

ISSN 0938-5553  
ISBN 3-89429-100-1

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

# **Forschungsbericht 179**

## **Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S, im Bereich negativer Biegemomente**

Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Gebhard Hees  
zum 65. Geburtstag gewidmet

von Dr.-Ing. Heinz Eifler

80 Seiten, 37 Abbildungen, 8 Tafeln

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45  
Telefon (030) 8104-1      Telex 183 261 bamb d  
Telefax (030) 811 20 29      Teletex 2 627-308 372 = bamb

Copyright © 1991 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 101110, 2850 Bremerhaven 1  
Telefon (0471) 460 93-95

## **Zum Inhalt**

Bei durchlaufenden Plattenbalken mit Bildung plastischer Gelenke über den Innenstützen kann die Drehfähigkeit dieser Gelenke von der eines Gelenks in einem Rechteckbalken abweichen, da die Dehnung des in der Platte liegenden Stahls durch den großen Betonquerschnitt der Platte erheblich behindert sein kann und andererseits die Tragfähigkeit des schmalen Stegs gegenüber der Biegedruckkraft schnell erschöpft ist. Weiterhin wird die schlechtere Verbundqualität der jetzt oben liegenden Stähle die Drehfähigkeit des plastischen Gelenks beeinflussen. Zur experimentellen Bestimmung der Drehfähigkeit sind fünf Stahlbeton-Plattenbalken mit Platte in der Zugzone und zum Vergleich zwei Balken mit Rechteckquerschnitt geprüft worden. Zusätzlich wurde in Tastversuchen an 0,7 m langen Kleinbalken der Einfluß des Durchmessers von Bewehrungsstählen mit  $d_s \leq 10$  mm untersucht. Rechnerisch ermittelte Drehfähigkeiten bilden zum Abschluß der Arbeit eine Parameterstudie mit den Parametern Balkenquerschnittsform, Lage der Bewehrung, Stahlsorte, Bewehrungsgrad und Lastbild.

## **The rotational capacity of plastic hinges in reinforced concrete T-beams, reinforced by a steel with a defined yield point in the area of hogging moments**

In continuous beams with T-cross-section the rotational capacity of those plastic hinges, which are located at the inner supports, may be less than the rotational capacity of hinges in a rectangular beam because the strain in the reinforcement located in the slab may be hindered considerably by the large concrete cross-section of the slab, also the pressure force by bending exceeds easily the bearing capacity of the narrow web. Furthermore the weakened bond of the reinforcement, now in upper concreting level, influences the rotational capacity of a plastic hinge. In experiments, five reinforced concrete T-beams, slab stressed by tensile force, and two rectangular beams were tested. In addition, by way of trial small beams of 0.70 m length were tested to investigate the influence of the diameter of reinforcement bars  $d_s \leq 10$  mm. Finally, a parameter study indicates how rotational capacity is dependent on the extent of reinforcement, the shape of the beam section, the type of steel, the concreting level of the reinforcement and the manner of loading.

## **Dank**

Dank sagen möchte ich meinen Kollegen in der Fachgruppe 2.2 "Tragfähigkeit der Baukonstruktionen" für viele Anregungen, besonders aber den Herren Dipl.-Ing. Barner, Stoeck und Theisel für ihre wertvolle Unterstützung bei der Entwicklung der Prüfeinrichtung, wie auch bei der Ausführung und Auswertung der Versuche. Weiterhin danke ich Frau Wuttig für die sorgfältige Gestaltung des Textes.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	9
2. Versuchsprogramme, Versagenskriterien	11
3. Werkstoffkennwerte	13
3.1 Beton	13
3.2 Betonstahl	15
3.2.1 Bewehrung der 4 m langen Balken	15
3.2.2 Bewehrung der Kleinbalken mit 0,7 m Länge	15
3.2.3 Beschreibung der Stähle, mechanische Kennwerte	15
4. Versuche an Rechteckbalken und Plattenbalken mit 4 m Länge	17
4.1 Probekörper	17
4.2 Versuchsdurchführung	20
4.2.1 Auflagerung und Belastung der Balken	20
4.2.2 Meßprogramm	22
4.2.3 Versuchsablauf	23
4.3 Versuchsergebnisse	24
4.3.1 Darstellung der Versuchsergebnisse	24
4.3.2 Vergleichende Betrachtung der Versuchsergebnisse	40
5. Tastversuche an Kleinbalken mit 0,7 m Länge	47
5.1 Begründung der Versuche	47
5.2 Probekörper	48
5.3 Versuchsdurchführung	50
5.4 Versuchsergebnisse	50
5.4.1 Darstellung der Versuchsergebnisse	50
5.4.2 Kleinbalken P4, P6, P8 und P10	52
5.4.3 Kleinbalken P4K, P4U, P6K und P6U	53
6. Rechnerische Ermittlung der Drehfähigkeit	55
6.1 Rechenmodell	55
6.2 Erweiterung des Rechenmodells für Rechteckbalken und für Stähle mit ausgeprägtem Lüdersbereich	56
6.3 Nachrechnung der Versuche	58
6.4 Parameterstudie	60
7. Zusammenfassung und gewonnene Erkenntnisse	69
Schrifttum	72

