

Ergänzende Untersuchungen zum Schwingfestverhalten der Betonstähle

T 2185

T 2185

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



FORSCHUNGS- UND
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG - OTTO-GRAF-INSTITUT -

FMPA

7000 STUTTGART 80 (VAIHINGEN)
Pfaffenwaldring 4
Fernsprecher (0711) 685-1 2207

22-15 137 vom 01.12.1989

ABSCHLUSSBERICHT
ZUM FORSCHUNGSVORHABEN
"Ergänzende Untersuchungen zum Schwingfestigkeits-
verhalten der Betonstähle"
(Az.: IV 1-5-529/88)

Dieser Bericht umfaßt 14 Textseiten und 26 Beilagen. Die letzte Textseite und die Beilagen sind mit unserem Dienstsiegel versehen. Die Vervielfältigung und Veröffentlichung des Berichtes sowohl in vollem als auch in gekürztem Wortlaut sowie die Verwendung zur Werbung ist nur mit unserer schriftlichen Genehmigung und nur innerhalb eines Zeitraumes von 2 Jahren nach der Ausstellung zulässig. Gerichtsstand und Erfüllungsort Stuttgart.

1. EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG

In den Jahren 1981 bis 1984 wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens DFG Re 259/26 das "Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen unter wirklichkeitsnahen Beanspruchungs- und Umgebungsbedingungen" untersucht. Die Ergebnisse wurden in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton als Heft 374 veröffentlicht [1].

Eine der wesentlichen Erkenntnisse, die aus dem o.g. Forschungsvorhaben gewonnen werden konnte, war die Existenz einer ausgeprägten Abhängigkeit der ertragbaren Schwingbreiten bzw. Schwingspiele von der Belastungscharakteristik d.h. der Form des Beanspruchungskollektivs. Die Ergebnisse lassen je nach den Gegebenheiten ganz beträchtliche ausnutzbare Steigerungsbeträge an Lebensdauer bzw. Schwingfestigkeit erwarten, wenn an Stelle der Dimensionierung nach Einstufenwerten (konstante Beanspruchungsamplitude) Bemessungsansätze auf Betriebsfestigkeitsbasis (veränderliche Beanspruchungsamplituden) angewandt werden.

Die seinerzeit zur Durchführung des o.g. Forschungsvorhabens bewilligten finanziellen Mittel gestatteten die Erforschung und Ausarbeitung der grundlegenden Zusammenhänge. Für die angestrebte Entwicklung von konkreten Bemessungs- und Konstruktionsrichtlinien auf Betriebsfestigkeitsbasis als Grundlage für die Einbindung in die entsprechenden Vorschriften und Normen ist es jedoch eine unabdingbare Voraussetzung, die gewonnenen Erkenntnisse auf eine statistisch gesicherte Basis zu stellen und darüber hinaus alle möglichen Randeinflüsse auf das Betriebsfestigkeitsverhalten mit abzudecken.

Der finanzielle und zeitliche Rahmen des o.g. Forschungsvorhabens ließ damals ein derartiges "Austesten" im Interesse einer weitgehenden Absicherung und verbindlichen Aussagefähigkeit der Ergebnisse nicht zu.

Zur Schließung dieser noch bestehenden Lücken wurden daher die hier behandelten Ergänzungs- und Anschlußuntersuchungen beantragt. Diese sahen im wesentlichen vor, die seinerzeit ermittelten Betriebsfestigkeits-Lebensdauerlinien (Ergebnisse der Programmversuche, Bilder 40 und 41 des Heftes 374) in ihrem Verlauf im Zeitfestigkeitsbereich (um $N = 10^5$ bis $5 \cdot 10^5$) durch ergänzende Versuche noch besser zu belegen und abzudecken. Außerdem waren einige Anschluß-Versuche zur Klärung des Reihenfolge-Einflusses bei der Betriebsbelastung von Betonstählen durchzuführen. Die damals gefahrenen Programm-Versuche waren durchweg mit steigenden Beanspruchungsamplituden durchgeführt worden. Die zusätzlichen Programm-Versuche sollten mit fallenden Beanspruchungsamplituden gefahren werden, um einen möglichen Reihenfolgeeinfluß zu erfassen und ggf. auch quantifizieren zu können. Schließlich wurden zur Abrundung des Schwingfestigkeitsbildes der Betonstähle neben der Miteinbeziehung des in- zwischen zugelassenen und vermehrt zur praktischen Anwendung kommenden Betonstahl IV S noch einige Programm-Versuche mit unterschiedlichem Teilfolgeumfang vorgesehen, da erfahrungsgemäß die Länge der Teillastkollektive das Schwingfestigkeitsverhalten mit beeinflussen kann. Die bis dato durchgeführten Programm-Versuche waren nur mit einem - bewußt klein gewählten - Teilfolgeumfang gefahren worden.

2. VERSUCHSPROGRAMM

Die wichtigsten Einzelheiten zum durchgeführten Versuchsprogramm sind aus der Zusammenstellung 1, Anlage 1, zu entnehmen. Nachfolgend werden dazu einige Erläuterungen gegeben.

2.1 Verwendete Materialien

Abgesehen von dem in die Untersuchungen mit aufgenommenen neuen Betonstahl IV S (500 S) konnte für alle übrigen Ver-

suchskörper vorteilhafterweise auf die Versuchsmaterialbestände zurückgegriffen werden, die für die eingangs angeführten frühere Forschungsarbeit DFG Re 259/26 [1] angelegt worden waren, so daß von der Werkstoffseite her die Vergleichbarkeit die entsprechenden Versuchsergebnisse gewährleistet war. In Tabelle 1, Anlage 2, sind die kennzeichnenden Eigenschaften aller hier verwendeten Materialien zusammengestellt. Es wurde auch für den neu hinzugekommenen Betonstahl IV S eine Schmelze ausgewählt, die hinsichtlich der Analyse, Herstellung, Erschmelzung und der mechanischen Kennwerte repräsentativ ist für den überwiegenden Teil dieser in der Praxis zur Anwendung kommenden neuen Betonstahlgüte nach DIN 488.

2.2 Form und Ausführung der Versuchskörper

Die Versuchskörper entsprachen hinsichtlich Form, Ausführung und Abmessungen den in [1] in Abschnitt 2.2 beschriebenen. Ausführliche Erläuterungen zur Auswahl und Herstellung der Versuchskörper sind dort wiedergegeben. In den Anlagen 3 und 4 des vorliegenden Berichtes sind die Versuchskörper zur Information nochmals dargestellt.

2.3 Schwingfestigkeitsversuche

Wie bereits in der Einführung umrissen, sah das Programm für die ergänzenden Untersuchungen insgesamt 4 Gruppen von Schwingfestigkeitsversuchen vor:

- a) Durchführung von ca. 8 ergänzenden Betriebsfestigkeitsversuchen zur Abdeckung der Lebensdauerlinien im Zeitfestigkeitsbereich bei etwa $10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^5$ (Betonstahl III).
- b) Durchführung von ca. 4 Betriebsfestigkeitsversuchen mit fallenden Beanspruchungsamplituden zur Abschätzung eines

möglichen Reihenfolgeeinflusses auf die Betriebsfestigkeit der Betonstähle (Betonstahl III).

- c) Durchführung von ca. 4 Betriebsfestigkeitsversuchen zur Klärung der Frage, ob und ggf. in welchem Maß sich der Teilfolgeumfang auf die Betriebsfestigkeit der Betonstähle auswirkt (Betonstahl III).
- d) Durchführung von ca. 12 Schwingfestigkeitsversuchen mit dem inzwischen zugelassenen und nunmehr hauptsächlich in der Praxis zum Einsatz kommenden Betonstahl IV S.

Was Art und Umfang der Betriebsfestigkeitsversuche, Auswahl der Lastkollektive, Prüfmodalitäten usw. anbetrifft, sei auch hier wieder auf die grundlegenden Abhandlungen und Hintergrundinformationen verwiesen, die in [1] zu diesem Themenkreis gegeben werden. Zur besseren Übersichtlichkeit des vorliegenden Berichtes sind in den Anlagen 5, 6 und 7 nochmals die verwendeten Lastkollektivformen sowie die Belastungsfunktionen dargestellt.

In diesem Zusammenhang ist noch folgendes anzumerken: Mit Ausnahme der unter Punkt b) umrissenen speziellen Versuche zur Klärung des Reihenfolgeeinflusses wurden sämtliche in [1] und im vorliegenden Bericht behandelten Versuche mit steigender Belastungsamplitude gefahren. Die skizzenhaften Darstellungen zur Kennzeichnung des jeweils gefahrenen Kollektivtyps in den entsprechenden Diagrammen (Anlagen 44 bis 54 in [1] sowie Anlagen 11 bis 24 im vorliegenden Bericht) erfolgte nach allgemein üblicher Darstellungsweise durchweg mit fallender Amplitude, die Bilder sagen also nichts über die tatsächlich gefahrenen Belastungsfunktionen (Anlage 6 und 7) aus.

Die o.g. Anzahlen von Versuchen in den verschiedenen Gruppen wurden im Verlauf der Untersuchungen z.T. dann etwas variiert d.h. erhöht, wenn auf Grund großer Streuungen oder

stark differierender Ergebnisse eine eindeutige Aussage zur untersuchten Thematik zunächst nicht möglich war. Der genaue Umfang der insgesamt durchgeführten Versuche geht aus Anlage 1 hervor.

2.4 Werkstoffkundliche Untersuchungen

Auf Grund der umfangreichen werkstoffkundlichen Untersuchungen im Rahmen des früheren Forschungsprogramms und der dort gewonnenen grundsätzlichen Erkenntnisse wurde bei den hier behandelten ergänzenden Versuchen auf weitere begleitende werkstoffkundliche Untersuchungen verzichtet.

3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung der vorliegenden ergänzenden Untersuchungen waren identisch mit denen der früheren Untersuchungen und sind ausführlich in [1], Abschnitt 3., beschrieben, so daß sich hier eine nochmalige Darlegung erübrigt.

4. VERSUCHSERGEBNISSE

4.1 Ergänzende Betriebsfestigkeitsversuche zur Abdeckung der Lebensdauerlinien im Zeitfestigkeitsbereich ($10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^5$)

Die Anlagen 9 und 10 enthalten als Zusammenstellungen 2 und 3 alle Einzelheiten zu den durchgeführten ergänzenden Betriebsfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich $10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^5$. Eine Erläuterung zu den gewählten Kurzbezeichnungen der verschiedenen Versuchskörper geht aus Anlage 8 hervor. Bei den grafischen Darstellungen der Ergebnisse in Form von $\Delta\sigma$ -N-Diagrammen wurde so vorgegangen, daß in die entsprechenden vorhandenen Diagramme aus den früheren Unter-

suchungen (Anlagen 53/54 in [1]) die neuen Ergebnisse mit neuen Symbolen eingetragen wurden, siehe Anlagen 11 und 12. Dadurch ist ein unmittelbarer Vergleich der "alten" und "neuen" Ergebnisse möglich und eine ideale Beurteilungsgrundlage hinsichtlich der Anpassung und Einordnung der "neuen" Ergebnisse gegeben.

4.2 Betriebsfestigkeitsversuche mit fallender Beanspruchungsamplitude

In den Zusammenstellungen 4 und 5, Anlagen 13 und 14, sind alle Einzelheiten zu den durchgeführten Programm-Versuchen mit fallender Beanspruchungsamplitude wiedergegeben. Wegen der Kurzbezeichnung der Versuchskörper wird wieder auf Anlage 8 verwiesen. Die Anlagen 15 und 16 enthalten die grafische Darstellung der Ergebnisse, wobei wieder in gleicher Weise wie in Abschnitt 4.1 erläutert vorgegangen wurde, d.h. die Ergebnisse werden in die entsprechenden Diagramme der früheren Untersuchungen eingezeichnet.

4.3 Betriebsfestigkeitsversuche mit geänderten (vergrößerten) Teilfolgeumfang

Es wurden 4 Versuche gefahren, deren Ergebnisse der Zusammenstellung 6, Anlage 17, entnommen werden können. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgte sinngemäß wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben und geht aus den Anlagen 18 und 19 hervor.

4.4 Schwingfestigkeitsversuche mit Betonstahl IV S

Die durchgeführten Einstufen- und Programm-Versuche sind mit allen Einzelheiten und Ergebnissen in den Zusammenstellungen 7 bis 9, Anlagen 20 bis 22, aufgelistet. Zur besseren Beurteilung und Analyse der Ergebnisse wurden diese eben-

falls in die entsprechenden $\Delta\sigma$ -N-Diagramme der relevanten früheren Untersuchungen eingezeichnet, siehe Anlagen 23 und 24.

5. DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE UND FOLGERUNGEN

Vor einer eingehenden Diskussion und Wertung der Versuchsergebnisse soll an dieser Stelle nochmals auf die in [1] ausführlich erörterte, grundlegende Tatsache hingewiesen werden, daß Betonstahl in puncto Schwingfestigkeit die Eigenheit verhältnismäßig großer Streuungen aufweist. Dies gilt sowohl für einstufige wie für betriebsartige Belastungen und sowohl für den geraden Stab wie für den gebogenen. Diese Eigenheit zeigte sich auch bei den vorliegenden Untersuchungen wieder sehr ausgeprägt und muß bei der Wertung der Ergebnisse mit in Betracht gezogen werden.

