte sich vermutlich der Verlust an Scherfestigkeit ungünstig aus.

3.6 Statische Versuche

Die Ergebnisse sämtlicher statischer Versuche sind im Bild 7 gegenübergestellt. Zusammenfassend kann daraus festgestellt werden, daß sich kein wesentlicher Unterschied zwischen Druck- und Zugbelastung ergeben hat. Markant ist jedoch die starke Abnahme der Grenzlast bei den jeweils folgenden Beanspruchungen bis zu einem Grenzwert bei der 3. bzw. 4. Beanspruchung.

Das günstigere Ergebnis des Versuches 6/1 gegenüber 4/1 ist durch die Verdickung des Querschnittes im Fußbereich verursacht, wie es sich nach der Ausgrabung gezeigt hat.

Das günstige Ergebnis des Versuches 7/2 ist sehr wahrscheinlich durch die zyklische Vorbelastung von 200 000 Lastwechseln bedingt, welche zu einer Verdichtung des Bodens um den Pfahl geführt haben könnten.

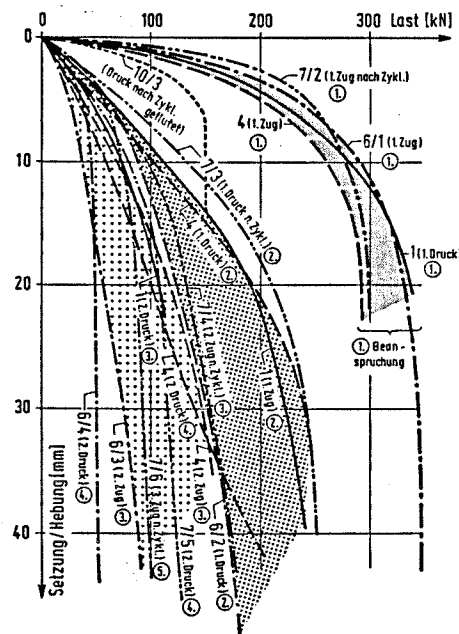


Bild 7: Last-Verschiebungs-Diagramm aller statischer Versuche

Der auffällige andersartige Verlauf des Versuches 10/3 ist auf die zyklische Vorbeanspruchung des Pfahles bis zum Versagen im gefluteten Zustand zurückzuführen.

4. Erkenntnisse aus den zyklischen Versuchen

Aus den durchgeführten zyklischen Versuchen an Reibungspfählen wurden die nachfolgenden Erkenntnisse gewonnen. Die Pfähle wurden nach DIN 4128 in einem schluffigen erdfeuchten Sand mit einer Lagerungsdichte an der unteren Grenze der mitteldichten Lagerung hergestellt wurden. Eine Übertragung auf andere Verhältnisse ist nicht ohne weiteres möglich.

- 4.1 Die Sicherheit der Tabelle 8 der zur Zeit noch gültigen DIN 1054 von mindestens $\eta = 2,0$ für Pfähle mit größerer Wechselbeanspruchung ist zumindest für Reibungspfähle in diesem Boden zu gering.
- 4.2 Für das Versagen ist die Größe der Lastspanne und die Anzahl der Lastwechsel maßgebend, d.h. je kleiner die Lastspanne, desto größer die Lastwechselzahl bis zum Versagen. Nach der 2. Versuchsserie spielt dabei die Lage der Lastspanne innerhalb der Grenzlastbereiche (Druck-Zug) offensichtlich keine entscheidende Rolle, d.h. im Ergebnis traten nur geringe Unterschiede zwischen Zugschwell-, Druckschwell- und reinen Wechselbelastungen auf. Unerwartet war das ähnliche Verhalten zwischen Zugschwellbelastung (Versuch 9/1) und Wechselbelastung mit geringem Drucklastanteil (Versuch 10/1).

- 4.3 Die unterschiedlichen Lastwechselzeiten zwischen 20 Minuten und 30 Sekunden waren ohne Einfluß auf den Versuchsablauf und können als quasi statisch angesehen werden.
- 4.4 Selbst längere Unterbrechungen haben praktisch keine Erholung bzw. Veränderung des Tragverhaltens erkennen lassen.
- 4.5 Die Lasteintragung erfolgte praktisch ohne Verzögerung über die gesamte Pfahlänge.
- 4.6 Die zyklischen Pfahlbewegungen waren noch in einem Abstand von 1,2 m (10facher Pfahldurchmesser) an der Bodenoberfläche deutlich zu messen, jedoch waren sie wesentlich kleiner als die Pfahlbewegung und gegenüber dieser phasenverschoben.
- 4.7 In der Regel kann aus den ersten 20 Lastwechseln nicht auf das endgültige Verhalten des Pfahles geschlossen werden, weil auch erst nach einer größeren Anzahl von Lastwechseln ein schnelles Versagen eintreten kann, wie dies bei 4 Versuchen der Fall war.
- 4.8 Bei gefluteter Grube (Boden unter Auftrieb) trat gegenüber dem erdfeuchten Zustand bei gleicher Wechselbeanspruchung (Versuche 10/1 und 10/2) ein schnelles Versagen ein.

5. Vorschläge für die Praxis

Aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse läßt eine Probelastung mit Simulierung der tatsächlichen zyklischen Belastung zwar ein sofortiges Versagen, wie z.B. in Versuch 10/2, erkennen, sie läßt aber bei nicht sofortigem Versagen keinen eindeutigen Rückschluß auf das endgültige Verhalten zu, es sei denn, daß die Verschiebungsraten der einzelnen Lastwechsel sehr stark abnehmen oder aber Null sind, so daß Versagen ausgeschlossen werden könnte.

Für die Praxis wird daher vorgeschlagen, die zulässige Belastung bei zyklisch beanspruchten Reibungspfählen auf die statische Zuggrenzlast zu beziehen.

Für die zulässige Belastung werden sowohl für Schwell- als auch Wechselbelastung von Reibungspfählen im Sand folgende Werte empfohlen:

zu erwartende Lastwechselzahl	zul. Belastung für Lastfall 1*
1	$0,25 \cdot Q_{\text{Bezug}}$ (entspricht DIN 1054)
100	$0,20 \cdot Q_{\text{Bezug}}$
1.000	$0,19 \cdot Q_{\text{Bezug}}$
10.000	$0,17 \cdot Q_{\text{Bezug}}$
100.000	$0,14 \cdot Q_{\text{Bezug}}$
1.000.000	$0,10 \cdot Q_{\text{Bezug}}$

*) Lastfall 1 nach DIN 1054 (9/76)

Zwischenwerte können interpoliert werden.

In Bild 8 wurde die Grenzlinie für die vorgeschlagene zulässige Belastung in Abhängigkeit von der zu erwartenden Lastwechselzahl zusammen mit den Ergebnissen aller Versuche dargestellt. Dabei wurden die Lastspannen auf die jeweilige doppelte Grenzzuglast bezogen und die Lastwechselzahlen wurden entsprechend dem Versagen (10 mm Verschiebung) bzw. der rechnerisch ermittelten hypothetischen Lastwechselzahl aufgetragen, wobei ein mögliches plötzliches Versagen nicht berücksichtigt werden konnte.

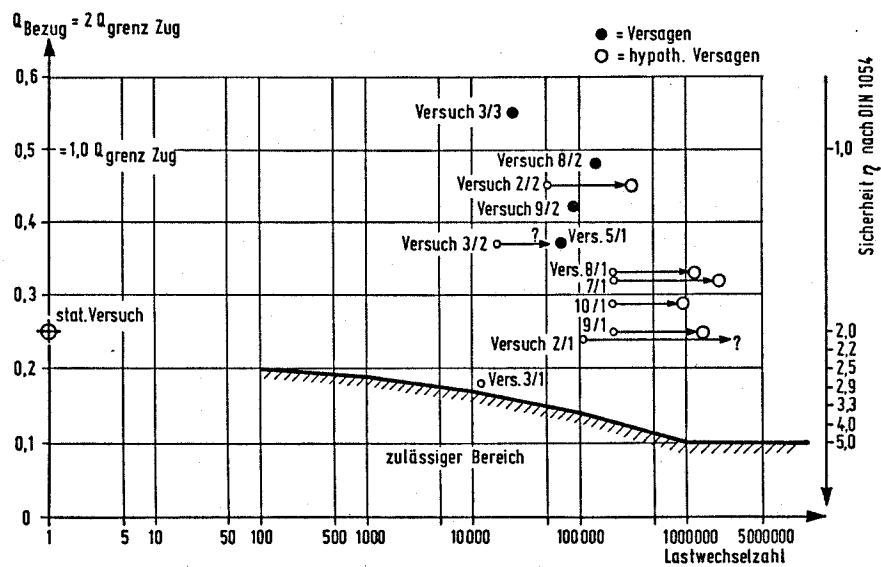


Bild 8: Bemessungsdiagramm für zyklisch beanspruchte Reibungspfähle

Der Bezugswert $Q_{\text{Bezug}} = 2, Q_{\text{gz}}$ kann entweder durch statische Zug-Probepbelastungen ermittelt oder aus Erfahrungswerten abgeschätzt werden.

6. Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Versuche decken nur einen kleinen Bereich der in der Praxis vorkommenden Möglichkeiten ab, sie sind teilweise noch als Vorversuche einzustufen.