## Anhang

	Seite
Bild A1: Sieblinie des Zuschlags	73
Tafel A1: Kennwerte des Festbetons	73
Tafel A2: Prismendruckfestigkeit und statischer Druckelastizitätsmodul	74
Tafel A3: Mechanische Kennwerte der Betonstähle	74
Bild A2: Verteilung der gemessenen plastischen Stahldehnungen über die Stablänge bei BSt 500 S	75
Bild A3: $\sigma_s$ - $\xi_s$ -Linie der Betonstähle BSt 500 S	76
Bild A4: $\sigma_s$ - $\xi_s$ -Linie der Betonstähle $d_s = 4$ mm	76
Bild A5: $\sigma_s$ - $\xi_s$ -Linie der Betonstähle $d_s = 6$ mm bzw. $d_s = 6,5$ mm	76

## Bezeichnungen

(soweit nicht im Text erklärt)

### 1. Geometrische Größen

L	Länge eines Balkens
l	Spannweite eines Balkens
b	Balkenbreite
b <sub>0</sub>	Stegbreite eines Plattenbalkens
b <sub>m</sub>	mitragende Plattenbreite eines Plattenbalkens
d	Höhe eines Kleinbalkens bzw. Plattendicke eines Plattenbalkens
d <sub>0</sub>	Höhe eines Plattenbalkens
h	statische Höhe (Abstand zwischen Schwerpunkt der Zugbewehrung und gedrückter Randfaser)
h <sub>Ist</sub>	am Balken gemessene statische Höhe
h <sub>x</sub>	Höhe der Betondruckzone
d <sub>s</sub>	Durchmesser eines Betonstahls
A <sub>s</sub>	Querschnitt der Zugbewehrung
A <sub>s Ist</sub>	durch Wägung bestimmter Istquerschnitt
μ <sub>s</sub>	geometrischer Bewehrungsgrad der Zugbewehrung $\frac{A_s}{b \cdot h} \cdot 100$
ω <sub>2</sub>	mechanischer Bewehrungsgrad der Zugbewehrung $\mu_2 \cdot \frac{R_e}{\sigma_R}$
a <sub>R</sub>	mittlerer Abstand der Biegerisse
l <sub>p</sub>	Länge des Bereichs plastischer Stahldehnungen
b <sub>w</sub>	Breite der Wirkungszone der Bewehrung
d <sub>w</sub>	Höhe der Wirkungszone der Bewehrung
A <sub>bw</sub>	Fläche der Wirkungszone der Bewehrung
b <sub>s</sub>	Verteilungsbreite der Hauptzugbewehrung

### 2. Kennwerte für Festigkeits- und Verformungseigenschaften

β <sub>w</sub>	Würfeldruckfestigkeit des Betons
β <sub>w,14</sub>	Würfeldruckfestigkeit im Alter von 14 Tagen
β <sub>w,28</sub>	Würfeldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen
β <sub>w.Prüf</sub>	Würfeldruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Balkenprüfung
β <sub>R</sub>	Rechenfestigkeit des Betons nach DIN 1045 [1]
β <sub>bZ</sub>	Biegezugfestigkeit des Betons
β <sub>p</sub>	Prismendruckfestigkeit des Betons
E <sub>b</sub>	Elastizitätsmodul des Betons
R <sub>e</sub> (β <sub>s</sub> ) <sup>1</sup>	Streckgrenze des Stahls
R <sub>p0,2</sub> (β <sub>0,2</sub> ) <sup>1</sup>	0,2 % Dehngrenze des Stahls
R <sub>m</sub> (β <sub>Z</sub> ) <sup>1</sup>	Zugfestigkeit des Stahls
A <sub>10</sub> (ε <sub>10</sub> ) <sup>1</sup>	Bruchdehnung des Stahls bei einer Meßstreckenlänge von 10 · d <sub>s</sub>

-----  
<sup>1</sup> Zeichen in (...) nach DIN 1045 [1]

$A_G$	Gleichmaßdehnung des Stahls
$\epsilon_F$	Dehnungszunahme im Lüdersbereich
$E_s$	Elastizitätsmodul des Stahls
$m$	Exponent in der Gleichung

$$\epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + 0,002 \left( \frac{\sigma_s}{R_{p0,2}} \right)^m$$

### 3. Spannungen

$\sigma_b$	Betonspannung
$\sigma_{bm}$	mittlere Betonspannung einer Biegedruckzone
$\alpha_w$	Größenbeiwert der Biegedruckfestigkeit
	$\alpha_w = \sigma_{bm}/\beta_w$
$\sigma_s$	Stahlspannung