5.1 Ergänzende Betriebsfestigkeitsversuche im Zeitfestigkeitsbereich ($10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^5$)

Wie aus den Anlagen 11 und 12 zu ersehen ist, vervollständigen die ergänzenden Versuche im höheren Zeitfestigkeitsbereich das Wöhlerfeld der früheren Untersuchungen in der erwarteten Weise. Unter Berücksichtigung des zuvor angesprochenen Streueinflusses kann generell festgestellt werden, daß die früher ermittelten Lebensdauerlinien durch die ergänzenden Versuche des vorliegenden Programms im höheren Zeitfestigkeitsbereich weitgehend gestützt und bestätigt wurden.

Im Falle des geraden Betonstahls ist für Kollektivtyp 2 darüber hinaus zu erkennen, daß diese Lebensdauerlinie besonders deutlich auf der sicheren Seite liegt; hier lieferten auch die ergänzend angesetzten Versuche mit höheren Spannungen durchweg "Durchläufer". Konsequenterweise wären zusätzliche Versuche mit nochmals erhöhten Spannungen erforderlich

gewesen, doch waren bei der gewählten Versuchskörperausbildung - die aus Vergleichbarkeitsgründen derjenigen der früheren Untersuchungen entsprechen sollte - eine weitere Beanspruchungssteigerung Grenzen gesetzt. Wie aus den Zusammenstellungen 2 und 3 zu entnehmen und auch leicht rechnerisch nachvollziehbar ist, besteht bei höheren Lasten die Gefahr des Betonversagens (Versagen der Biegedruckzone), so daß Versuche mit rechnerischen Stahlzugspannungen $> 450 \text{ N/mm}^2$ problematisch waren und daher nicht gefahren werden konnten.

Zusammenfassend kann zu dieser Gruppe von ergänzenden Betriebsfestigkeitsversuchen im höheren Zeitfestigkeitsbereich festgestellt werden, daß sie in ihren Ergebnissen die in [1] ermittelten Lebensdauerlinien hinsichtlich ihrer Lage und Neigung im Wöhlerfeld untermauert haben. Die Lebensdauerlinien können damit als sichere weil ausreichend belegte und fundierte Bemessungsgrundlagen für schwingbeanspruchte Stahlbetonkonstruktionen gelten und herangezogen werden.

5.2 Betriebsfestigkeitsversuche mit fallender Beanspruchungsamplitude

Aus bruchmechanischen Untersuchungen zum Rißfortschritt in metallischen Konstruktionswerkstoffen ist die Wechselwirkung zwischen den einzelnen, aufeinanderfolgenden Beanspruchungsschwankungen (Lastamplituden) bekannt, die wegen des Plastizierens oder des Rißschließens zu Verzögerungen oder Beschleunigungen des Rißwachstums führt. Diese Vorgänge sind die Ursache dafür, daß bei betriebsähnlichen Beanspruchungen die Lastfolge einen erheblichen Einfluß auf die Lebensdauer ausüben kann. Es lag nahe, die in [1] durchweg mit einheitlicher d.h. steigender Lastfolge (sog. low-high Folge) gefahrenen Versuche nunmehr durch einige mit fallender (high-low) Folge zu komplettieren, um einen möglichen Lastfolgeeinfluß für Betonstähle sichtbar zu machen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Anlagen 15

und 16 dargestellt. Insbesondere Anlage 16 mit den Ergebnissen für die gebogenen Betonstähle dokumentiert überzeugend die Erkenntnis, daß bei Betonstählen unter dynamischer Beanspruchung ein ausgeprägter Lastfolgeeinfluß nicht vorhanden ist: Die Ergebnisse liegen hier praktisch "auf der Linie" der früheren Ergebnisse. In Anlage 15 für die geraden Betonstähle tendieren zwar die Werte für Kollektivtyp 1 etwas in Richtung größere Lebensdauer bei fallender Amplitude, doch zeigen die zuvor angeführten Ergebnisse der gebogenen Stähle wie auch die der geraden Stähle für Kollektivtyp 2 in Anlage 15 eine so gute Übereinstimmung mit den früheren Ergebnissen bei steigender Amplitude, daß die etwas auf der sicheren Seite "daneben liegenden" Werte für Kollektivtyp 1 wohl der eingangs nochmals herausgestellten natürlichen Streutendenz zugeschrieben werden müssen. Zumindest kann pauschal festgestellt werden, daß Beanspruchungsfunktionen mit fallender Amplitude gegenüber steigenden Amplituden keine gravierende Schwingfestigkeitsminderung bewirken, also kein signifikanter Lastfolgeeinfluß existiert.

5.3 Betriebsfestigkeitsversuche mit vergrößertem Teilfolgeumfang

Für die in [1] durchgeführten Betriebsfestigkeitsversuche war ein bewußt kleiner Teilfolgeumfang von $N_T = 10^4$ Schwingspielen gewählt worden, um so eine bessere Durchmischung der Beanspruchungsamplituden und damit eine weitgehende Annäherung an die Verhältnisse der Praxis zu erreichen. Nach heutigen Erkenntnissen übt der Teilfolgeumfang einen wesentlichen Einfluß auf die experimentell ermittelte Lebensdauer aus, wobei z.T. die Ansicht vertreten wird, daß i.a. eine Überschätzung der tatsächlichen Lebensdauer eines Bauteils in Programmversuchen gegeben ist, die mit der Vergrößerung des Teilfolgeumfangs anwächst. Der Teilfolgeumfang sollte also wegen der zuvor genannten Realitätsnähe so klein wie möglich gewählt werden, er sollte aber auch alle Lastspiele proportional zu ihrem anteiligen Vorkommen im Gesamt-

kollektiv enthalten. Unter diesen Aspekten sowie auf Grund technischer Randbedingungen war seinerzeit $N_T = 10^4$ festgelegt worden.

Um einen Anhalt zu bekommen, ob und ggf. wie empfindlich Betonstähle in Betriebsfestigkeitsversuchen hinsichtlich ihrer Lebensdauer auf den Teilfolgeumfang reagieren, wurden die hier beschriebenen Versuche konzipiert und durchgeführt. Es wurde ein Teilfolgenumfang von $N_T = 10^5$ gewählt, also das 10-fache des früheren Umfangs, wobei hier eine weitere - die obere Umfangsgrenze betreffende - Erkenntnis der Betriebsfestigkeitsforschung zum Teilfolgeumfang zu beachten war, die besagt, daß der Teilfolgeumfang so zu wählen ist, daß bis zum Eintreten des Versagens stets mindestens mehrere Teilfolgen durchlaufen werden sollten.

Die Anlagen 18 und 19 veranschaulichen als $\Delta\sigma$ -N-Diagramme die Ergebnisse dieser insgesamt 4 Versuche mit dem auf $N_T = 10^5$ vergrößerten Teilfolgeumfang. Es ist klar ersichtlich, daß sich diese Ergebnisse mit den früheren Ergebnissen quasi decken, d.h. im untersuchten Teilfolgeumfangsbereich $N_T = 10^4$ bis 10^5 konnte keine nennenswerte Beeinflussung der Lebensdauer festgestellt werden. Dieses Erkenntnis ist nicht zuletzt auch für weitere zukünftige Betriebsfestigkeitsversuche mit Betonstählen von grundsätzlicher Bedeutung, gestattet sie doch eine beachtliche Freizügigkeit bzw. Flexibilität bei der Konzipierung von Versuchen und bei der Nutzung der jeweiligen prüftechnischen Gegebenheiten.

5.4 Schwingfestigkeitsversuche mit Betonstahl IV S

In der Zusammenfassung in [1] erfolgte eine kritische Reflexion jener Ergebnisse im Hinblick auf zukünftige Betonstahlgüten. Es wurde die für das Schwingfestigkeitsverhalten maßgebenden Einflußfaktoren herausgestellt und die Schlußfolgerung bzw. der Ausblick formuliert, daß von kommenden, weiter oder neu entwickelten Betonstählen vergleichbare Schwingfestigkeitseigenschaften erwartet werden können wie

die in [1] am Betonstahl III ermittelten, vorausgesetzt bei den neuen Stählen werden sich in den fertigungsbedingten schwingfestigkeitsbestimmenden Eigenheiten (Oberflächenbeschaffenheit, Rippengeometrie) keine gravierenden Veränderungen ergeben.

Mit dem Betonstahl IV S kam bald nach Abschluß der Arbeit [1] eine neue Stahlgüte auf den Markt, die diese Voraussetzungen erfüllte, d.h. die sich vom Betonstahl III neben den statischen Festigkeitswerten im wesentlichen nur durch die chemische Zusammensetzung und die Rippenanordnung unterscheidet. Nachdem dieser Betonstahl IV S inzwischen eine große Verbreitung gefunden hat und den Betonstahl III weitgehend abgelöst hat, lag es nahe, durch geeignete Anschlußversuche eine Bestätigung oder Korrektur der am Ende von [1] getroffenen, pauschalen Aussage herbeizuführen.

Auch hier läßt sich die Interpretation der Ergebnisse am anschaulichsten an Hand der "Einblendung" in die $\Delta\sigma$ -N-Diagramme der früheren Untersuchungen vornehmen, siehe Anlagen 23 und 24. Bei den gebogenen Stählen (Anlage 24) ordnen sich die Ergebnisse sowohl der Einstufen- wie auch der Programmversuche mit dem Betonstahl IV S sehr gut in das vorhandene Wöhlerfeld des Betonstahls III ein, das Schwingfestigkeitsverhalten beider Stahlgüten ist danach erwartungsgemäß als gleichartig einzustufen. Bei den geraden Stählen (Anlage 23) ist das Bild nicht ganz so einheitlich. Hier fallen bei den Einstufenversuchen und den Programmversuchen mit Kollektivtyp 1 die verhältnismäßig großen Streubreiten ins Auge, für die es vorab keine fundierte Erklärung gibt, zumal die Anzahl der Versuche zu gering ist, um aus diesen wenigen Daten bereits eine Eigenheit des Betonstahls IV ableiten zu können. "Im Mittel" werden aber auch hier Schwingfestigkeitswerte erreicht, die denen des Betonstahl III vergleichbar sind.

Insgesamt gesehen liefern die Ergebnisse mit Betonstahl IV S also eine Bestätigung sowohl der grundsätzlichen Ausführun-

gen in [1] zum Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen wie auch der dort gezogenen Schlußfolgerungen zur Übertragbarkeit jener Ergebnisse auf andere Betonstähle. Fazit: Betonstahl III und Betonstahl IV S sind im Schwingfestigkeitsverhalten als gleichwertig einzustufen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war es, durch ergänzende Untersuchungen die grundlegenden Erkenntnisse und Zusammenhänge, die im Rahmen des Forschungsvorhabens DFG Re 259/26 "Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen unter wirklichkeitsnahen Beanspruchungs- und Umgebungsbedingungen" [1] in den Jahren 1981 bis 1984 erarbeitet wurden, auf eine breitere und damit besser abgesicherte Basis zu stellen, sowie darüberhinaus möglichen Randeinflüssen auf das Schwingfestigkeitsverhalten nachzugehen und diese durch gezielte Anschlußversuche zu erfassen.

Als Resümee der vorliegenden Arbeit kann festgestellt werden, daß die Ergebnisse eine tatsächliche Ergänzung und Untermauerung der in [1] formulierten Schwingfestigkeitseigenschaften erbrachten und daß die Betonstähle auf die untersuchten Randeinflüsse verhältnismäßig unsensibel reagierten.

In den Bildern 14 und 15, Anlagen 25 und 26, sind sämtliche Schwingfestigkeitsdaten, die bei der Abwicklung der vorliegenden und der früheren Forschungsarbeit angefallen sind, in jeweils einem Diagramm für gerade und für gebogene Betonstähle zusammenfassend dargestellt. Die Darstellungen veranschaulichen mit den dicht belegten Wöhlerfeldern das intensive Austesten der Betonstähle und dokumentieren die ge-

wünschte breite Basis für die ermittelten Lebensdauerlinien, die so als sichere Bemessungshilfe für dynamisch beanspruchte Stahlbetonkonstruktionen dienen können.

gez. Harre

(Dr.-Ing. W. Harre)



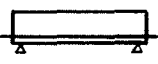



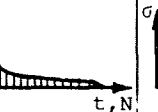
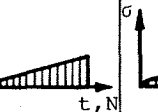
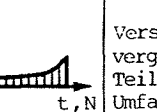
gez. Beul

(Dipl.-Ing. W. Beul)

- [1] Rehm, G., Harre, W. und Beul, W.:
Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen unter
wirklichkeitsnahen Beanspruchungs- und Umgebungs-
bedingungen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin,
Heft 374, Berlin 1986.