Durch die Versuche wurden z.B. folgende grundsätzliche Einflüsse nicht erfaßt, die weitere, gezielte Untersuchungen erforderlich machen.


1. Dichte Lagerung des sandigen Versuchsbodens
2. Vorwiegend auf Spitzendruck beanspruchte Pfähle
3. Bindiger Versuchsboden

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen können nur eingeschränkte Aussagen über das Verhalten von Druckpfählen gemacht werden, welche nur mit einem zusätzlichen kleinen Schwelllastanteil beansprucht werden. Dies entspricht einem in der Praxis häufigen Lastfall. Aus diesem Grunde sind auch hierfür entsprechende Versuche zu empfehlen.

Vordringlich im Hinblick auf die Sicherheit scheint jedoch die Untersuchung des Einflusses von wassergesättigtem Sand (Boden unter Auftrieb) auf Pfähle mit zyklischer Beanspruchung zu sein.



Dipl.-Ing. Schwarz



Dipl.-Ing. Koreck

Verzeichnis der Anlagen
zum Forschungsbericht IV/1-5-436/85

Anlage 1 Versuch 9/2

- /1 - Zeit-Verschiebungs-Diagramm (LW 1-20)
- /2 - Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm (Gesamtversuch)
- /3 - Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm (Versuchsende)
- /4 - Last-Verschiebungs-Diagramm

2 Versuch 8/2

- /1 - Zeit-Verschiebungs-Diagramm (LW 1-30)
- /2 - Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm (Gesamtversuch)
- /3 - Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm (Versuchsende)
- /4 - Last-Verschiebungs-Diagramm

3 Versuch 10/2

- /1 - Zeit-Verschiebungs-Diagramm (LW 1-20)
- /2 - Lastwechsel-Verschiebungs-Diagramm (Gesamtversuch)
- /3 - Zeit-Verschiebungs-Diagramm (Gesamtversuch)
- /4 - Last-Verschiebungs-Diagramm
- /5 - Last-Verschiebungs-Diagramm
- /6 - Zeit-Verschiebungs-Diagramm

4 Versuch 7/7
Zeit-Verschiebungs-Diagramm

5 Aufmaß der ausgegrabenen Pfähle

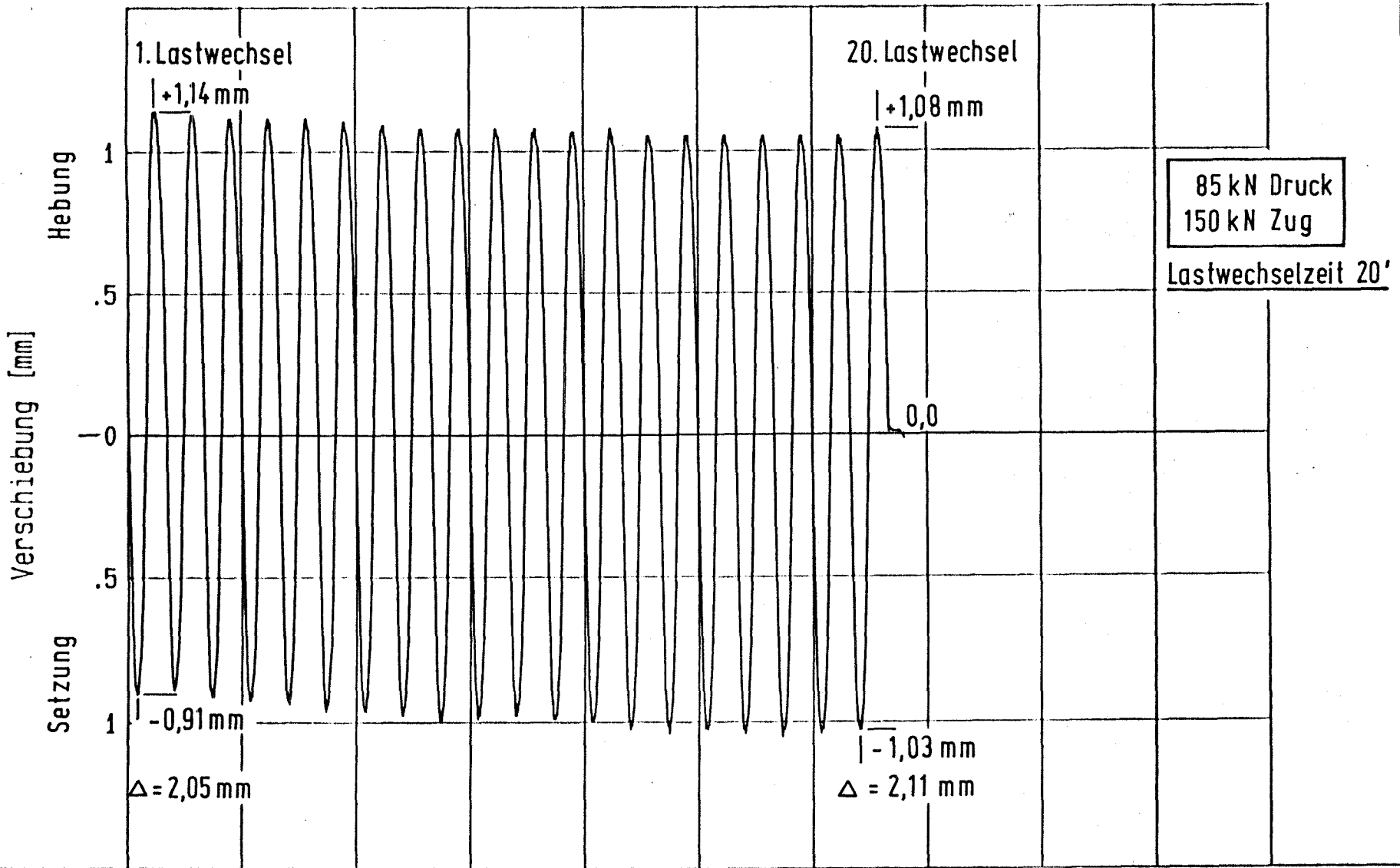
6 Fotos der ausgegrabenen Pfähle

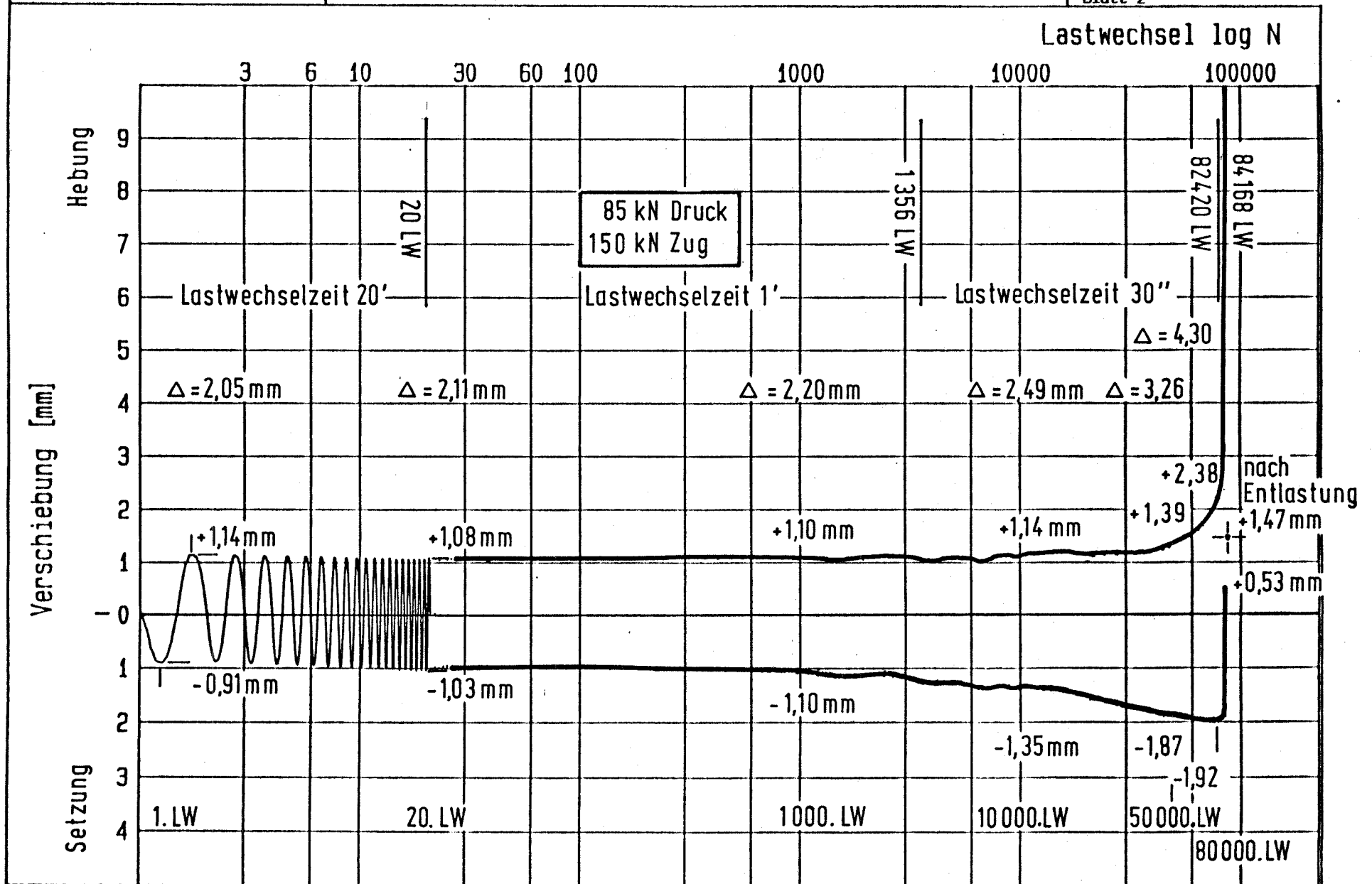
Pfahl 9/2 12/12/1988
2. Wechselbelastung