### 4. Weg- und Verzerrungsgrößen

$f$	Durchbiegung in Balkenmitte
$w_R$	Rißbreite
$\int_{x=0}^l \epsilon_{s,p} \cdot dx$	gesamter plastischer Dehnweg eines Betonstahls
$\epsilon_b$	Betondehnung
$\epsilon_{bu}$	Betonbruchdehnung
$\epsilon_s$	Stahldehnung
$\epsilon_{s,p}$	plastische Stahldehnung
$\alpha$	Drehung des Balkens am Auflager A
$\beta$	Drehung des Balkens am Auflager B
$\gamma$	Relativdrehung der beiden Balkenenden
$\vartheta$	Drehung des plastischen Gelenks
$\vartheta_u$	Bruchdrehung des plastischen Gelenks

### 5. Äußere Lasten, Schnittlasten und Kräfte

$q$	gleichmäßig verteilte Streckenlast
$F$	Einzellast
$M$	Biegemoment
$M_p$	plastisches Moment
$M_{\epsilon_{bu}}$	Biegemoment bei beginnendem Versagen der Druckzone



## 1. Einleitung

Wird ein über mehrere Felder durchlaufender Plattenbalken bis zum Bruch beansprucht, bilden sich in der Regel die ersten plastischen Gelenke über den Innenstützen. Diese Gelenke müssen sich um ein bestimmtes Maß drehen können, bis durch die Bildung weiterer Gelenke der Balken zu einer kinematischen Kette geworden ist, womit nach der Fließgelenktheorie die Traglast des Systems erreicht ist. Das über den Innenstützen wirkende negative Biegemoment mit Zugbeanspruchung der Platte und Druckbeanspruchung des Steges ist aber für Plattenbalken hinsichtlich der hier wichtigen Verformungsfähigkeit eine ungünstige Beanspruchung, da die Dehnung des in der Platte liegenden Stahls durch den großen Betonquerschnitt der Platte erheblich behindert werden kann und andererseits die Tragfähigkeit des schmalen Stegs gegenüber der Biegedruckkraft schnell erschöpft ist. Das Bestreben, die Momente von der Stütze zum Feld umzuverteilen, um die große Druckzone der Platte im Feld auszunutzen und eine Überlastung des Stegs über den Innenstützen zu vermeiden, wie es bei der Anwendung des Traglastverfahrens ja möglich ist und naheliegt, verstärkt noch die Anforderung an die Drehfähigkeit der plastischen Gelenke über den Stützen.

Aus dieser Problemstellung ergeben sich folgende Fragen:

- Wie groß ist der Einfluß des gegenüber den Verhältnissen in einem Rechteckbalken wesentlich größeren Betonquerschnitts in der Zugzone auf die Drehfähigkeit?
- Welchen Einfluß hat der schlechtere Verbund der jetzt oben liegenden Stähle auf die Drehfähigkeit?
- In welchem Maße weicht die Drehfähigkeit bei Belastung durch eine Einzellast (Auflagerlast) von der Drehfähigkeit bei einer Belastung durch eine gleichmäßig verteilte Streckenlast ab?

Die nachstehend beschriebenen Versuche und eine rechnerisch durchgeführte Parameterstudie sollen einen Beitrag zur Klärung dieser Fragen liefern.

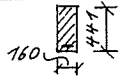
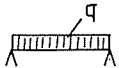
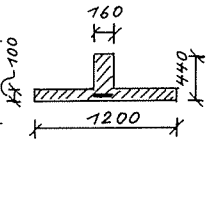
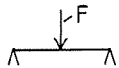
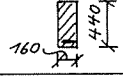
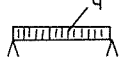
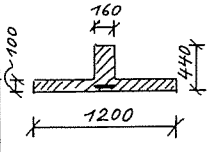
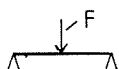
Darüber hinaus ist ein Wechsel der Stahlsorte zu berücksichtigen, da inzwischen der früher viel verwendete kaltverformte

Rippentorstahl BSt 420/500 RK durch den Betonstahl BSt 500 S, meist als naturharter Stahl hergestellt, abgelöst worden ist. So wird in den Versuchen für die Biegezugbewehrung der Balken nur naturharter Betonstahl BSt 500 S verwendet. In der Parameterstudie wird unter Berücksichtigung weiterer Parameter die Drehfähigkeit bei Verwendung von naturhartem Betonstahl BSt 500 S der bei Verwendung von kaltverformtem Betonstahl BSt 420/500 RK zum Vergleich gegenübergestellt.

## 2. Versuchsprogramme, Versagenskriterien

Das Prüfprogramm sah die Untersuchung von 5 Plattenbalken mit 4 m Länge und 2 unterschiedlichen Bewehrungsgraden bei Belastung durch eine gleichmäßig verteilte Streckenlast oder durch eine Einzellast in Feldmitte vor. Zum Vergleich waren je Bewehrungsgrad ein Rechteckbalken, der bis auf die fehlende Platte dem jeweiligen Plattenbalken entsprach, bei gleichmäßig verteilter Streckenlast zu prüfen. In der Tafel 1 ist das Versuchsprogramm dieser 4 m langen Balken zusammengestellt.