ZUSAMMENSTELLUNG 1

ART UND UMFANG DES DURCHFÜHRTEN PROGRAMMS VON SCHWINGFESTIGKEITSVERSUCHE

Ausführung der Versuchskörper			Art und Anzahl der durchgeführten Schwingfestigkeitsversuche							
Stahlart	Nenndurchmesser mm	Balkenform		Einstufen- (Wöhler-) Versuche	Programm- (Betriebsfestigkeits-) Versuche					
									Versuche mit vergrößertem Teilfolgen-Umfang	
BSt 420 K (III K)	16	-	1	-	-	-	1	-	-	
		-	1	-	-	1	-	-	1	
		1	-	-	-	-	-	-	-	1
		1	-	-	1	-	-	-	1	-
		1	-	-	-	-	-	-	-	-
	28	1	-	-	-	-	-	1	-	-
		-	1	-	-	-	-	1	-	-
		-	1	-	-	1	-	-	1	-
		1	-	-	-	-	1	-	-	-
		1	-	-	-	-	-	-	-	1
BSt 420 U (III U)	16	1	-	-	-	-	1	-	-	
	-	-	1	-	-	-	1	-	-	
	28	1	-	-	-	-	-	1	-	
	-	-	1	-	-	-	-	1	-	
BSt 500 S (IV TS)	16	1	-	1	-	-	-	-	-	
		-	1	1	-	-	-	-	-	
		1	-	-	-	-	-	1	-	
		1	-	-	-	-	-	1	-	
		-	1	-	-	-	-	-	1	
	28	1	-	1	1	-	-	-	-	-
		-	1	1	1	-	-	-	-	-
		-	1	1	1	-	-	-	-	-
		1	-	-	-	-	-	1	-	-
		1	-	-	-	-	-	1	-	-

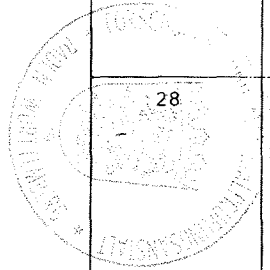


Tabelle 1 . KENNZEICHNENDE EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN BETONSTÄHLE

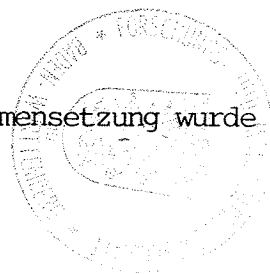
Lfd. Materialnummer	Gütebezeichnung (Kurzzeichen)	Durchmesser	Mechanische Kennwerte ¹⁾			Herstellart ³⁾	Chemische Analyse ⁴⁾										
			R _{eH} ²⁾	R _m	A ₁₀		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Nb,V	Cu
			N/mm ²	N/mm ²	%		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	BSt 420 U (III K)	16	434 435	707 740	18,2 18,0	y	0,41	0,49	0,90	0,025	0,023	0,10	0,13	0,03	0,04	< 0,01	0,19
2	BSt 420 U (III U)	28	467 451	753 765	15,4 17,0	y	0,42	0,41	1,13	0,034	0,027	0,10	0,11	0,02	0,01	< 0,01	0,30
3	BSt 420 K (III K)	16	481 453	569 555	14,4 13,8	y	0,16	0,26	0,55	0,014	0,023	0,05	0,02	0,02	0,02	Nb: 0,01 V: 0,01	0,01
4	BSt 420 K (III K)	28	438 452	568 554	14,0 12,9	SM	0,17	0,31	0,57	0,010	0,023	0,09	0,07	0,02	0,01	< 0,01	0,12
5	BSt 500 S (IV S)	16	- 566	- 656	- 15,3	y	0,17	0,27	0,94	0,018	0,034	0,04	0,03	0,02	n.f.	n.f.	0,07
6	BSt 500 S (IV S)	28	- 566	- 677	- 15,7	y	0,18	0,27	0,89	0,017	0,018	0,06	0,04	0,02	n.f.	n.f.	0,09

1) obere Zeile : Werksangaben
untere Zeile : eigene Messungen

2) bei der Betonstahlsorte 420 RK, Durchmesser 16 und 28 mm, wurde anstelle der Streckgrenze R_{eH} die 0,2 %-Dehngrenze R_{p0,2} ermittelt

3) y = Sauerstoffblasverfahren
SM = Siemens-Martin-Verfahren

4) Stückanalysen. Die chemische Zusammensetzung wurde mittels emissionsspektrometrischer Analyse ermittelt.
n.f. = nicht festgestellt



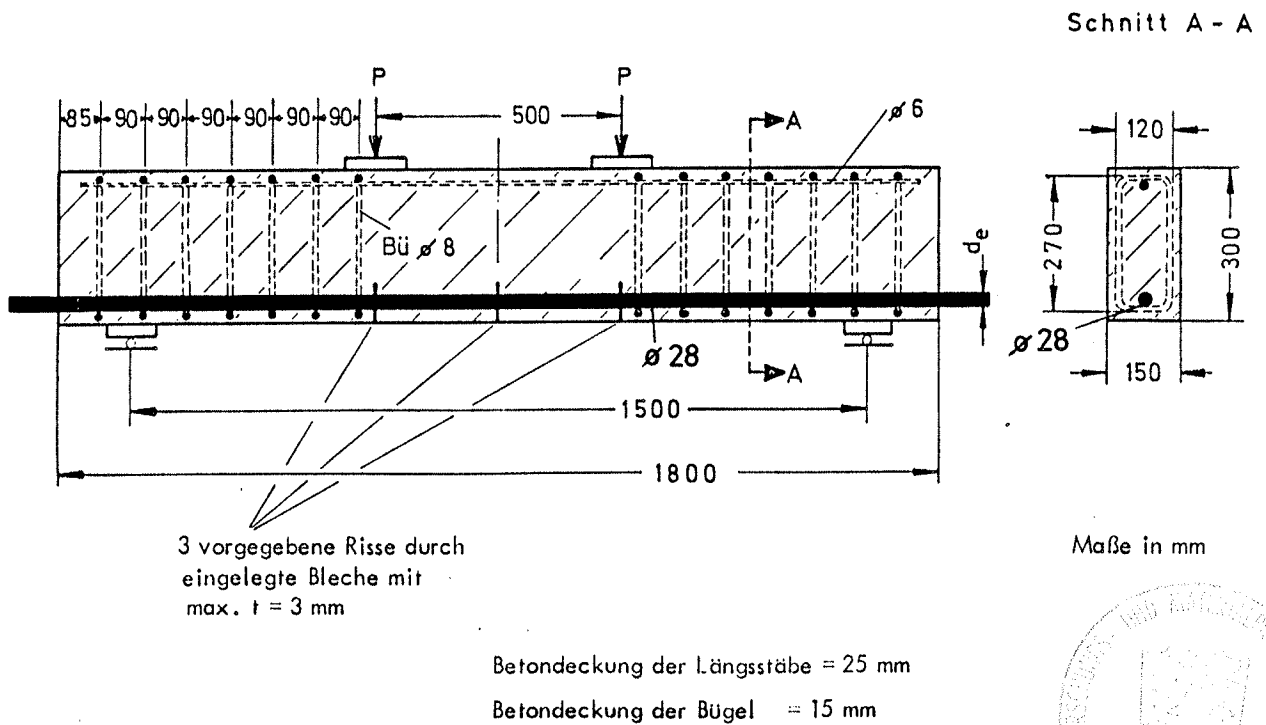
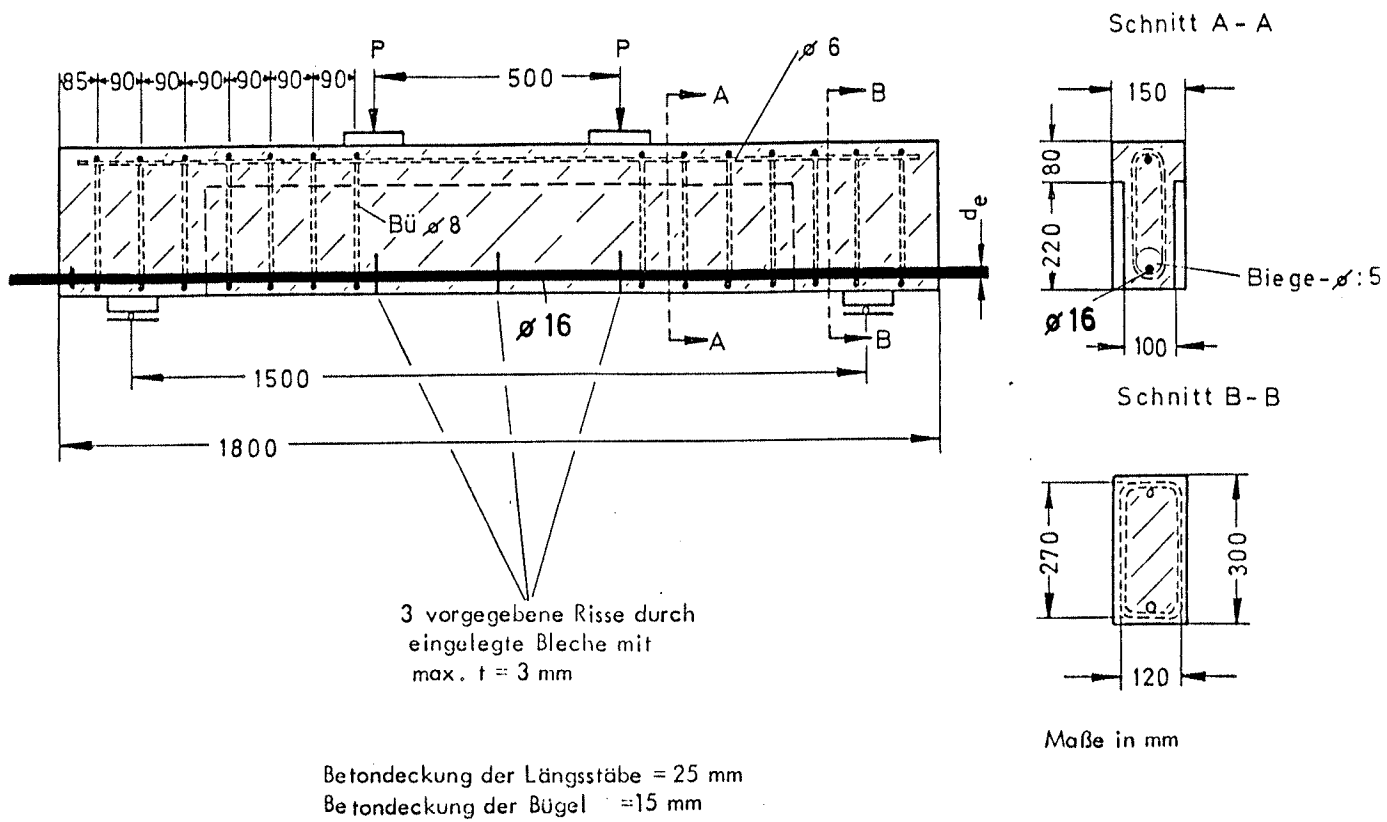