Zeit - Verschiebungs - Diagramm

Forschungsvorhaben AZ IV 1-5-436/85
Anlage 1 zum Bericht v. März 1990
Blatt 1

Zeit [min]

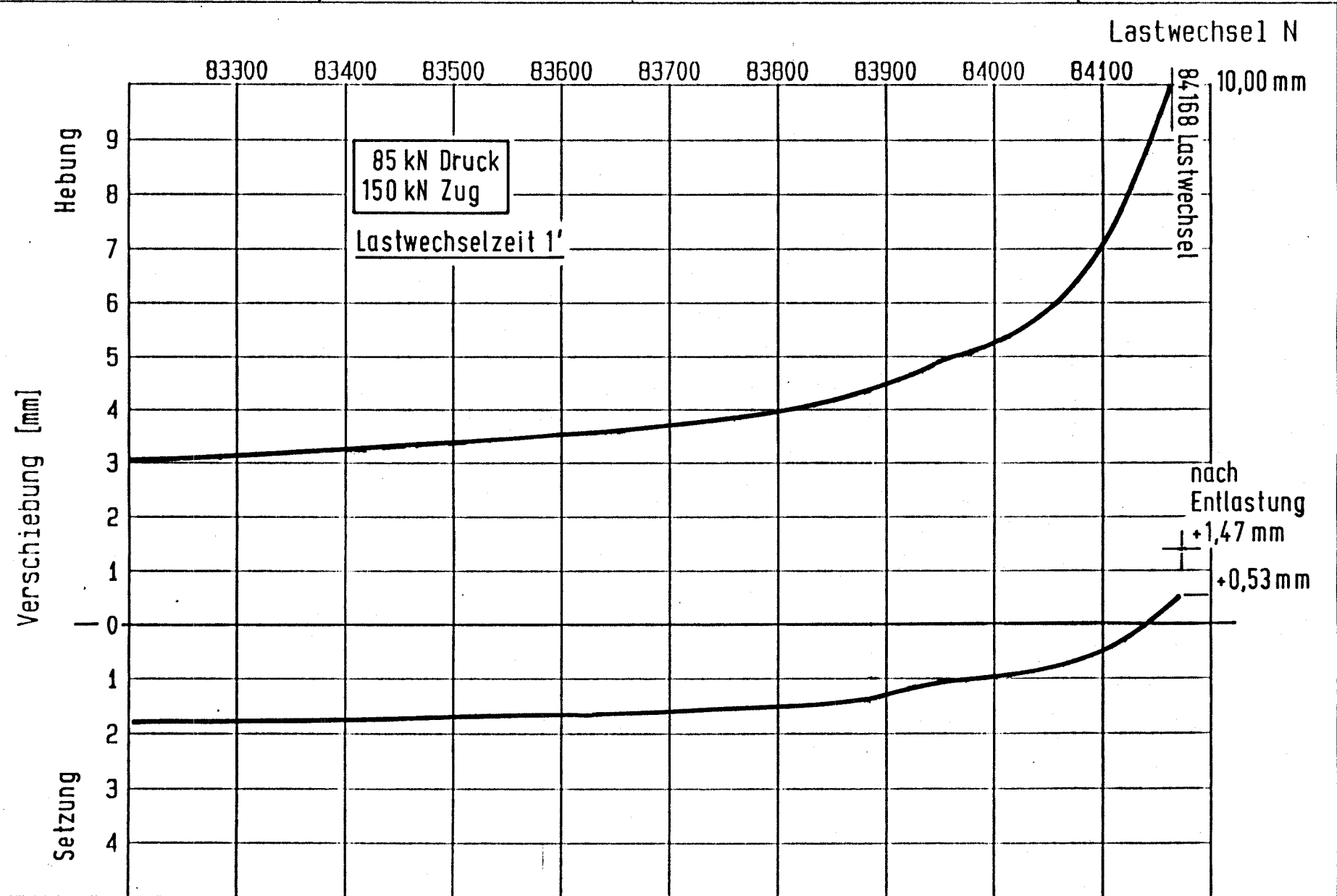


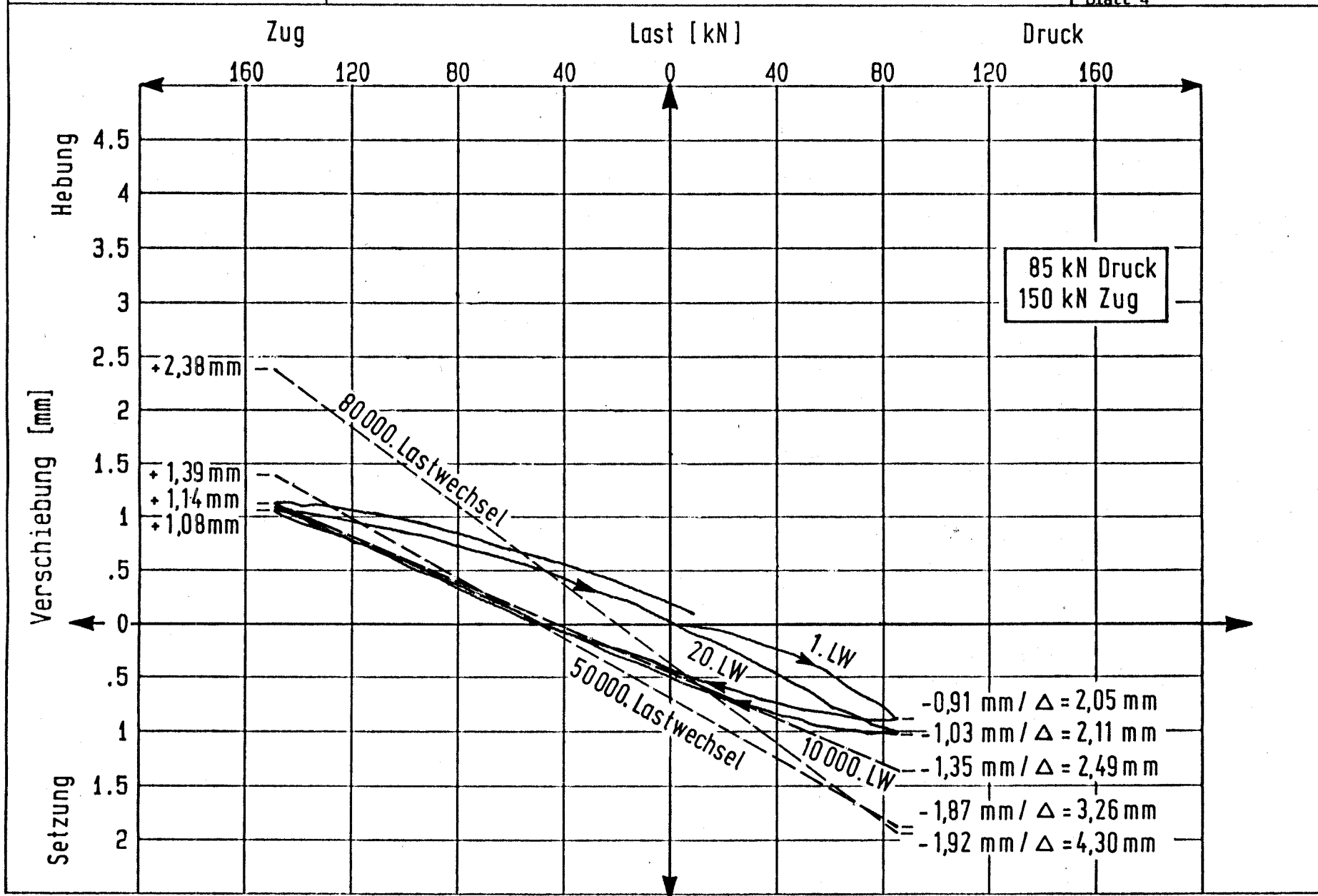