Tafel 1  
Versuche an 4 m langen Balken

Balken	Balkenquerschnitt (Sollwerte)	Stütz- weite	Biegebe- wehrung	Bewehrungsgrad <sup>1)</sup>		Betonier- lage der Stähle	Belastungsart	Bewehrung d. Platte						
				geometrisch $\mu_2$	mechanisch $\omega_2$									
-	mm	-	-	%		-	-	-						
R10		3800	4 $\phi$ 10 mm BSt 500 S	0,52	11,3	oben		-						
Plz10								Betonstahl- matte R 221 (BSt 500 M)						
Plz10-F									nur Quer- stäbe $\phi$ 6 mm s. Bild 1					
Plz10-F, oM.									-					
R16								3800	4 $\phi$ 16 mm BSt 500 S	1,32	28,8	oben		-
Plz16														Betonstahl- matte R 221 (BSt 500 M)
Plz16-F														

1) Sollwerte

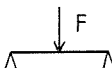
Unverändert blieben in den Versuchen

- die äußeren Abmessungen der Balken
- die Stützweite
- die Stahlorte (BSt 500 S)
- die Betondruckfestigkeit ( $\beta_w \sim 39 \text{ N/mm}^2$ ).

Während der Prüfung der Plattenbalken ergaben sich Fragen zum Verbundverhalten bei hohen Dehnungen des Betonstahls BSt 500 S und zum Einfluß des Stahldurchmessers auf die Verteilung der Stahldehnungen (s. Abschnitt 5.1). Zu ihrer Klärung wurden Tastversuche an bewehrten Kleinbalken mit 0,7 m Länge durchgeführt. Diese Balken waren aus gleichem Beton wie die 4 m langen Balken

hergestellt und mit Stählen unterschiedlicher Durchmesser und unterschiedlicher Stahlorten bewehrt. In der Tafel 2 ist das Versuchsprogramm der Kleinbalken zusammengestellt.

Tafel 2  
Versuche an Kleinbalken mit 0,7 m

Balken	Abmessungen	Stützweite	Biegebewehrung	Bewehrungsgrad geometrisch $\mu_2$	Bewehrungsgrad mechanisch $\mu_2$	Betonierlage der Stähle	Belastungsart	Bemerkungen
-	mm	-	-	%		-	-	-
P4	b/d = 150/150  L = 700	640	4 $\emptyset$ 4 BSt 500/550 RK	0,26	5,7	unten		Vorgegebener Riß in
P6			2 $\emptyset$ 6 BSt 500 S	0,30	8,4			Balkenmitte; Zusatzbe-
P8			1 $\emptyset$ 8 BSt 500 S	0,27	7,4			wehrung zwischen Riß
P10			1 $\emptyset$ 10 BSt 500 S	0,42	9,4			und Balkenenden, um
P4K			4 $\emptyset$ 4 BSt 500/550 RK	0,27	6,7			die Bildung nur eines
P4U			4 $\emptyset$ 4 BSt 500/550 RK geglüht	0,27	2,1			Risses in Balkenmitte
P6K			3 $\emptyset$ 6,5 BSt 500 M (Mattenstäbe)	0,53	15,2			zu erzwingen
P6U			3 $\emptyset$ 6,5 BSt 500 M geglüht	0,53	5,6			(s. Bild 18)

Wenn auch die Versuche erst beim endgültigen Versagen des plastischen Gelenks bzw. erst bei sehr großen Verformungen beendet wurden, soll hier als Drehfähigkeit derjenige Drehwinkel des plastischen Gelenks verstanden werden, bei dem entweder ein Stahl der Hauptbewehrung riß oder durch Rißbildung in der Druckzone sich ein Druckversagen des Betons der Druckzone ankündigte. Die unter Umständen sehr große Differenz des Drehwinkels zwischen dem Drehwinkel beim ersten Riß der Druckzone und dem beim endgültigen Versagen des plastischen Gelenks wird nicht genutzt, da das plastische Gelenk auch bei lang anhaltender Belastung, z. B. durch Massenkkräfte, nicht versagen darf und das in ihm wirkende plastische Moment  $M_p$  Voraussetzung für das Kräftegleichgewicht im System ist. Im Gegensatz hierzu steht die kurzzeitige Belastung eines plastischen Gelenks in einem Katastrophenfall, bei dem es ausreicht, wenn nach der Beanspruchung das System gerade noch standfest ist.