Bild 1 . BALKENARTIGE VERSUCHSKÖRPER FÜR DIE PRÜFUNG VON GERADEN, EINBETONIERTE BETONSTÄHLEN

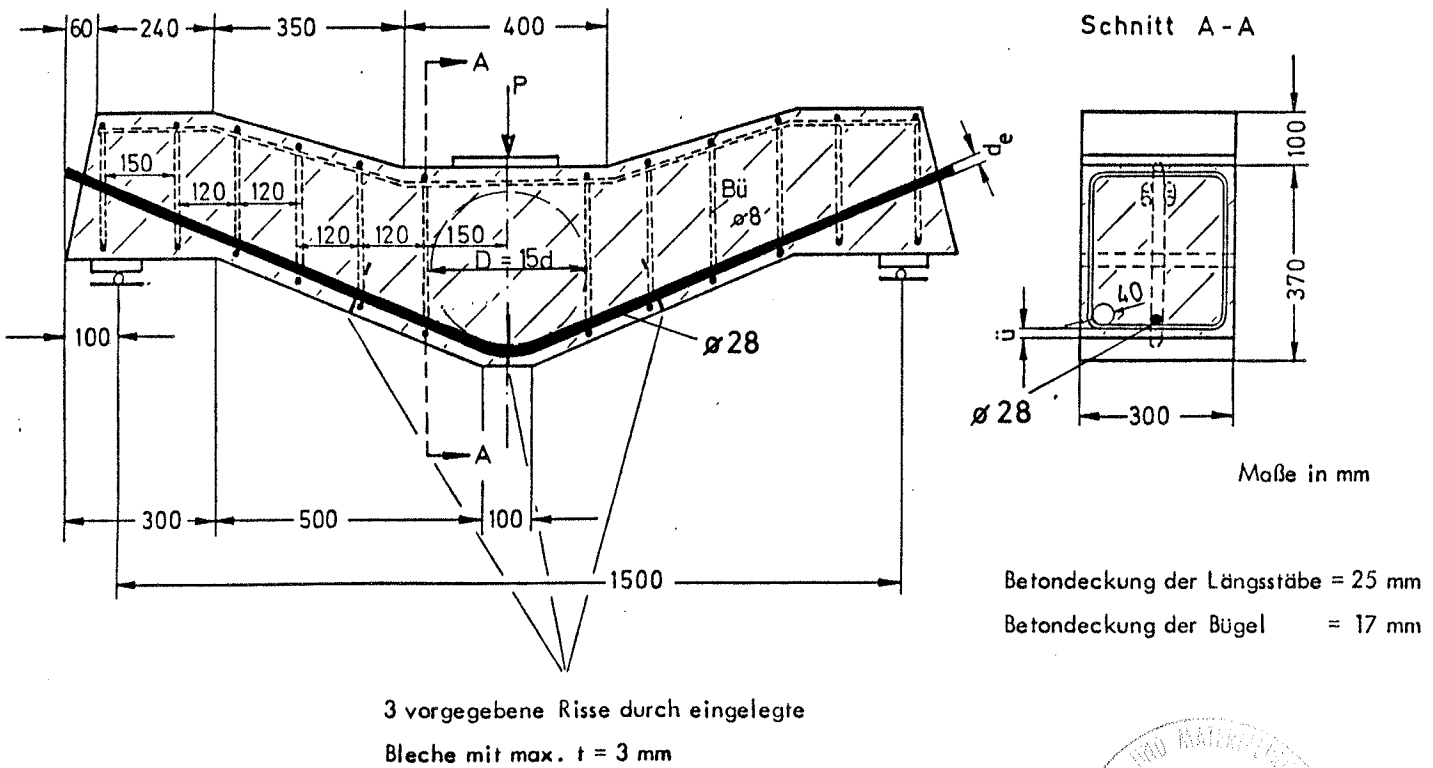
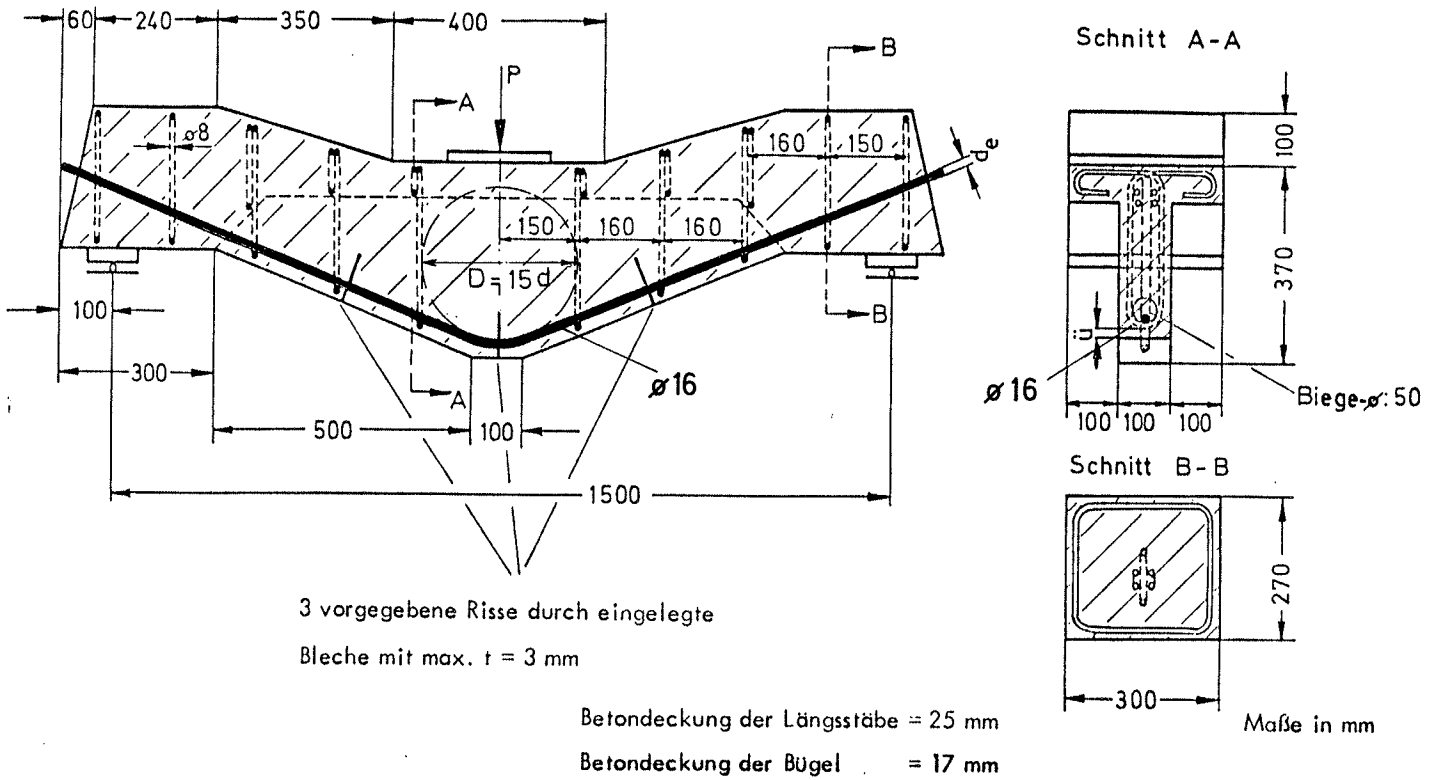


Bild 2 . BALKENARTIGE VERSUCHSKÖRPER FÜR DIE PRÜFUNG VON GEBOGENEN, EINBETONIERTE BETONSTÄHLEN



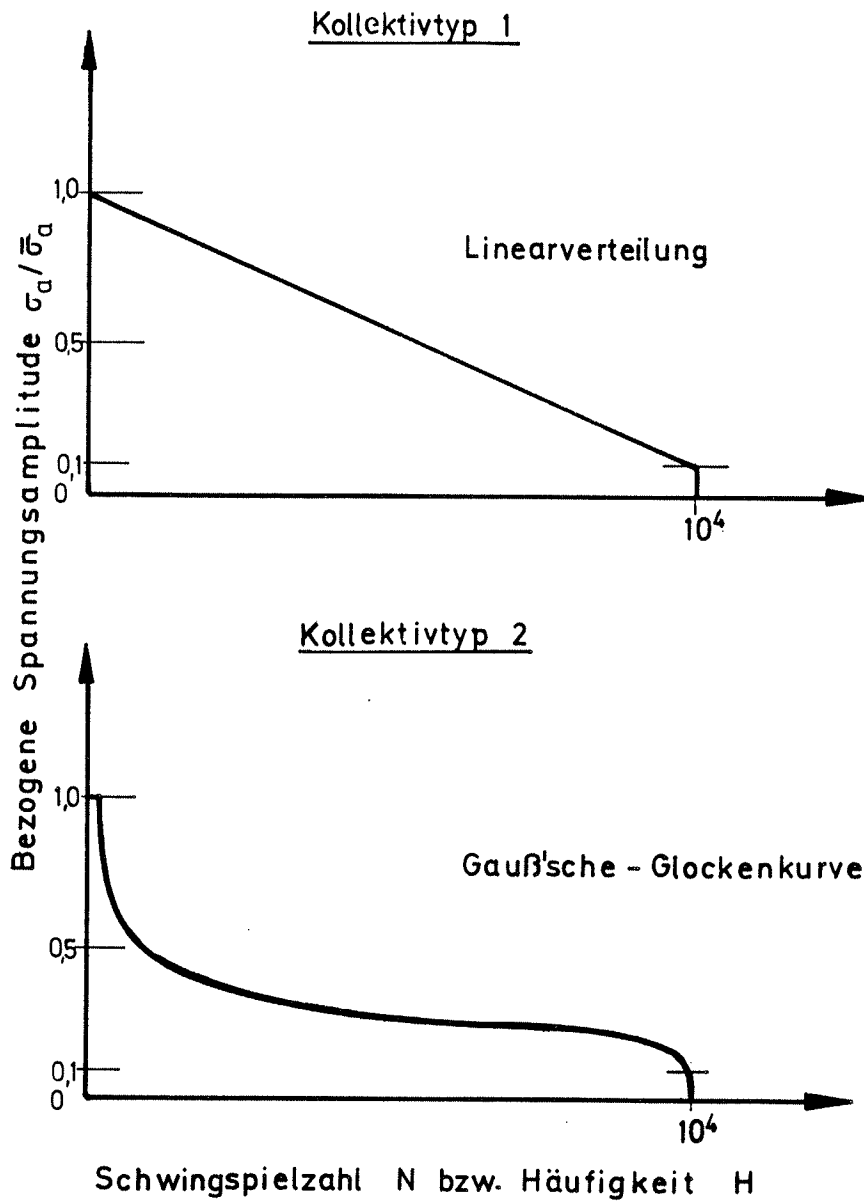
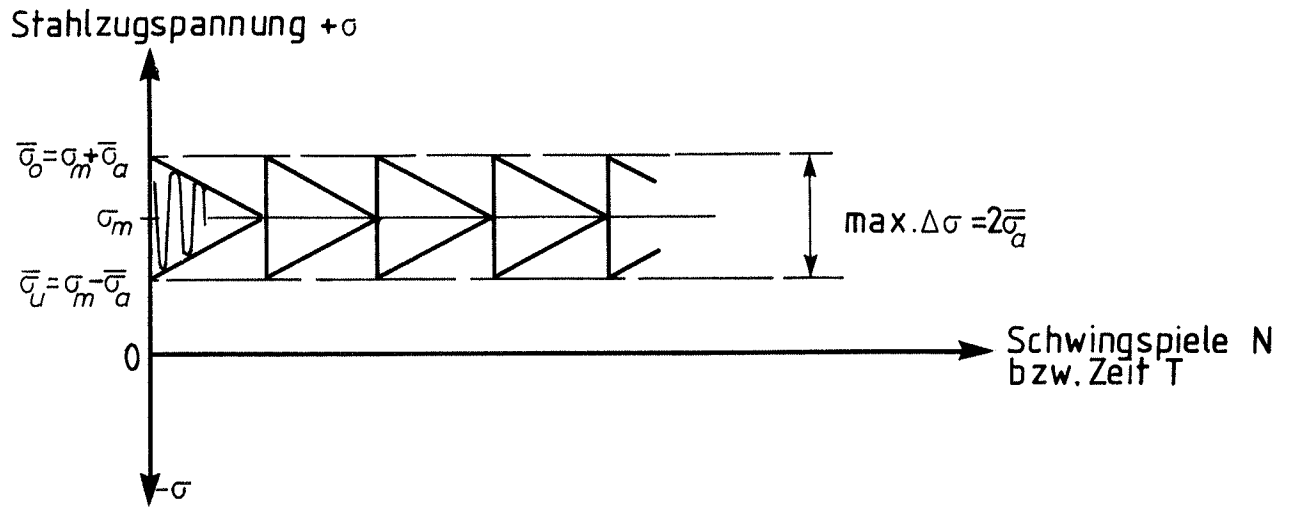
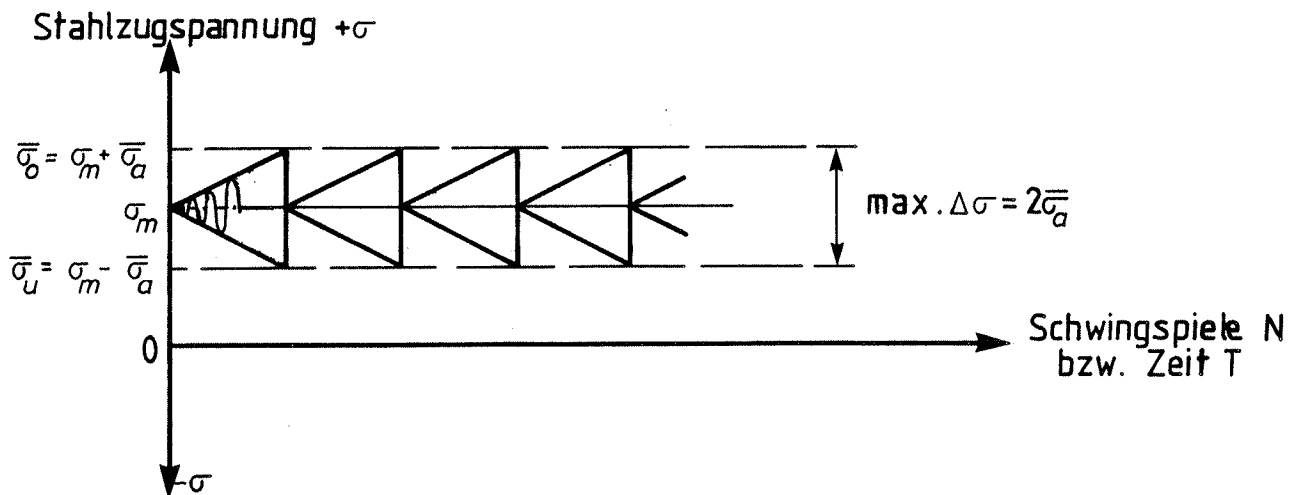


Bild 3 . FÜR DIE PROGRAMM-VERSUCHE VERWENDETE KOLLEKTIVFORMEN





Funktion nach Kollektivtyp 1 (Amplitude fallend)

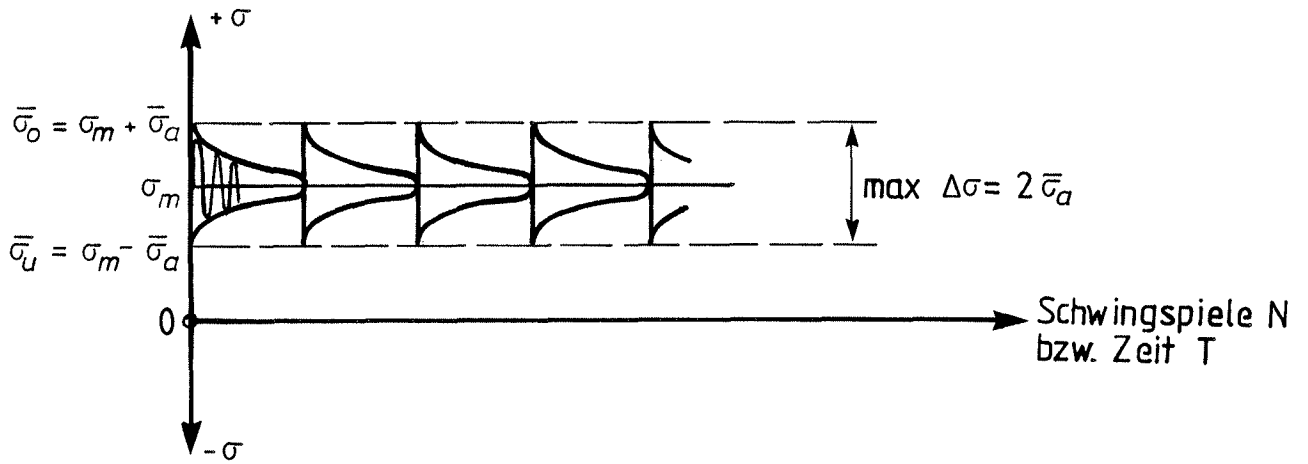


Funktion nach Kollektivtyp 1 (Amplitude steigend)