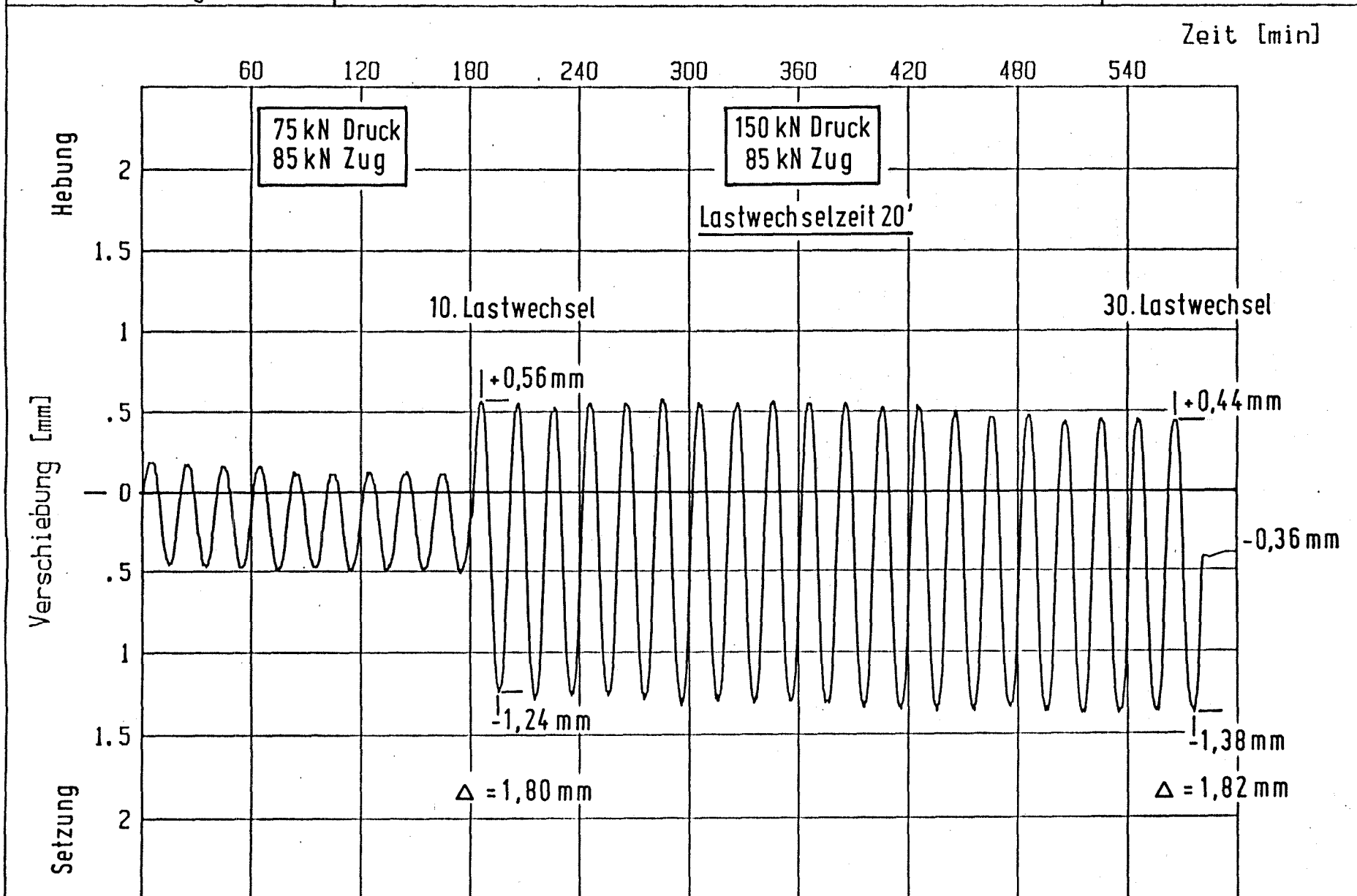
Pfahl 9/2 12/12/1988
2. Wechselbelastung

Lastwechsel - Verschiebungs - Diagramm

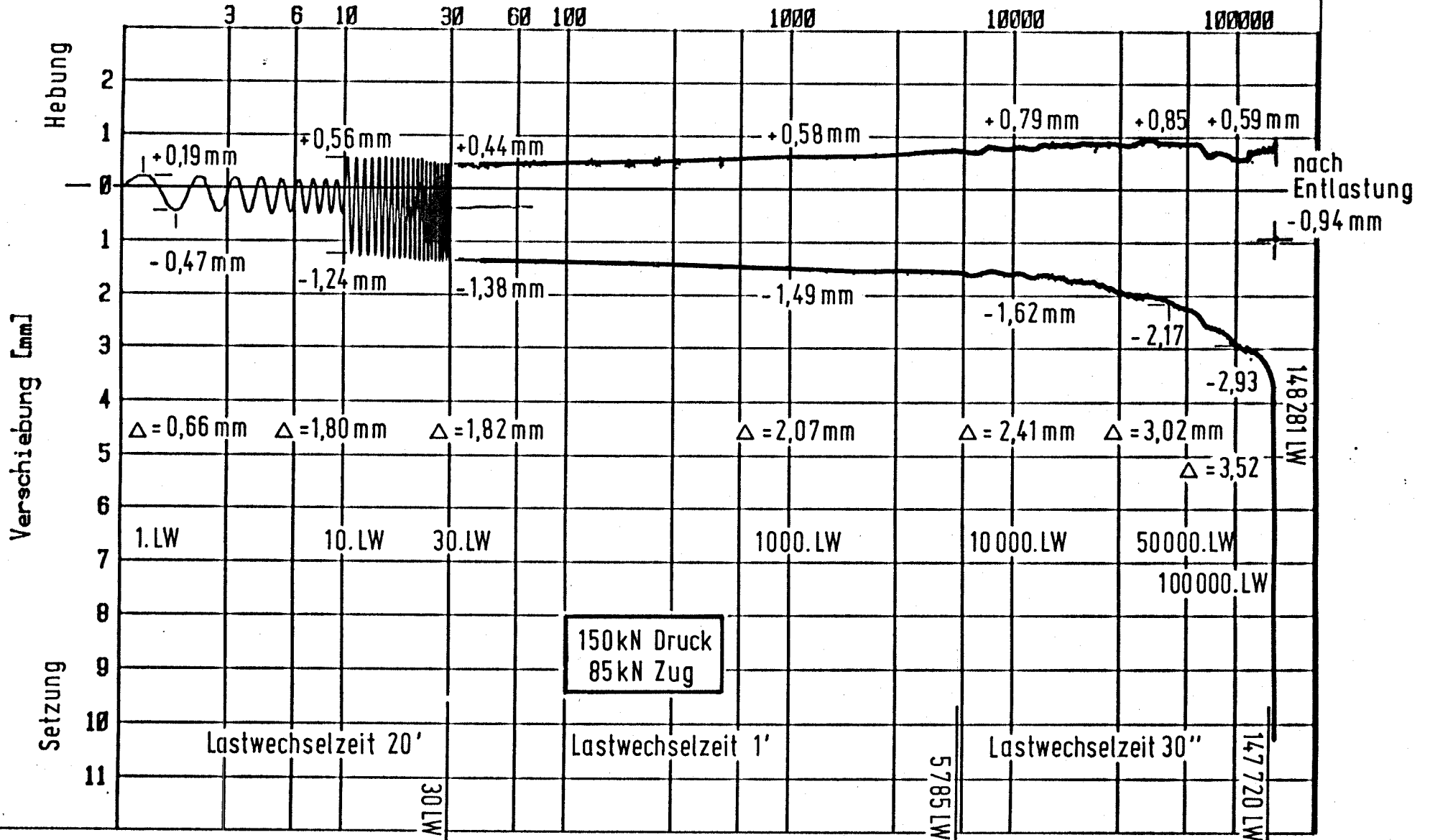
Forschungsvorhaben AZ IV 1-5-436/85
Anlage 1 zum Bericht v. März 1990
Blatt 3