### 3. Werkstoffkennwerte

#### 3.1 Beton

Alle Balken wurden aus Beton gleicher Zusammensetzung hergestellt. Da es in der BAM nicht möglich war, eine in der Menge für einen Balken ausreichende Mischung herzustellen und die Verwendung mehrerer Mischungen für einen Balken die Gleichmäßigkeit des Balkenbetons verschlechtert hätte, wurden die Balken mit Transportbeton eines Berliner Betonwerks betoniert. Zur Verwendung gelangte ein Beton der Güte B15, der unter Laborverhältnissen jedoch eine mittlere Druckfestigkeit von rd. 39 N/mm<sup>2</sup> erreichte. Ein m<sup>3</sup> Beton setzte sich wie folgt zusammen:

Sand	0-1 mm:	408 kg		Kies	8-16 mm:	427 kg
Sand	0-2 mm:	390 kg		Kies	16-31 mm:	427 kg
Sand	2-8 mm:	203 kg		Zement PZ 35 F:		300 kg

Betonverflüssiger (Sikament FF): 0,6 l  
Anmachwasser und Eigenfeuchtigkeit der Zuschläge: 189 kg  
Wasserzementfaktor: W/Z = 0,63  
Ausbreitmaß: rd. 44-50 cm  
Konsistenz: K3

Die Sieblinie der Zuschläge liegt im Feinsandbereich zwischen den Sieblinien C32 und B32, im Kiesbereich zwischen den Sieblinien B32 und A32 des Bildes 3 der DIN 1045, Beton und Stahlbeton - Bemessung und Ausführung, Ausgabe Dezember 1978. Die Sieblinien sind im Bild A1 des Anhangs dargestellt.

Aus den Mischungen 1, 2, 3 und 5 (s. Tafel A1 im Anhang) wurden je 6 Würfel mit 20 cm Kantenlänge zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit nach 14 und 28 Tagen sowie zum Zeitpunkt der Balkenprüfung hergestellt. Hiervon wich nur die Mischung 4 ab, die in der BAM selbst nach gleichem Rezept wie der Transportbeton gemischt worden war. Aus dieser Mischung 4 wurden neben 4 Balken mit 700 mm Länge nur 3 Würfel zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen hergestellt.

Zum Vergleich von Würfel- und Bauteilfestigkeit sind dem Balken Plz 10-F 4 Bohrkerne mit 100 mm Durchmesser entnommen und auf Druckfestigkeit geprüft worden.

Aus zwei der fünf Mischungen wurden je 3 Balken 150 mm x 150 mm x 700 mm zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit hergestellt. Gemäß den Anforderungen der DIN 1048, Prüfverfahren für Beton, Teil 1, Ausgabe Dezember 1978, erfolgte die Prüfung der bis zu

diesem Zeitpunkt unter Wasser gelagerten Balken durch eine Belastung der im Abstand von 600 mm aufgelagerten Balken mit je einer Einzellast in den Drittelpunkten.

Die ermittelten Frischbetonkennwerte, Würfel- und Bohrkerndruckfestigkeiten sowie die Biegezugfestigkeiten sind in der Tafel A1 des Anhangs zusammengestellt.

Die statistische Auswertung der im Alter von 28 Tagen und der am Tage der Balkenprüfung ermittelten Würfeldruckfestigkeiten ergab:

	$\frac{\beta_{w,28}}{14}$	$\frac{\beta_{w,Prüf}}{16}$
Anzahl der Meßwerte	14	16
Mittelwert	$\bar{\beta}_w = 39,0 \text{ N/mm}^2$	40,3 N/mm <sup>2</sup>
Standardabweichung	$s = 1,2 \text{ N/mm}^2$	0,9 N/mm <sup>2</sup>
Variationskoeffizient V =	3,0 %	2,2 %

Die 4, dem Balken Plz 10-F entnommenen Bohrkerne erreichten mit einer Druckfestigkeit von 35 N/mm<sup>2</sup> 89 % der Würfeldfestigkeit im Alter von 28 Tagen. Damit ist die Anforderung der DIN 1048, Prüfverfahren für Beton, Teil 2, Ausgabe Dezember 1978, daß die mittlere Bohrkerndruckfestigkeit mindestens 85 % der mittleren Würfeldruckfestigkeit  $\beta_{w,28}$  betragen soll, erfüllt. Das Verhältnis von Bauteilfestigkeit und Würfeldfestigkeit entspricht also dem in der DIN niedergelegten allgemeinen Erfahrungswert.

Die statistische Auswertung der ermittelten Biegezugfestigkeiten (s. Tafel A1 im Anhang) ergab folgende Werte:

Anzahl der Meßwerte	6
Mittelwert	$\beta_{bZ} = 4,35 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung	$s = 0,26 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient V =	6,0 %

An 6 Betonprismen 100 mm x 100 mm x 300 mm aus der Mischung 5 wurde weiterhin die Prismendruckfestigkeit ermittelt, nachdem zuvor an 3 Prismen dieser Gruppe der statische Elastizitätsmodul bestimmt worden war. Gemäß DIN 1048, Prüfverfahren für Beton, Teil 1, Ausgabe Dezember 1978 [2], erfolgte die Ermittlung des Elastizitätsmoduls als Sehnenmodul aus dem Verhältnis zwischen einer Druckspannungsdifferenz und der ihr entsprechenden elastischen Verformung, wobei als obere Prüfdruckspannung ein Drittel der an den ersten 3 Prismen bereits geprüften Prismendruckfestigkeit angesetzt wurde. Abweichend von der genannten Norm wurden allerdings nicht Zylinder, sondern Prismen geprüft. Die Meßwerte sind in der Tafel A2 des Anhangs zusammengestellt.