Bild 4 . BELASTUNGSFUNKTIONEN DER PROGRAMM-VERSUCHE

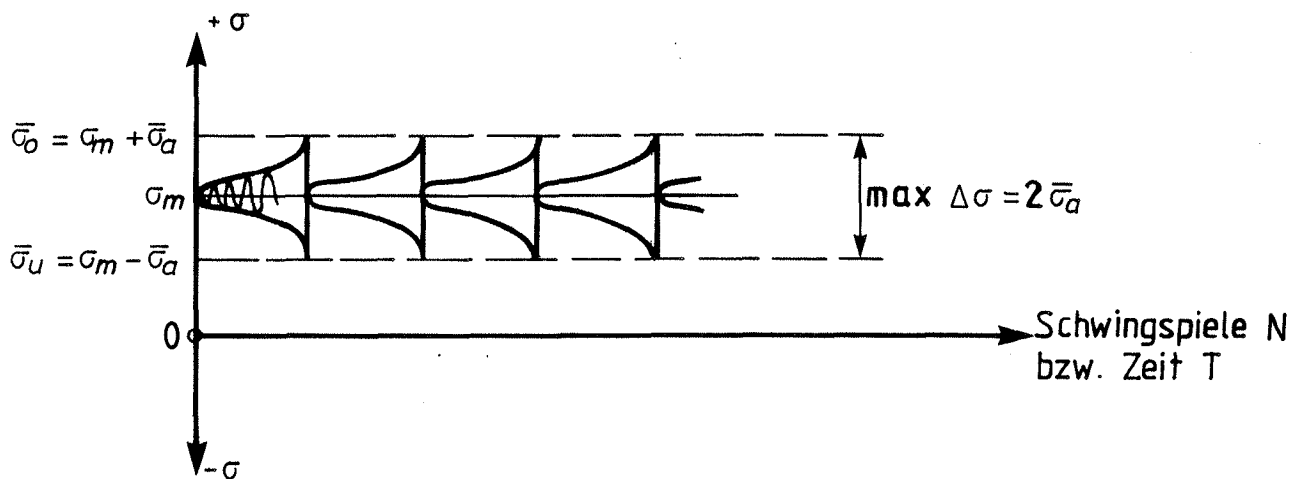


Stahlzugspannung



Funktion nach Kollektivtyp 2 (Amplitude fallend)

Stahlzugspannung



Funktion nach Kollektivtyp 2 (Amplitude steigend)



SCHLÜSSEL ZUR BEZEICHNUNG DER VERSUCHSKÖRPER

E = Einstufenversuch

P = Programmversuch

16 = Betonstahl \varnothing 16 mm28 = Betonstahl \varnothing 28 mm

RK = Betonstahl 420 K (III K)

RU = Betonstahl 420 U (III U)

RS = Betonstahl 500 S (IV S)

Beispiel: Versuchskörper E 16 RS 1 = Balken Nr. 1 mit Betonstahl IV S (500 S), Durchmesser 16 mm, geprüft im Einstufenversuch

SCHLÜSSEL ZUR BRUCHKENNZEICHNUNG

D = Durchläufer

d.R. = duktiler Restbruch

s.R. = spröder Restbruch

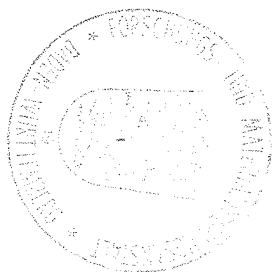
x = Bruch im Krümmungsbereich

 \bar{x} = Bruch außerhalb des Krümmungsbereiches

Zusammenstellung 2
der ergänzenden Programmversuche im Zeitfestigkeitsbereich mit
Kollektivtyp 1

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	max. Schwing- breite im Kollektiv 1 max. $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, ¹⁾ Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen
P 16 RU 1	gerade	1	400	272 000	d.R.	-
P 28 RK 1	gerade	4	380	701 280	d.R.	-
P 16 RU 1	gebogen	1	450	102 060	\bar{x} - d.R.	-
P 16 RK 3	gebogen	3	450	143 050	x - d.R.	-
P 28 RK 1	gebogen	4	490	(58 390)	-	Beton in der Druckzone ver- sagt

- 1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8
 2) siehe Anlagen 3 und 4
 3) siehe Anlage 2



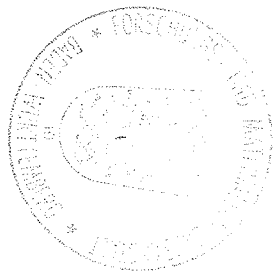
Zusammenstellung 3
der ergänzenden Programmversuche im Zeitfestigkeitsbereich mit
Kollektivtyp 2

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	max. Schwing- breite im Kollektiv 2 max. $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, ¹⁾ Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen
P 16 RK 2	gerade	3	420	2 000 000	D	-
P 28 RU 2	gerade	2	410	2 000 000	D	-
P 28 RU 1	gebogen	2	450	954 520	\bar{x} - s.R.	-
P 28 RK 4	gebogen	4	460	(116 260)	-	Beton in der Druckzone versagt

1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8

2) siehe Anlagen 3 und 4

3) siehe Anlage 2



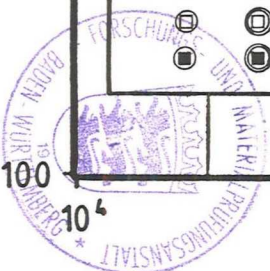
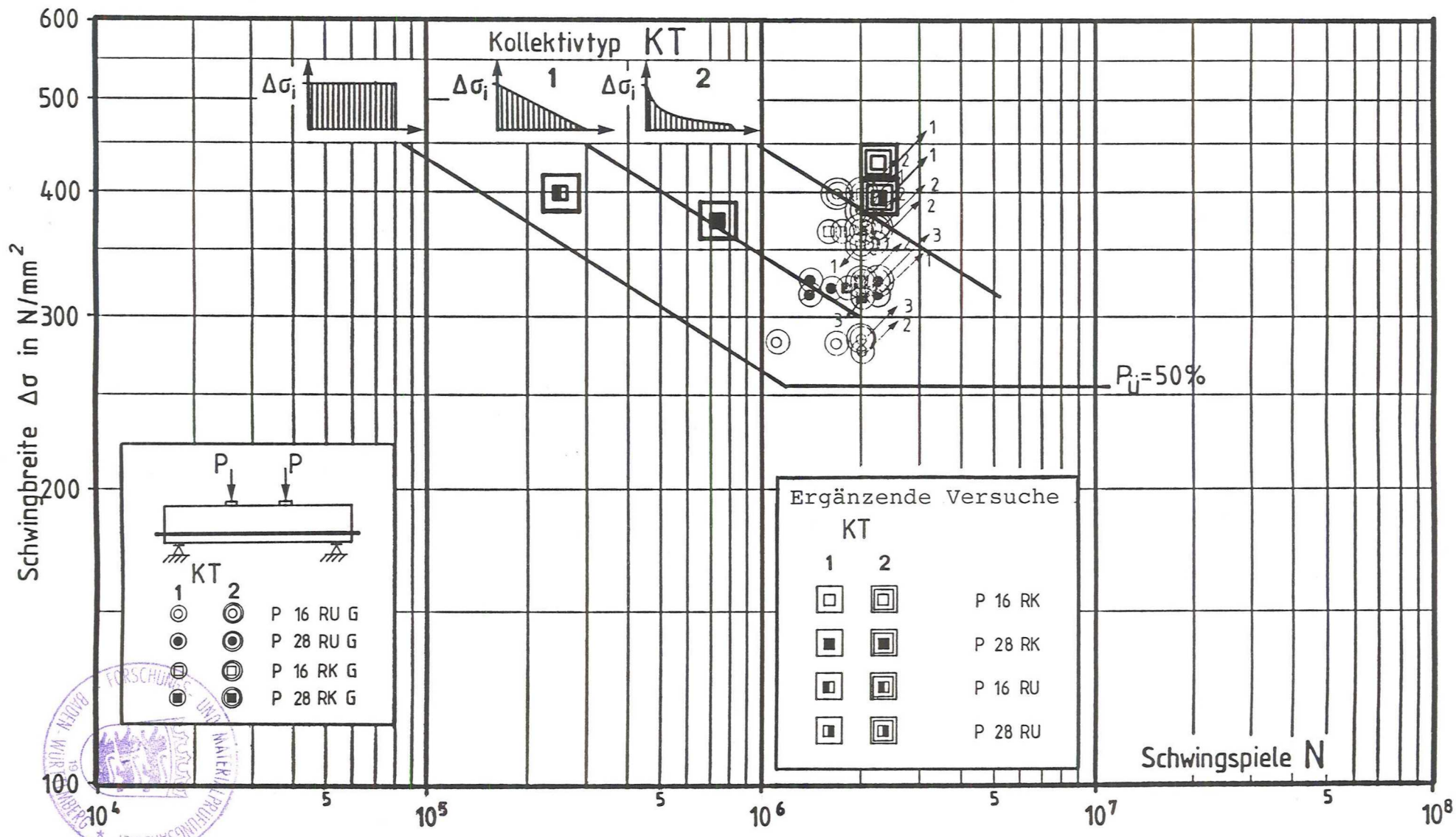


Bild 6 . ERGEBNISSE DER ERGÄNZENDEN PROGRAMM-VERSUCHE MIT GERADEM BETONSTAHL III

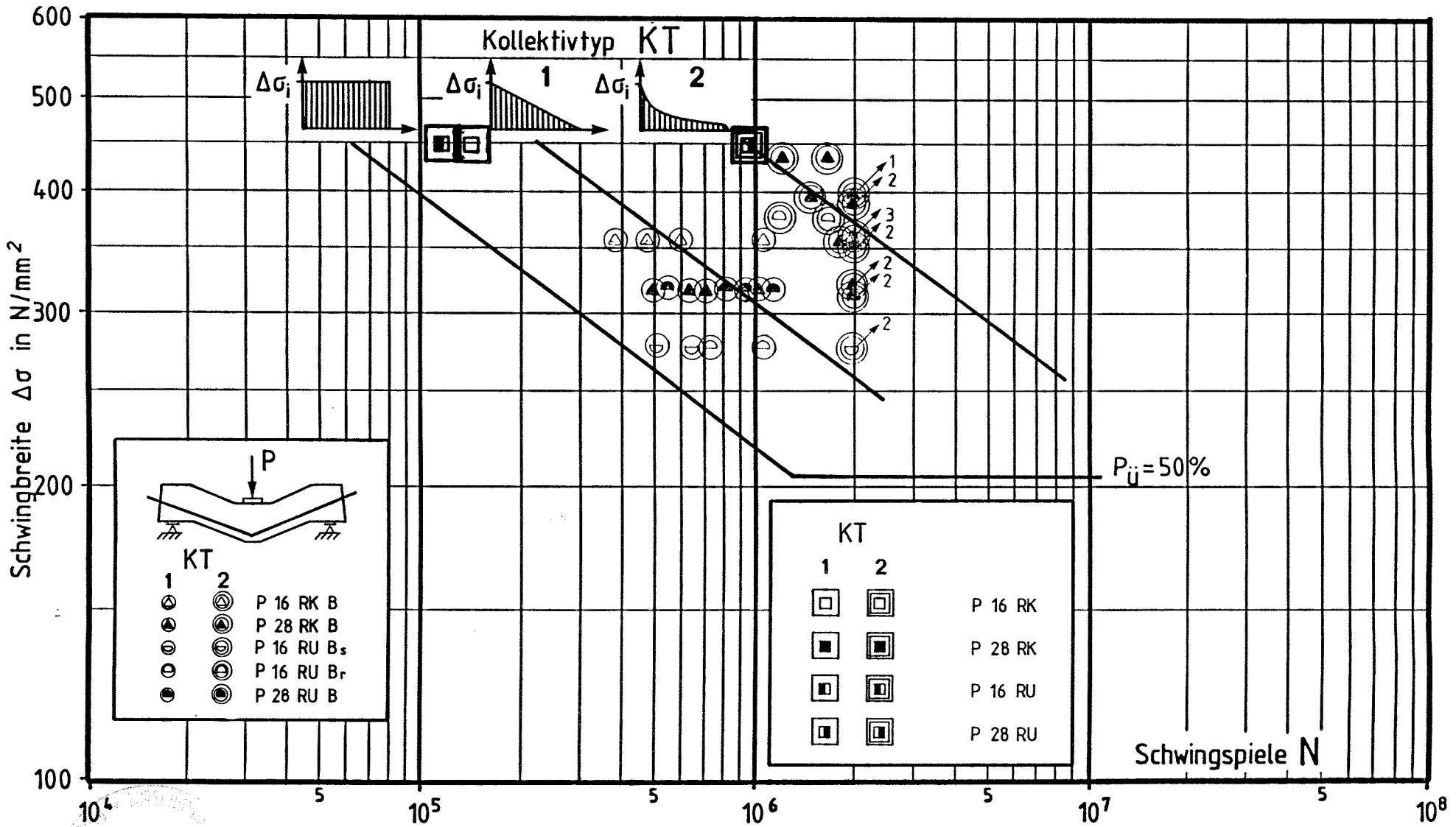
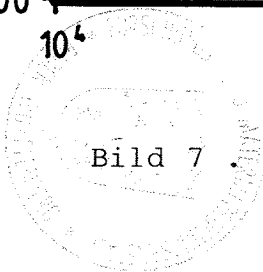