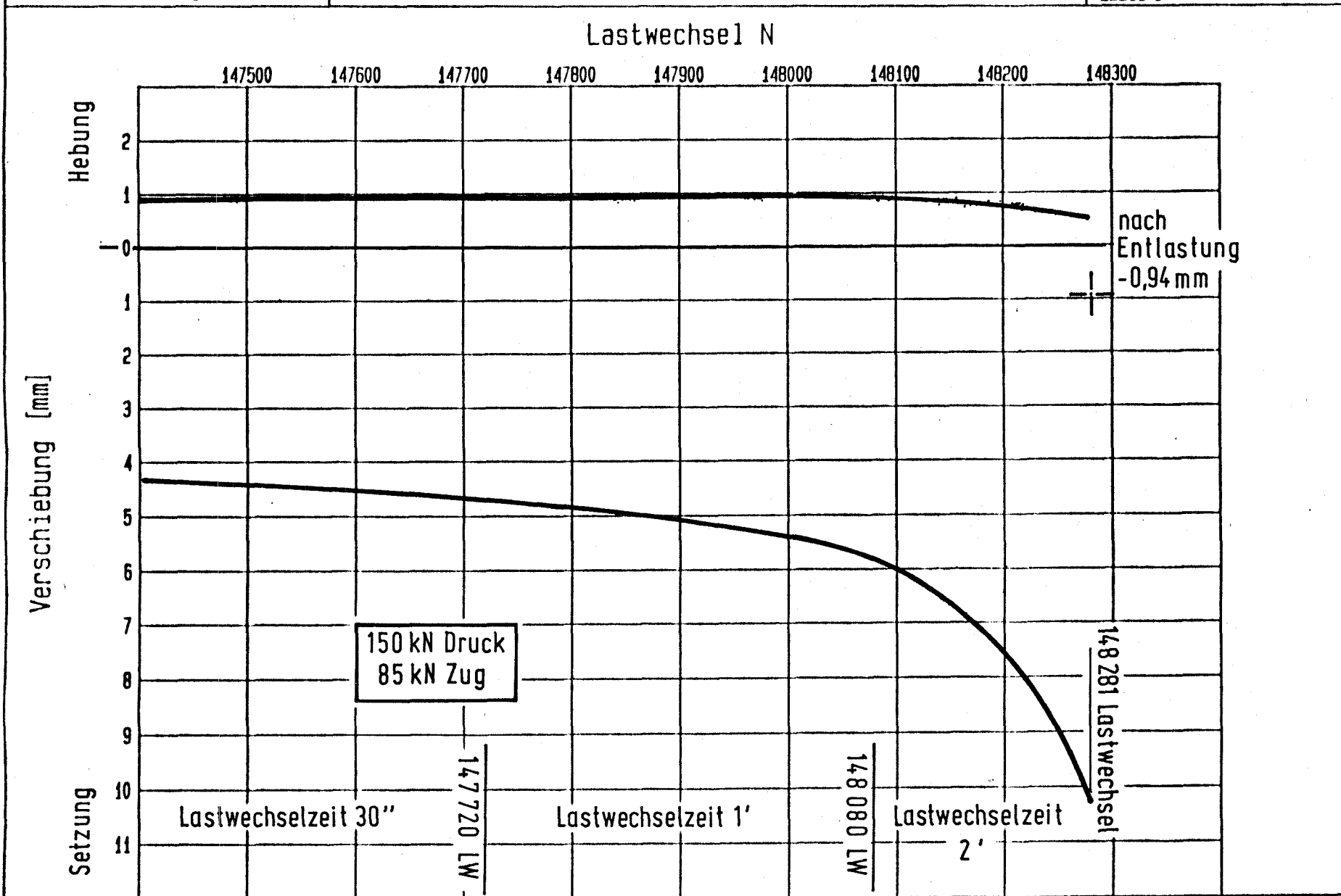


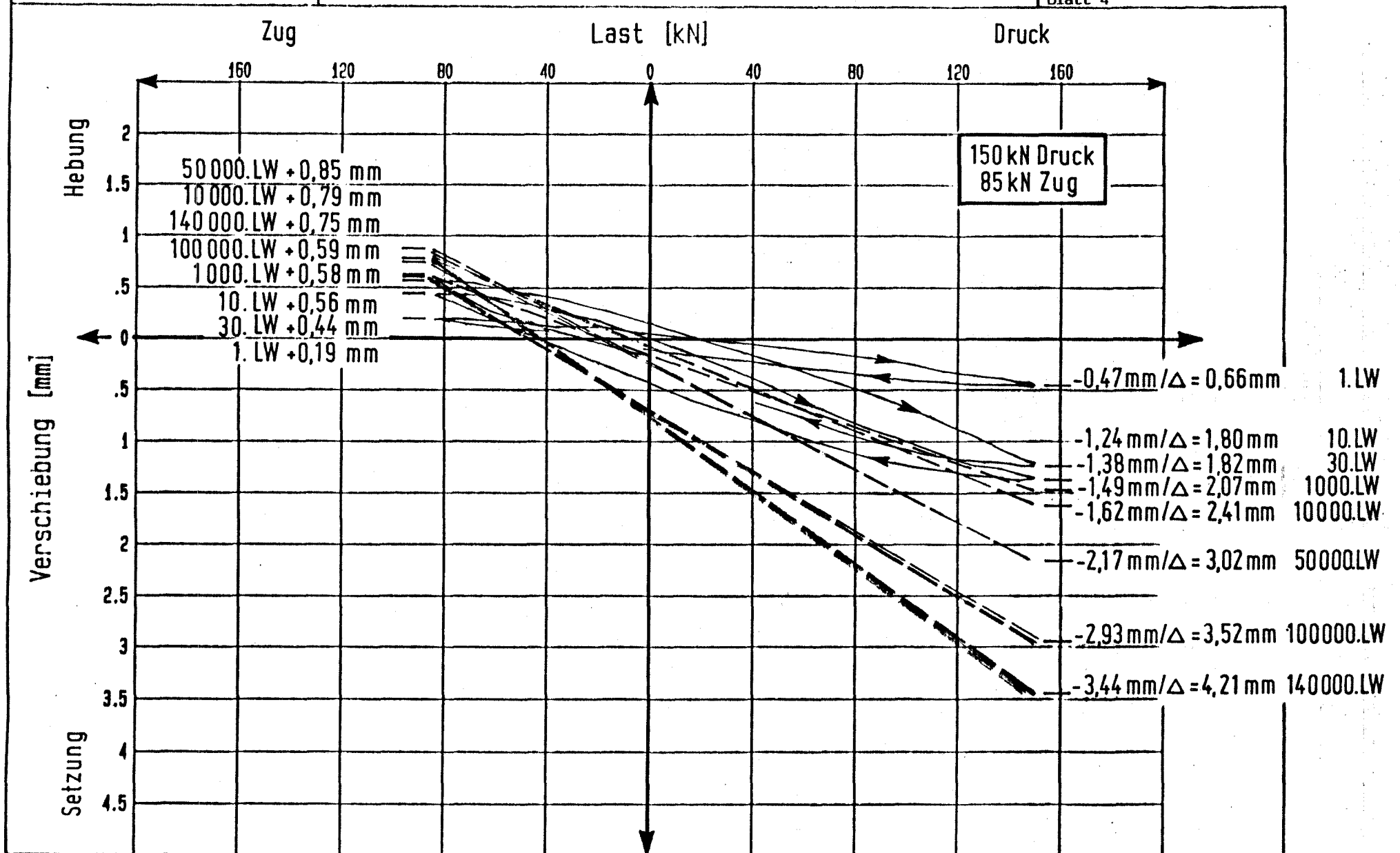




Lastwechsel log N



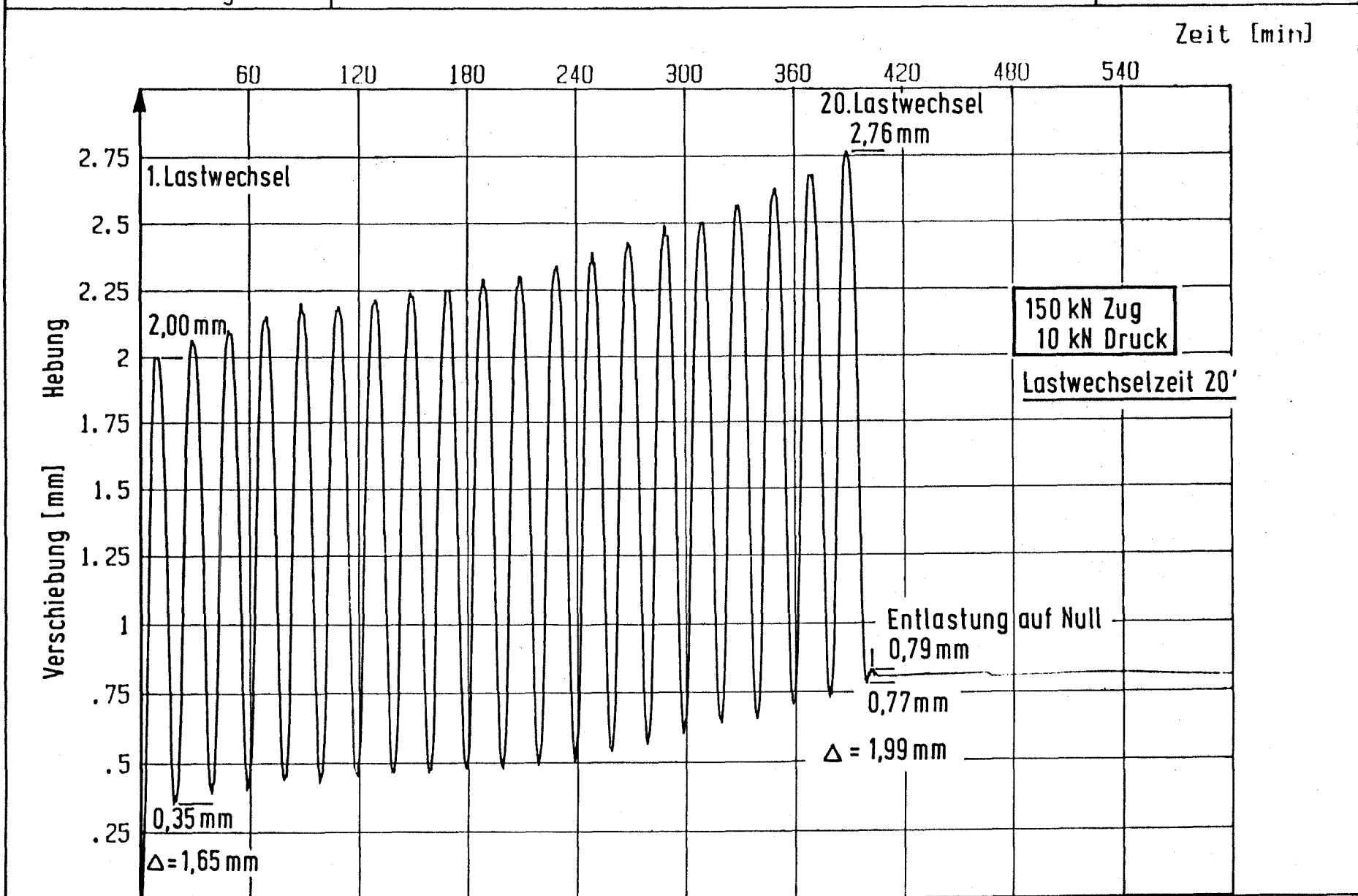


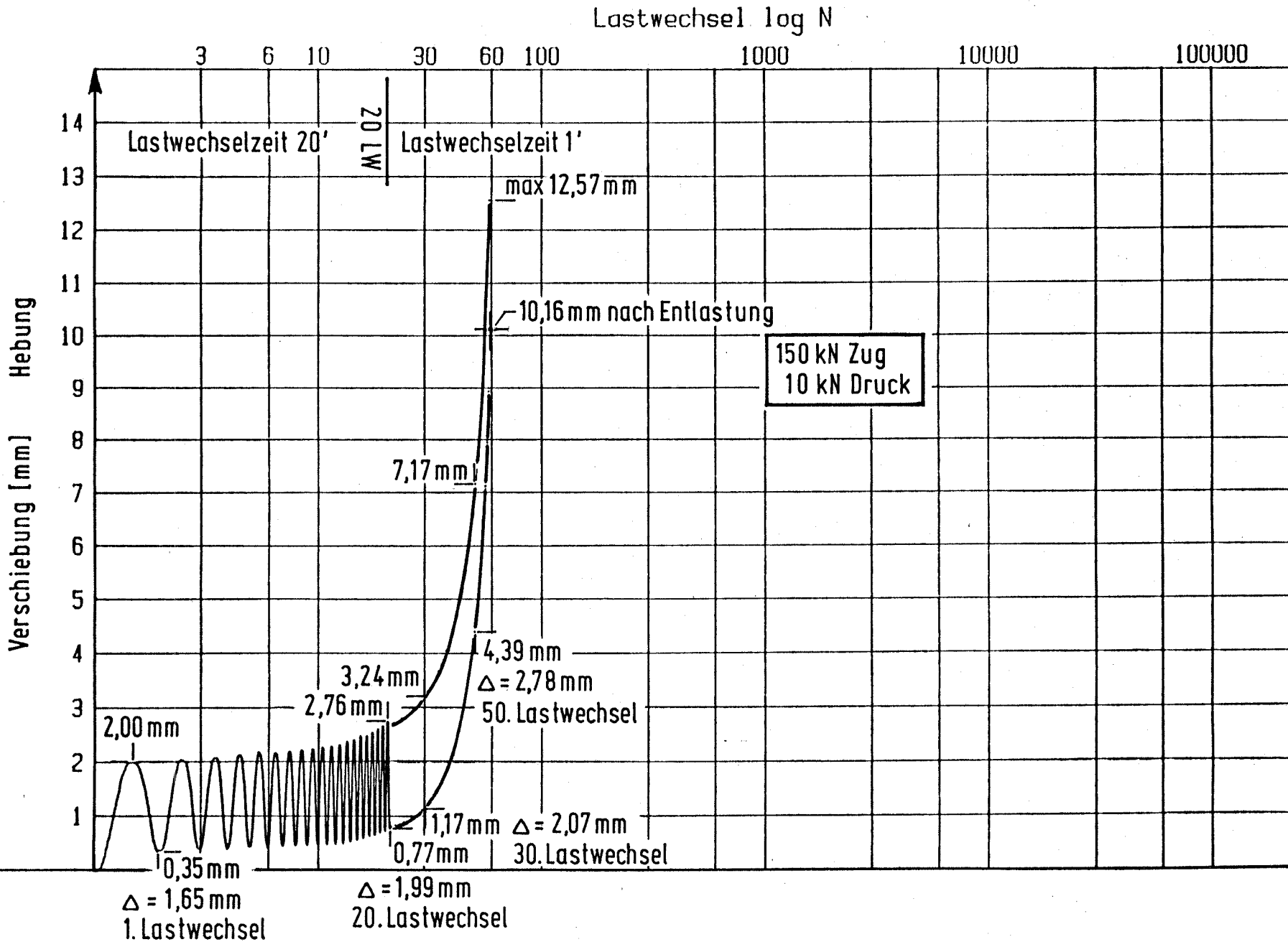


Pfahl 10/2 26/06/1989
2. Wechselbelastung