## 3.2 Betonstahl

### 3.2.1 Bewehrung der 4 m langen Balken

Bei den Balken mit 4 m Länge bestand die Biegezugbewehrung aus Betonstabstahl BSt 500 S und die Bügelbewehrung aus Rippentorstahl (BSt 420/500 RK). Die Plattenbalken besaßen zusätzlich eine Plattenbewehrung aus einer Betonstahlmatte BSt 500 M mit senkrecht zur Balkenlängsachse angeordneten Tragstäben, den Verhältnissen im Bauwerk entsprechend, bei dem die Platte eines Plattenbalkens aus den allgemein normal zur Balkenachse gespannten Deckenplatten gebildet wird. Bei den als Biegezugbewehrung eingesetzten Stählen wurden an einer Zugprobe je verwendeter Stange, wie auch an einigen Stäben der Betonstahlmatte, die mechanischen Kennwerte und die Spannungs-Dehnungs-Linie bestimmt (s. Abschnitt 3.2.3). Die Kennwerte der Montagestähle und der Bügel wurden nicht ermittelt.

### 3.2.2 Bewehrung der Kleinbalken mit 0,7 m Länge

Die Kleinbalken dienten Tastversuchen und waren deshalb nicht nur mit Stählen unterschiedlicher Durchmesser, sondern auch unterschiedlicher Stahlorten bewehrt. Verwendung fanden die Stähle

- BSt 500 S nach DIN 488, Sept. 1984 [3]
- BSt 500 M nach DIN 488, Sept. 1984 [3]
- BSt 500/550 RK nach DIN 488, April 1972 [4]
- geglühte Abschnitte von kaltverformten Stählen (BSt 500 M bzw. BSt 500 /550 RK).

Von allen verwendeten Stählen wurden in Zugversuchen die mechanischen Kennwerte ermittelt und die Spannungs-Dehnungs-Linie aufgezeichnet (s. Abschnitt 3.2.3).

### 3.2.3 Beschreibung der Stähle, mechanische Kennwerte

Der in den Balken mit 4 m Länge und teilweise auch in den Kleinbalken verwendete Betonstabstahl BSt 500 S ist vom Euskirchner Walzwerk, vormals Walzwerk Becker, 5350 Euskirchen-Euenheim, gewalzt worden. Dieses Werk stellt einen mikrolegierten, ohne Nachbehandlung warmgewalzten Stahl her, der eine ausgeprägte Fließgrenze aufweist. Lichtmikroskopische Gefügeuntersuchungen der BAM bestätigten, daß es sich um einen mikrolegierten Stahl ohne Nachbehandlung handelt.

Dagegen sind die Betonstahlmatten BSt 500 M wie auch der Stahl BSt 500/550 RK, der im Jahr 1980 als Vormaterial für "Kari-Mat-

ten" der Baustahlgewebe GmbH produziert worden war, kaltverformte Stähle mit stetigem Übergang vom elastischen zum plastischen Bereich. Die in den Kleinbalken auch verwendeten geglühten Stäbe sind aus diesen beiden kaltverformten Stählen durch Erwärmen der Stäbe auf 850 °C, Halten der Temperatur über 10 Minuten und einem abschließenden Abkühlen im Ofen hergestellt worden.

Die in den Zugversuchen ermittelten Festigkeiten und Dehnungen sind in der Tafel A3 des Anhangs zusammengestellt.

Im elastischen Bereich wurden die Zugspannungen um rd. 30 N/mm<sup>2</sup> je Sekunde und im plastischen Bereich die Dehnung um rd. 1·10<sup>-3</sup> je Sekunde gesteigert, mit Ausnahme der Stäbe mit dem Durchmesser von 16 mm, BSt 500 S, die über die ganze Prüfzeit weggeregelt mit einer Dehngeschwindigkeit von 5·10<sup>-5</sup> je Sekunde beansprucht worden waren. Die Gleichmaßdehnung wurde nach dem Höchstlastverfahren als die zur Höchstlast zugehörige plastische Dehnung bestimmt. Im allgemeinen ist die nach dem Höchstlastverfahren ermittelte Gleichmaßdehnung kleiner als die aus der Differenz zweier Bruchdehnungswerte rechnerisch ermittelte (s. [5]). Hinsichtlich der Duktilität liegt diese Ermittlungsart also auf der sicheren Seite. Das Bild A2 zeigt jedoch, daß die über die Länge der Zugprobe nach dem Versuch gemessenen plastischen Dehnungen erheblich schwanken und stellenweise die Gleichmaßdehnung unterschreiten.