Bild 7 . ERGEBNISSE DER ERGÄNZENDEN PROGRAMM-VERSUCHE MIT GEBOGENEM BETONSTAHL III



Zusammenstellung 4
 der Programmversuche mit fallender Beanspruchungsamplitude mit
 Kollektivtyp 1

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	max. Schwing- breite im Kollektiv 1 max. $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, ¹⁾ Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen
P 16 RK 3	gerade	3	400	1 052 210	x - d.R.	-
P 28 RK 2	gebogen	4	450	288 320	\bar{x} - d.R.	-

- 1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8
 2) siehe Anlagen 3 und 4
 3) siehe Anlage 2



Zusammenstellung 5
der Programmversuche mit fallender Beanspruchungsamplitude mit
Kollektivtyp 2

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	max. Schwing- breite im Kollektiv 2 max. $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, ¹⁾ Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen 4)
P 28 RK 3	gerade	4	400	-	-	4)
P 28 RK 4	gerade	4	400	2 000 000	D	-
P 16 RK 1	gebogen	3	450	927 040	x - d.R.	-

- 1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8
- 2) siehe Anlagen 3 und 4
- 3) siehe Anlage 2
- 4) Zerstörung des Versuchskörpers durch Defekt in der Versuchseinrichtung



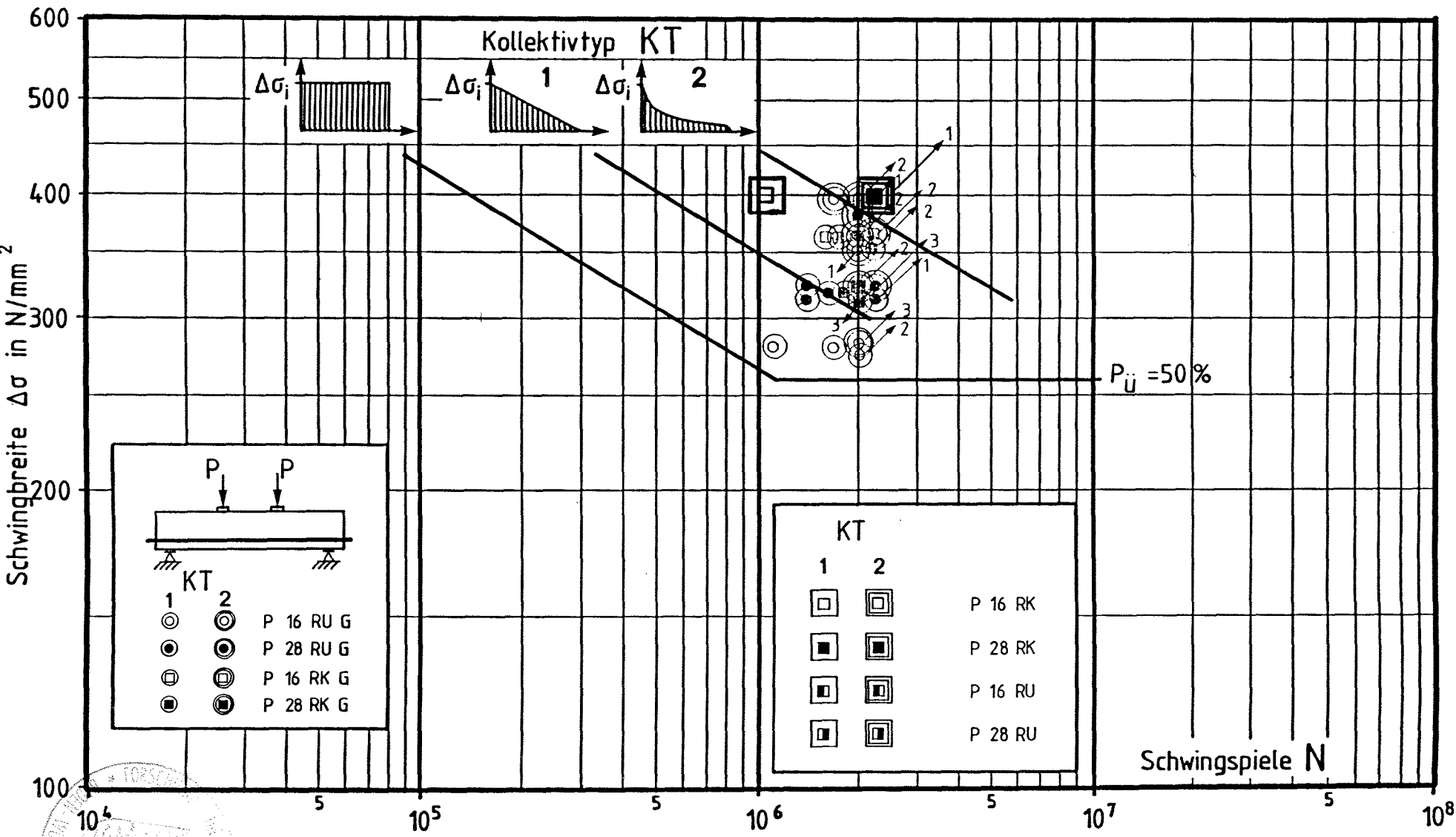
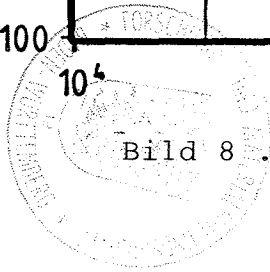


Bild 8. ERGEBNISSE DER PROGRAMM-VERSUCHE MIT FALLENDER BEANSPRUCHUNGSSAMPLITUDE BEI GERADEM BETONSTAHL III



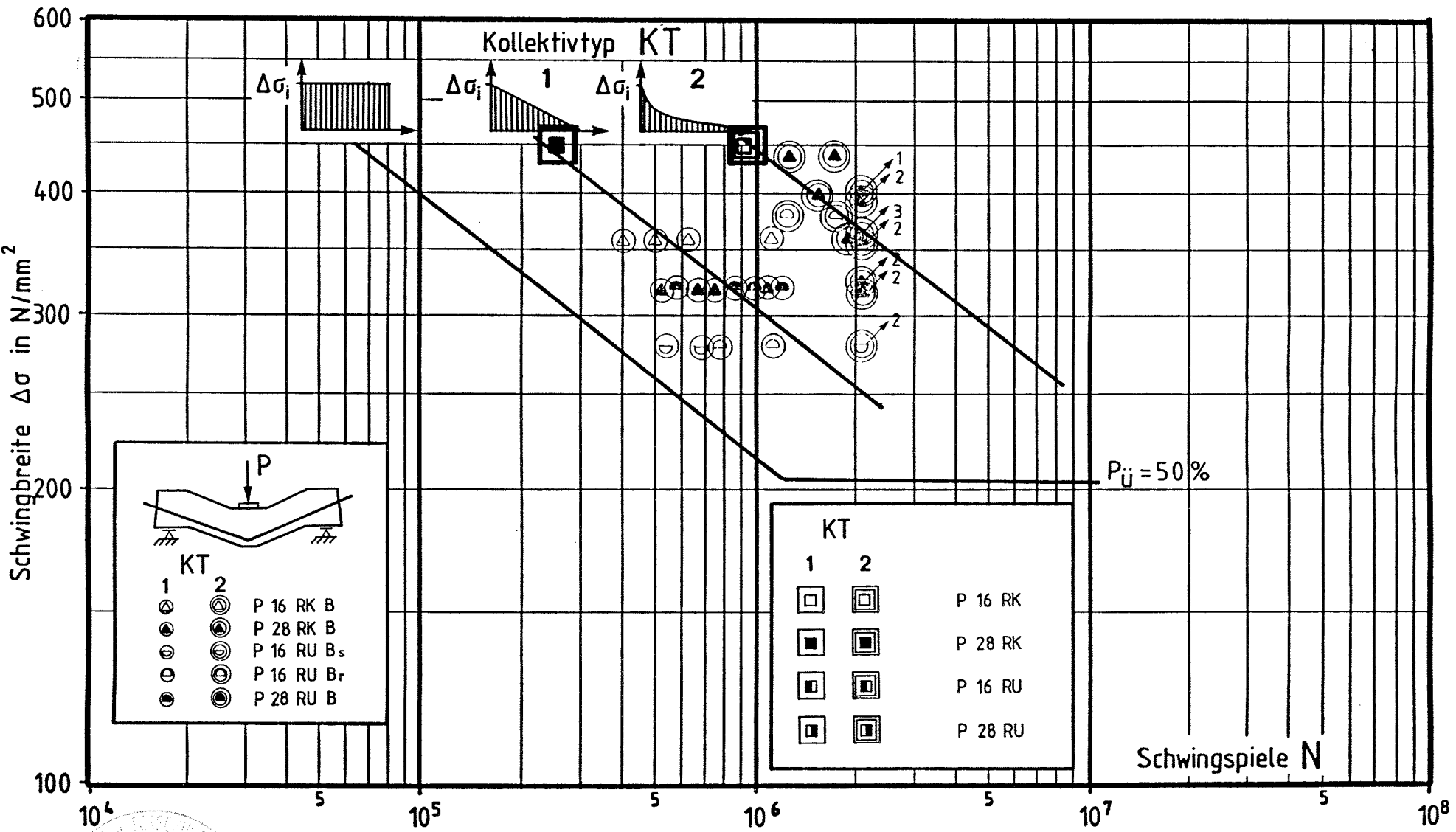
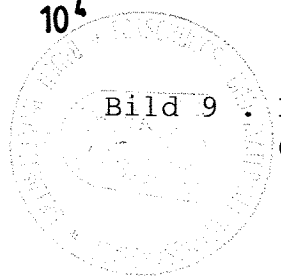


Bild 9 . ERGEBNISSE DER PROGRAMM-VERSUCHE MIT FALLENDER BEANSPRUCHUNGSMPLITUDE MIT GEBOGENEM BETONSTAHL III



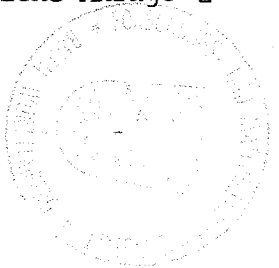
Zusammenstellung 6
der Programmversuche mit geändertem Teilfolgeumfang mit
Kollektivtyp 1

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	max. Schwing- breite im Kollektiv 1 max. $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, ¹⁾ Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen
P 16 RK 1	gerade	3	320	2 000 000	D	-
P 28 RK 2	gerade	4	320	1 547 950	x - d.R.	-
P 16 RK 2	gebogen	3	320	683 690	x - d.R.	-
P 28 RK 3	gebogen	4	320	946 000	x - d.R.	-