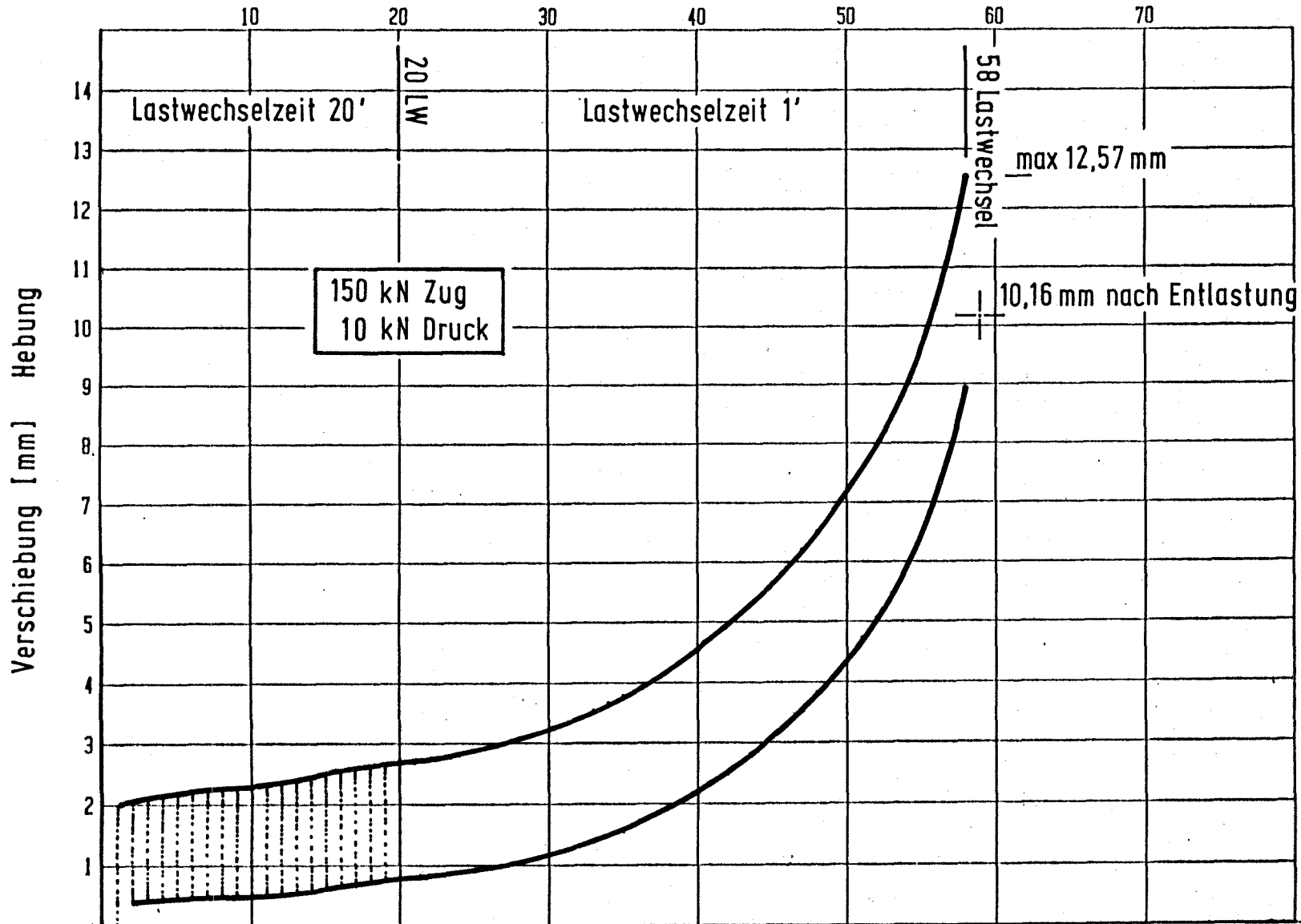
Zeit - Verschiebungs - Diagramm

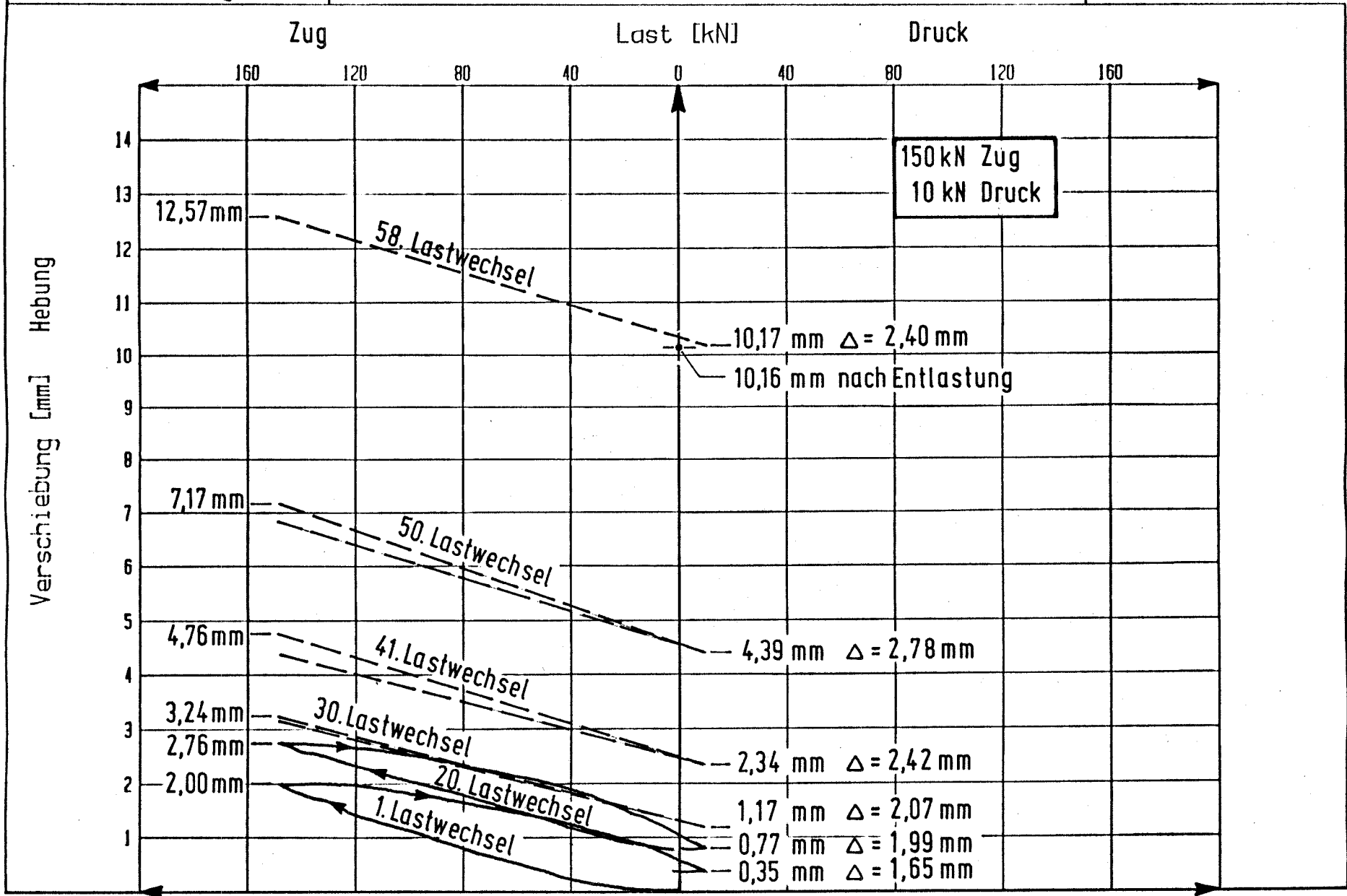
Forschungsvorhaben AZ IV 1-5-436/85
Anlage 3 zum Bericht v. März 1990
Blatt 1





Lastwechsel N