Bei der rechnerischen Darstellung der Abhängigkeit der Dehnung von der Spannung stellt bei kaltverformten Stählen der Ansatz

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + 0,002 \left( \frac{\sigma_s}{R_{p0,2}} \right)^m$$

eine gute Näherung dar. Bei Stählen mit ausgeprägtem Lüdersbereich ist die Arbeitslinie kaum in einem geschlossenen Ausdruck beschreibbar. Hier ist die Angabe ausgewählter Wertepaare hilfreich. In der Tafel A3 des Anhangs sind bei Stählen mit Lüdersbereich die Länge des Lüdersbereichs und für zwei ausgewählte Dehnungen im Verfestigungsbereich die zugehörigen Spannungen angegeben wie auch der Exponent m des oben angeführten Ansatzes für die kaltverformten Stähle.

Die Spannungs-Dehnungs-Linien der geprüften Stähle sind im Anhang in drei Bildern dargestellt. Das Bild A3 zeigt die Arbeitslinien aller Stähle der Sorte BSt 500 S. In den Bildern A4 und A5 sind, jeweils für Durchmesser 4 mm und 6 mm bzw. 6,5 mm, die Arbeitslinien unterschiedlicher Stahlsorten gegenübergestellt.



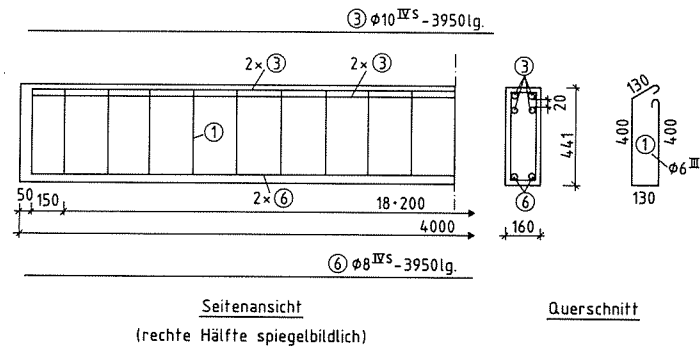
## 4. Versuche an Rechteckbalken und Plattenbalken mit 4 m Länge

### 4.1 Probekörper

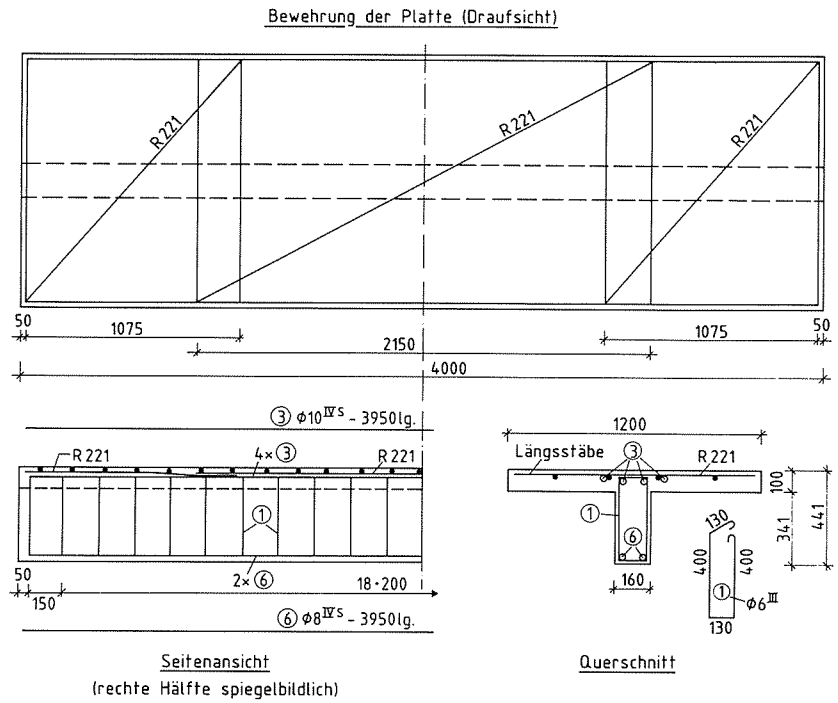
Insgesamt wurden sieben Balken mit 4 m Länge, fünf Plattenbalken und zwei Balken mit Rechteckquerschnitt, hergestellt und geprüft. Alle Plattenbalken besaßen mit rd. 4000 mm Länge, 440 mm Höhe, 100 mm Plattendicke, 1200 mm Plattenbreite und 160 mm Stegbreite die gleichen äußeren Abmessungen. Die Abmessungen der beiden Rechteckbalken entsprachen mit 4000 mm Länge, 440 mm Höhe und 160 mm Breite den entsprechenden Werten der Plattenbalken. Als Stahlsorte war für die Biegezugbewehrung ein mikrolegierter, naturharter Betonstahl BSt 500 S gewählt worden. Die Schubbewehrung bestand aus zweiseitigen, geschlossenen Bügeln aus Rippenstahl (BSt 420/500 RK). Aufbiegungen der Zugbewehrung waren nicht vorgesehen, alle Stähle reichten über die ganze Balkenlänge. Aus Bild 1 sind die Abmessungen und die Bewehrung der Balken zu ersehen. Die Platten der Plattenbalken waren zusätzlich mit Betonstahlmatten R 221 (Längsstäbe  $\varnothing$  6,5 mm im Abstand von 150 mm, Querstäbe  $\varnothing$  4,0 mm im Abstand von 250 mm) aus kaltverformtem Betonstahl BSt 500 M bewehrt, wobei die Längsstäbe quer zur Balkenachse angeordnet waren. Diese Bewehrung entspricht in etwa der Stützbewehrung einer quer zur Balkenachse gespannten, durchlaufenden Deckenplatte mit nur 2,5 m Stützweite und stellte also eine relativ schwache Bewehrung der Platte dar. Bei einem Plattenbalken (Plz 10-F, oM., s. Tafel 1) war im mittleren Bereich des Balkens die Betonstahlmatte durch quer zur Balkenachse angeordnete Stäbe ohne Verteilerstäbe ersetzt worden (s. Bild 1), um im Bereich des plastischen Gelenks einen etwaigen Einfluß der Verteilerstäbe in der Platte, die parallel zur Biegebewehrung des Balkens verlaufen, auszuschalten.