1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8

2) siehe Anlagen 3 und 4

3) siehe Anlage 2



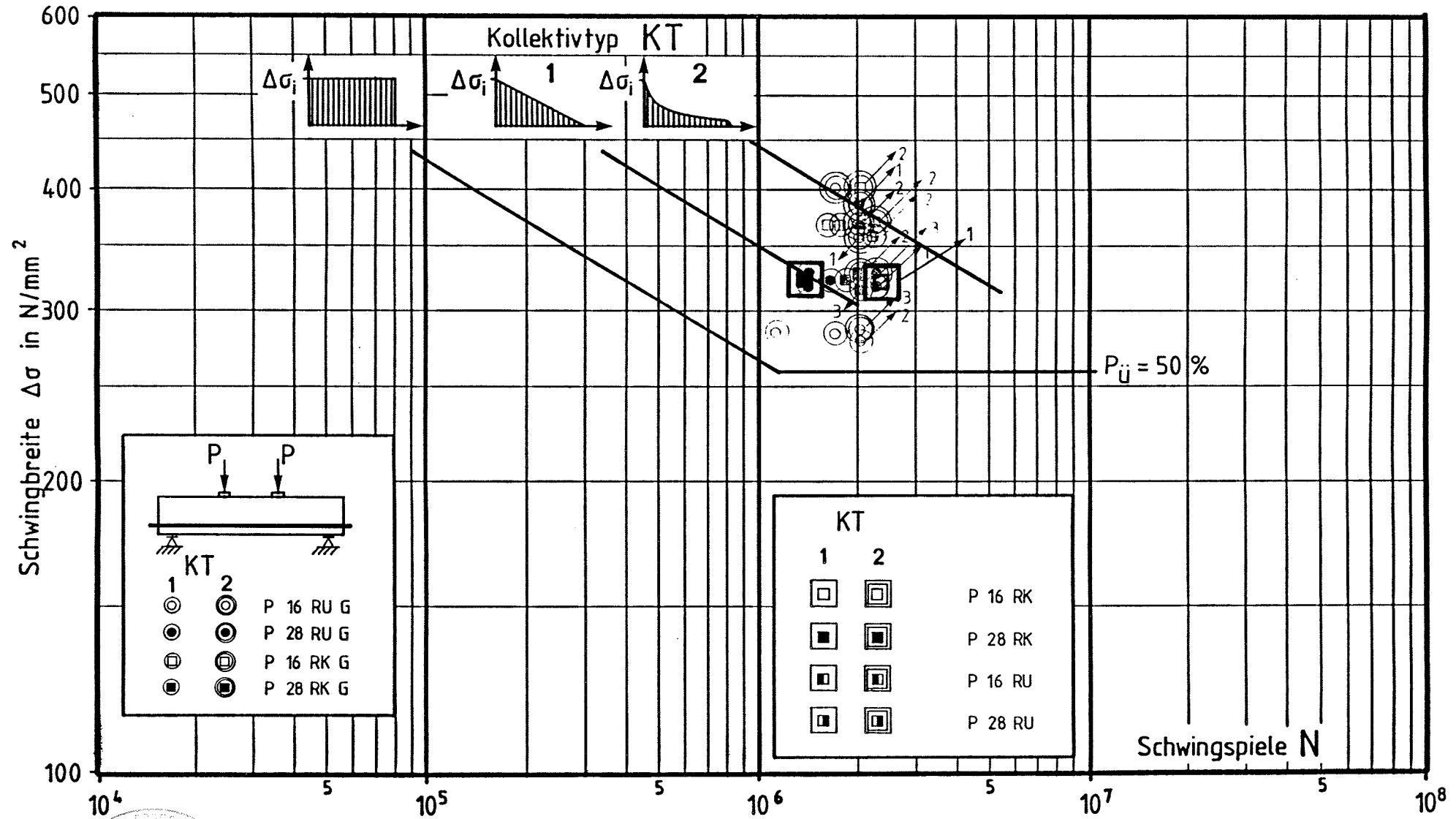


Bild 10 . ERGEBNISSE DER PROGRAMM-VERSUCHE MIT GEÄNDERTEM (vergrößertem) TEILFOLGEUMFANG BEI GERADEM BETONSTAHL III



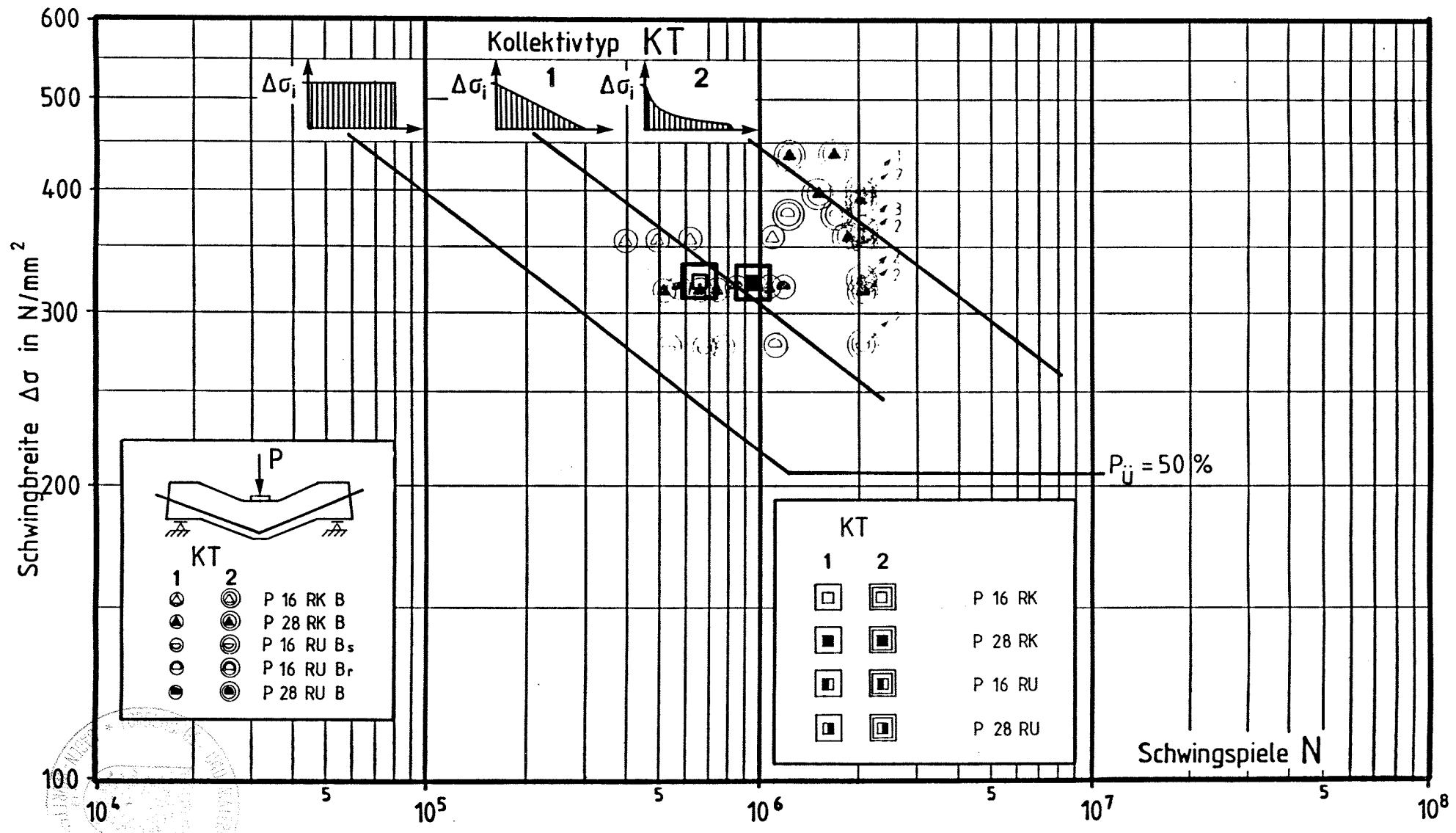


Bild 11 . ERGEBNISSE DER PROGRAMM-VERSUCHE MIT GEÄNDERTEM (vergrößertem) TEILFOLGEUMFANG BEI GEBOGENEM BETONSTAHL III

Zusammenstellung 7
der Versuchsergebnisse aus den Einstufenversuchen mit BSt IV S

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	Schwing- breite $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, 1) Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen
E 16 RS 2	gerade	5	400	246 430	d.R.	-
E 28 RS 2	gerade	6	380	99 400	-	-
E 16 RS 2	gebogen	5	450	74 760	x - d.R.	-
E 28 RS 3	gebogen	6	450	98 930	-	Versagen des Betons
E 28 RS 4	gebogen	6	450	78 860	-	Versagen des Betons
E 28 RS 5	gebogen	6	370	75 310	\bar{x} - d.R.	-

1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8

2) siehe Anlagen 3 und 4

3) siehe Anlage 2



Zusammenstellung 8
der Versuchsergebnisse aus den Programmversuchen mit BSt IV S mit
Kollektivtyp 1

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	max. Schwing- breite im Kollektiv 1 max. $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, ¹⁾ Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen
P 16 RS 1	gerade	5	380	1 370 730	d.R.	-
P 28 RS 3	gerade	6	380	470 050	d.R.	-
P 28 RS 4	gerade	6	410	415 160	-	Versagen des Betons
P 16 RS 3	gebogen	5	450	171 180	x - d.R.	-
P 28 RS 2	gebogen	6	450	395 100	x - d.R.	-

1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8

2) siehe Anlagen 3 und 4

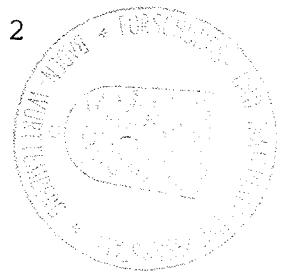
3) siehe Anlage 2



Zusammenstellung 9
 der Versuchsergebnisse aus den Programmversuchen mit BSt IV S mit
 Kollektivtyp 2

Versuchskörper 1)	Probenform 2)	Material-Nr. 3)	max. Schwing- breite im Kollektiv 2 max. $\Delta\sigma$ N/mm ²	Erreichte Schwingspiele N	Bruchlage, ¹⁾ Bruchkenn- zeichnung	Bemerkungen
P 16 RS 3	gerade	5	420	2 000 000	D	-
P 28 RS 1	gerade	6	420	2 000 000	D	-
P 16 RS 1	gebogen	5	450	1 076 290	x - d.R.	-
P 28 RS 1	gebogen	6	450	1 919 000	x - d.R.	-

1) Schlüssel zur Versuchskörperbezeichnung und sonstige Zeichenerklärungen siehe Anlage 8
 2) siehe Anlagen 3 und 4
 3) siehe Anlage 2



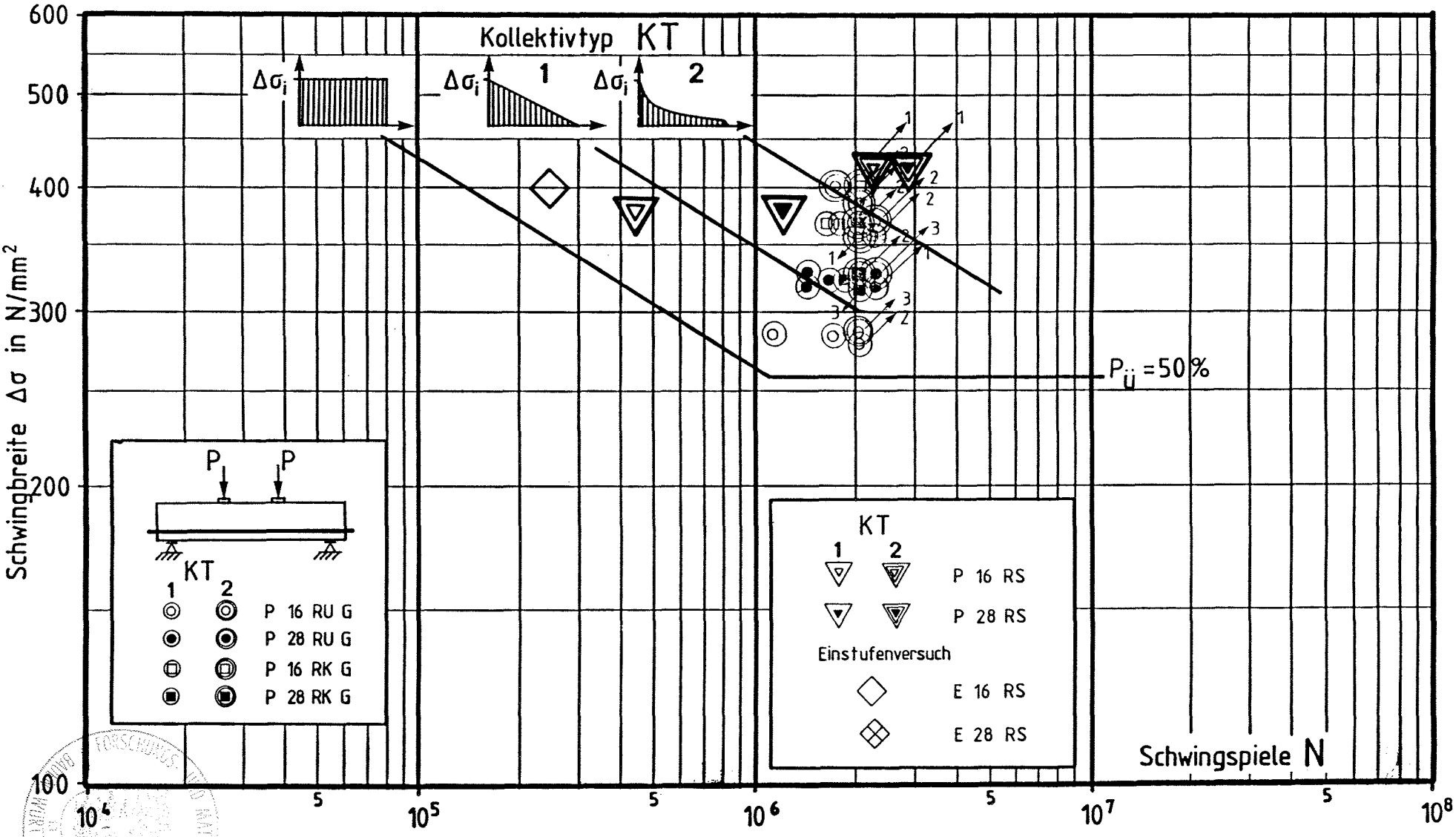
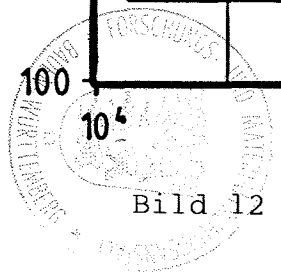


Bild 12 . ERGEBNISSE DER EINSTUFEN- UND PROGRAMM-VERSUCHE MIT GERADEM BETONSTAHL IV S (RS)