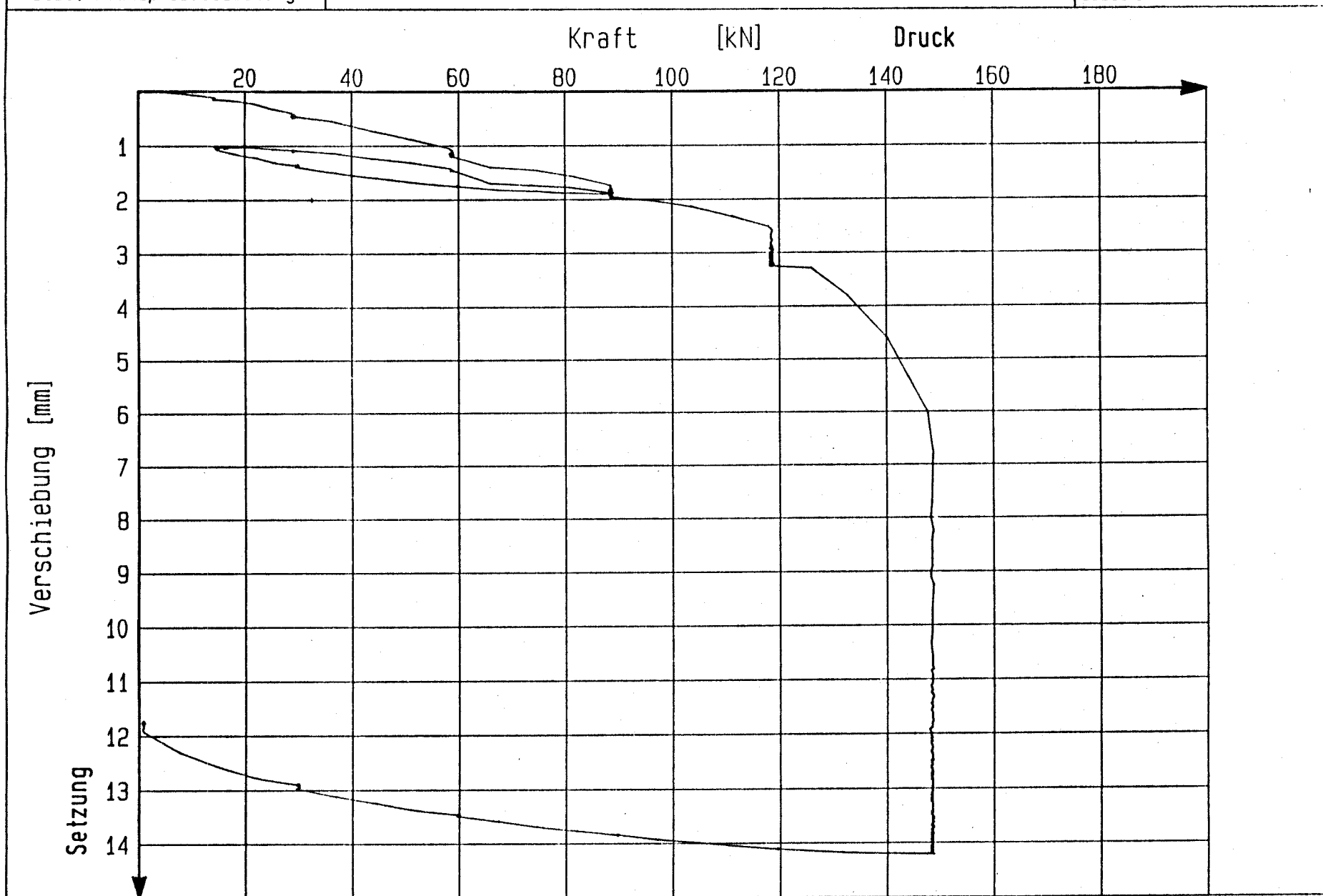




Pfahl 10/3 28/06/1989
Stat. Pfahlprobelastung

Last - Verschiebungs - Diagramm

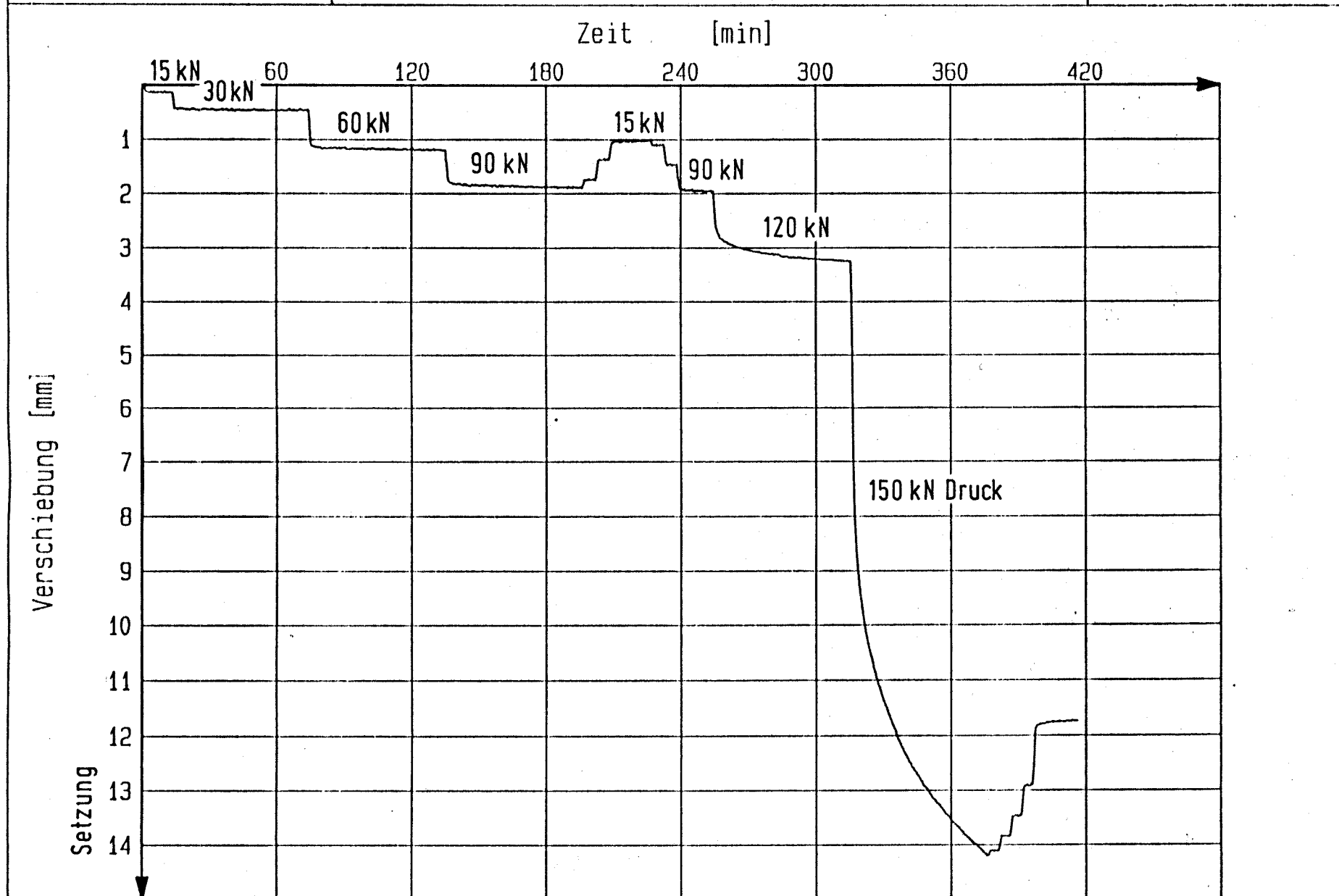
Forschungsvorhaben AZ IV 1-5-436/85
Anlage 3 zum Bericht v. März 1990
Blatt 5