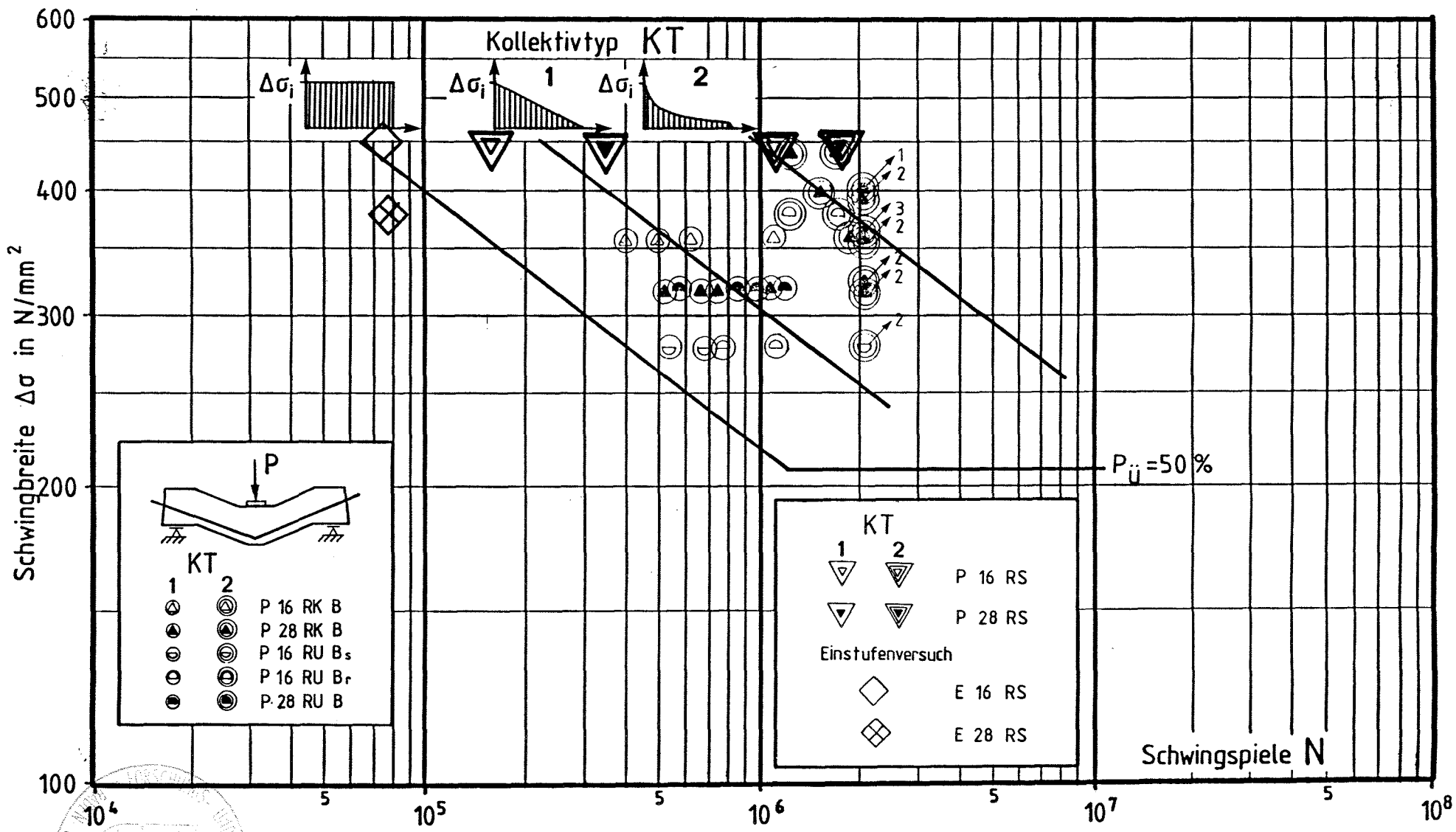
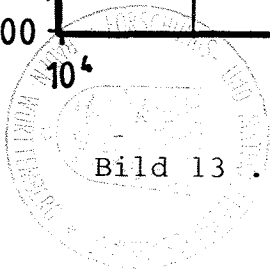


Bild 13 . ERGEBNISSE DER EINSTUFEN- UND PROGRAMM-VERSUCHE MIT GEBOGENEM BETONSTAHL IV S (RS)



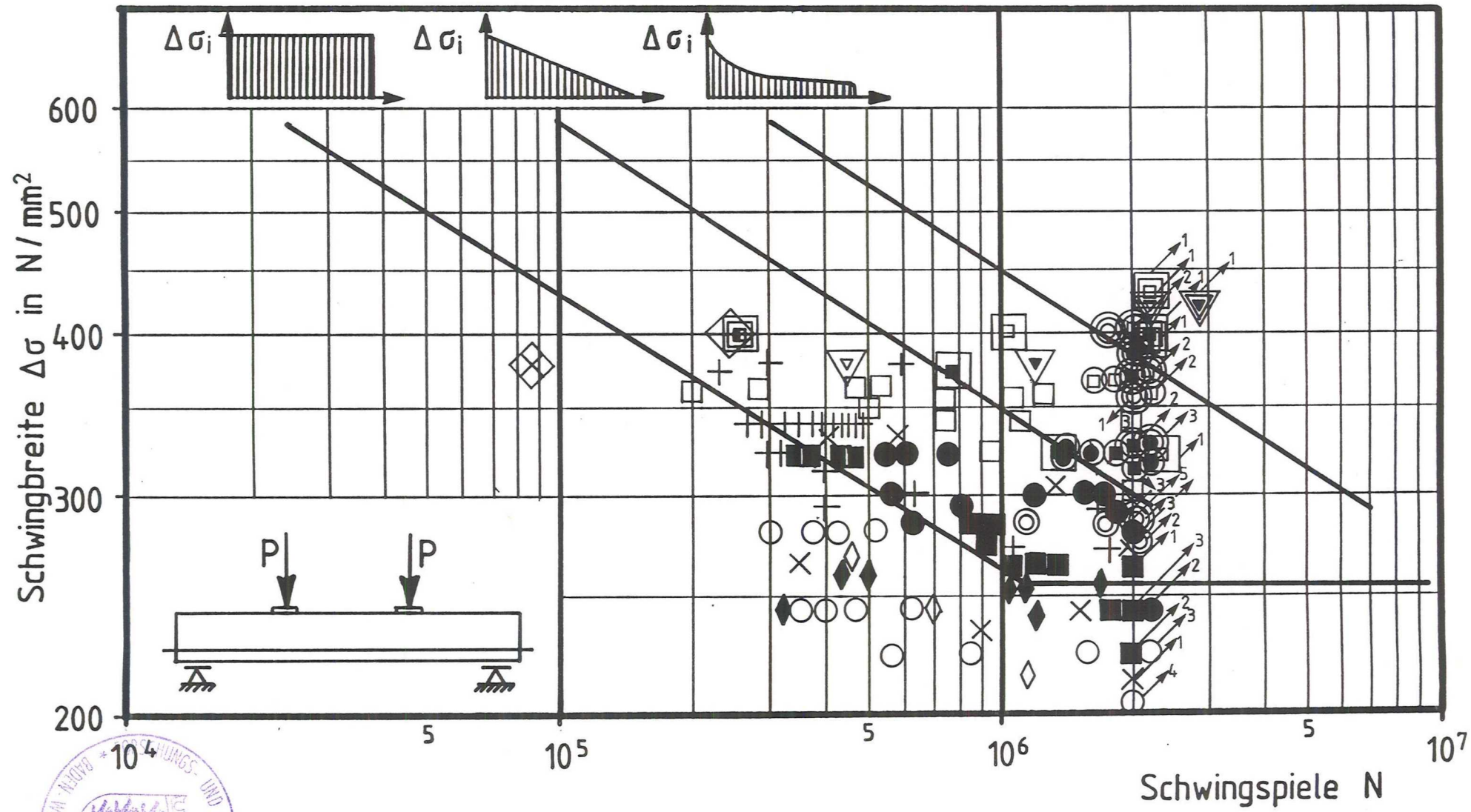


Bild 14 . GESAMTHEIT DER ERGEBNISSE AUS SCHWINGFESTIGKEITSVERSUCHEN AN GERADEN BETONSTÄHLEN

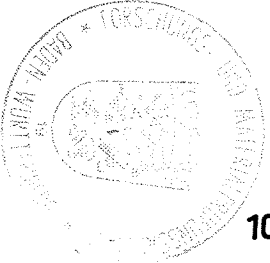
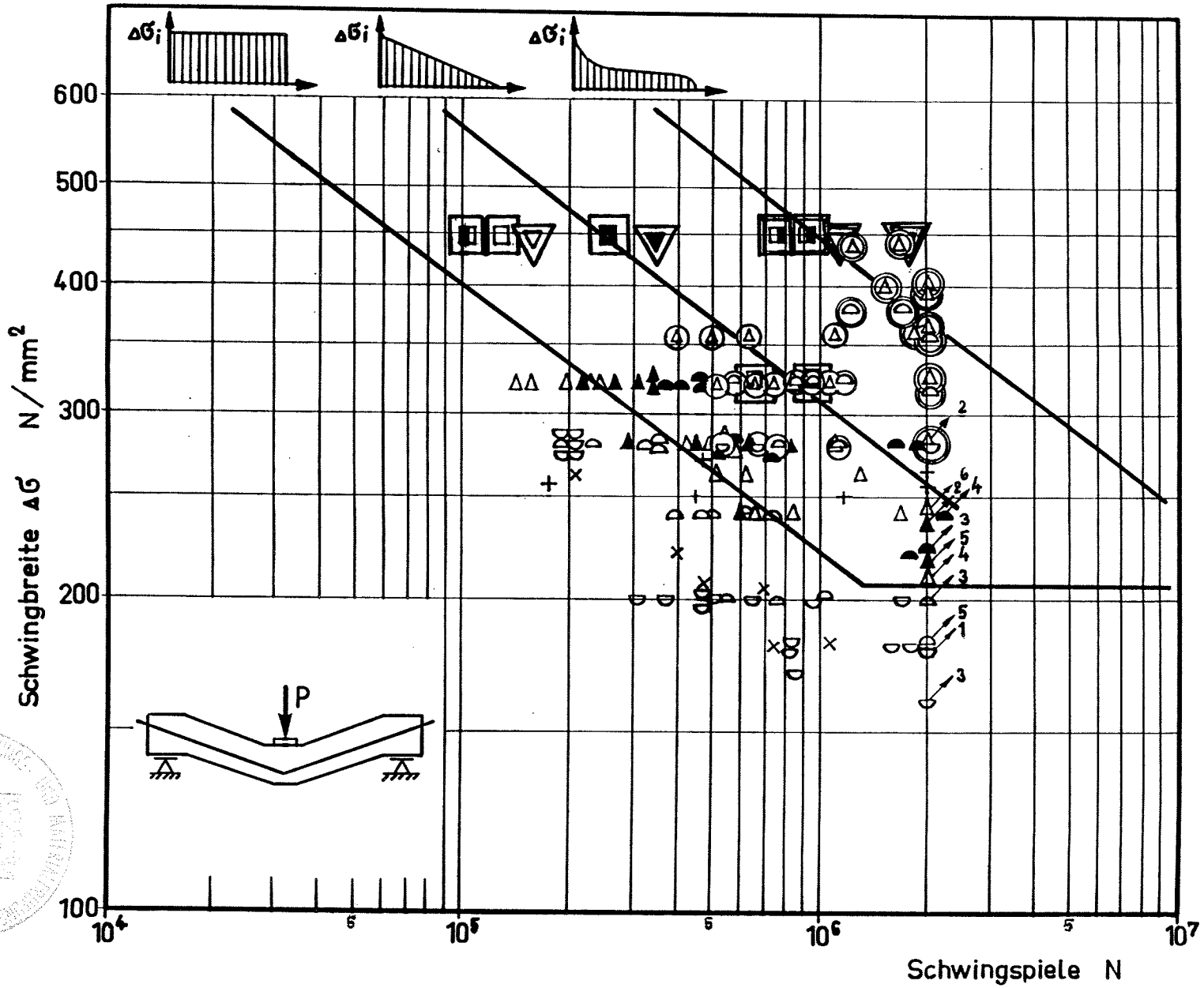


Bild 15 . GESAMTHEIT DER ERGEBNISSE AUS SCHWINGFESTIGKEITSVERSUCHEN AN GEBOGENEN BETONSTÄHLEN

Summary

The aim of this research project was to complete the fundamental findings of the former investigation "Fatigue Behaviour of Reinforcing Steel under Realistic Loading- and Environmental Conditions" (published in Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 374, 1986) by means of additional and supplement tests in order to have more data for a statistically better covered base for statements. Moreover, supposed secondary influences and effects on the fatigue behaviour were investigated by some special joining tests.

In detail, the former S-N-curves were completed by additional tests in the fatigue life range of about $10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^5$ cycles. Some other tests were carried out to clarify possible partial load sequence influences on the fatigue life: the effect of the length of standardized partial sequences as well as the effect of the character of standardized partial sequences (increasing or decreasing load amplitudes). Finally, the recently developed new reinforcing steel grade IV S was tested in order to compare the results with those of the former tests on reinforcing steel grade III.

It can be concluded that the present results confirm the former fundamental findings on the fatigue behaviour of reinforcing steel in a very satisfying way. The results show also that supposed secondary influences caused by different length of partial load sequences and by increasing or decreasing load amplitudes within the partial sequences are not significant.

Due to the extensive testing of the reinforcing steel it may be summarized that the calculated S-N-curves are considered now to represent a very comprehensive and reliable characterization of the fatigue behaviour of reinforcing steel.