Pfahl 10/3 28/06/1989
Stat. Pfahlprobelastung

Zeit - Verschiebungs - Diagramm

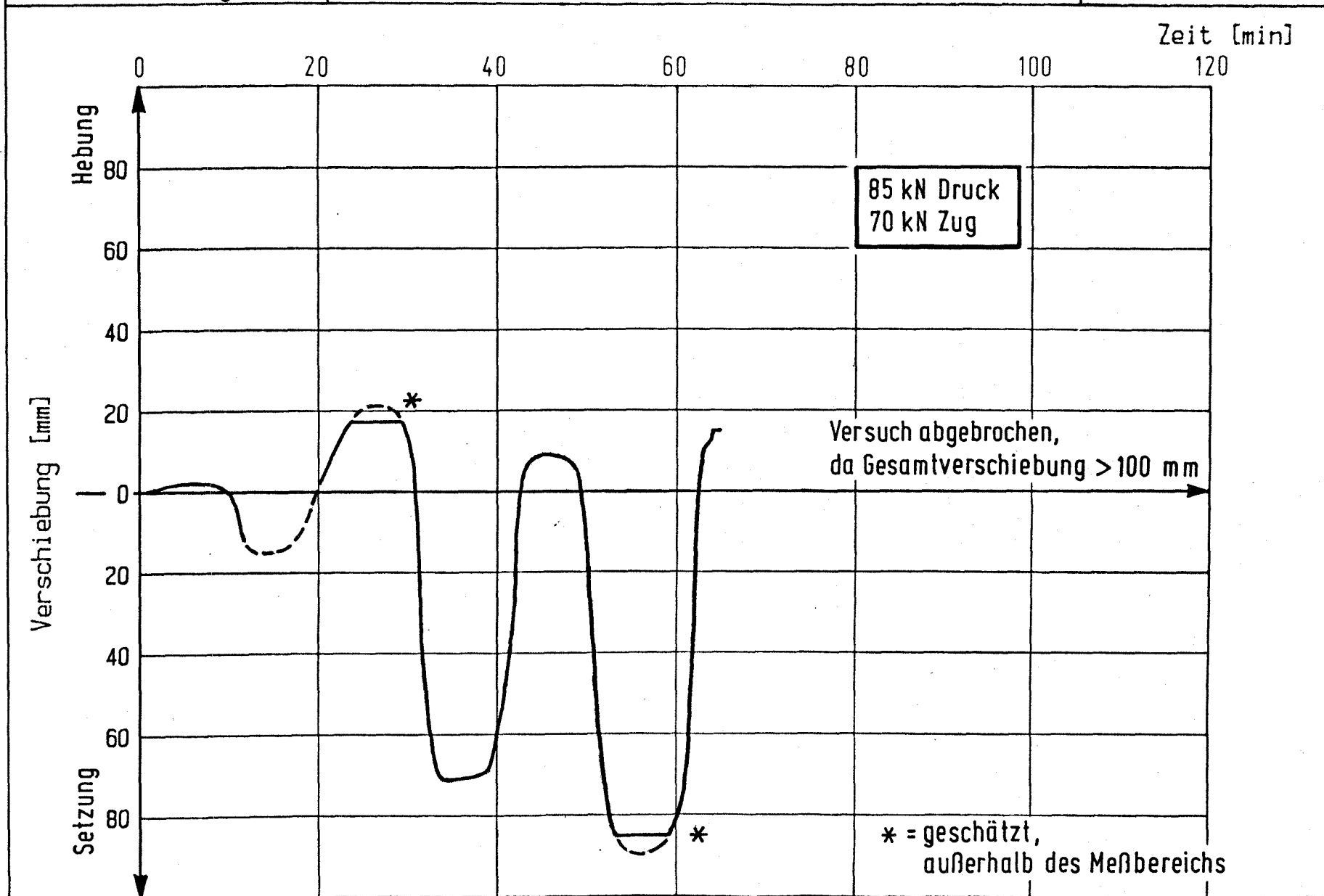
Forschungsvorhaben AZ IV 1-5-436/85
Anlage 3 zum Bericht v. März 1990
Blatt 6



Pfahl 7 01/08/1989
2. Wechselbelastung (Vers. 7/7)

Zeit - Verschiebungs - Diagramm

Forschungsvorhaben AZ IV 1-5-436/85
Anlage 4 zum Bericht v. März 1990



Aufmaß der ausgegrabenen Verpreßpfähle

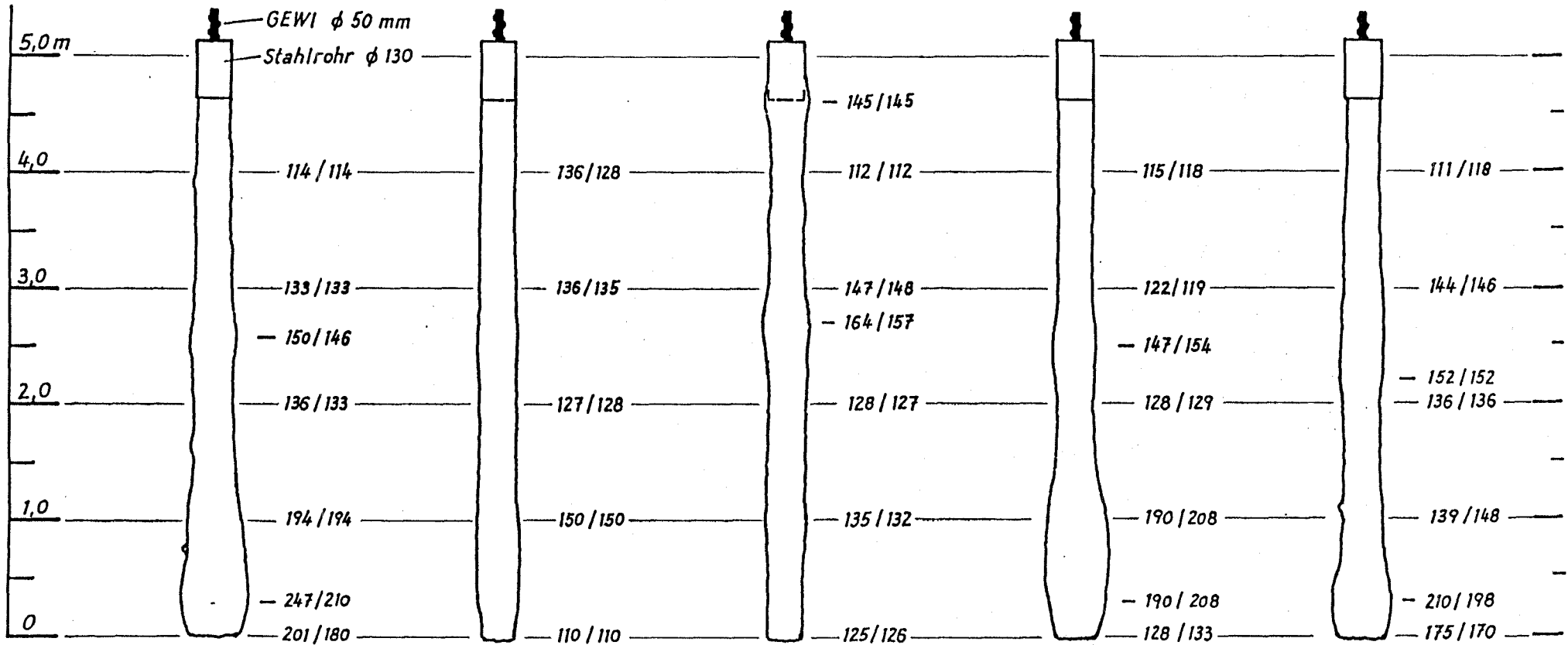
Pfahl Nr. 6

7

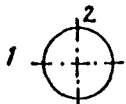
8

9

10



0 100 200 mm



Pfahldurchmesser d_1 / d_2 in mm

Forschungsvorhaben AZ N 1-5-436/ 85