Die Probekörper wurden jeweils paarweise unter Verwendung von Transportbeton hergestellt. Die Reihenfolge ist der Tafel A1 im Anhang zu entnehmen. Als Form diente eine Stahlschalung. Lediglich die Schalungsflächen für die Plattenunterseiten, die Plattenbalken wurden mit oben liegender Platte betoniert, bestanden aus kunststoffbeschichteten Schalungsplatten. In allen Balken war die Biegezugbewehrung oben liegend angeordnet. Die Verdichtung des Betons erfolgte mit einem Innenrüttler, Rüttelflaschendurchmesser 20 mm. In den ersten sieben Tagen nach Herstellung lagerten die Balken unter feuchten Tüchern, danach bis zur Prüfung in der geschlossenen Prüfhalle.

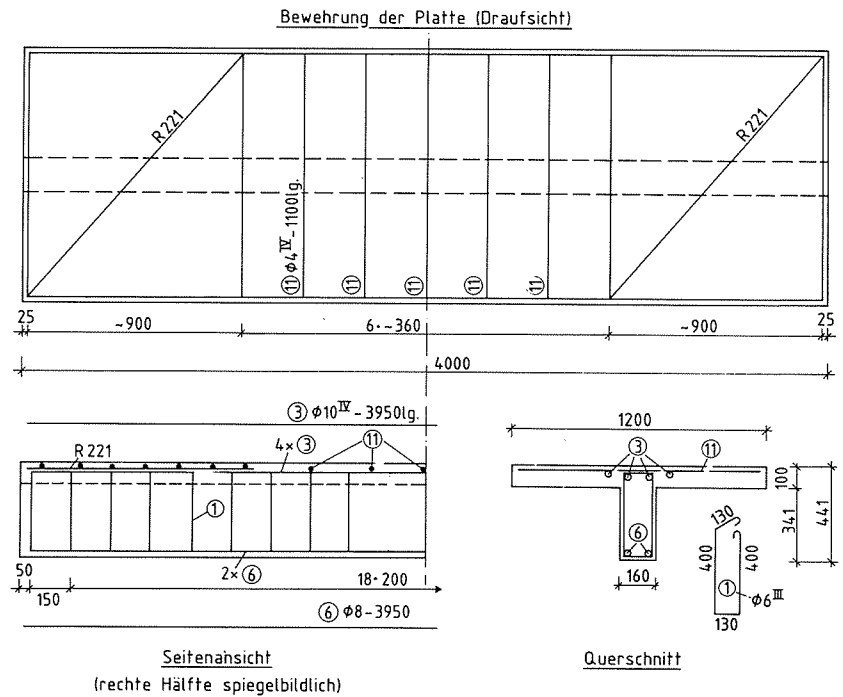
# Balken R 10



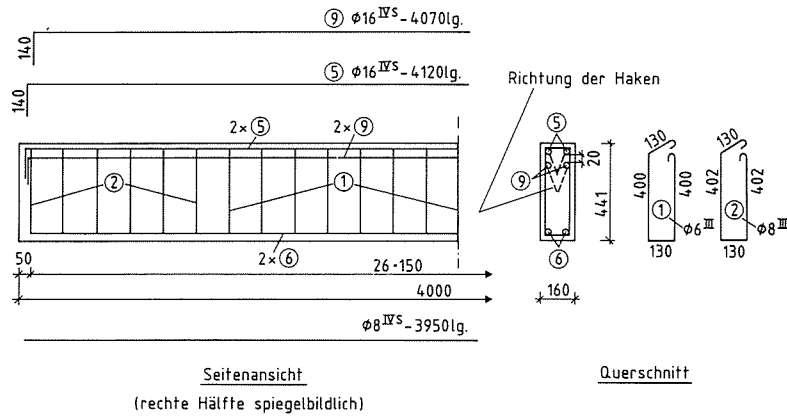
# Balken PLz 10 u. PLz 10-F



# Balken PLz 10-F, oM

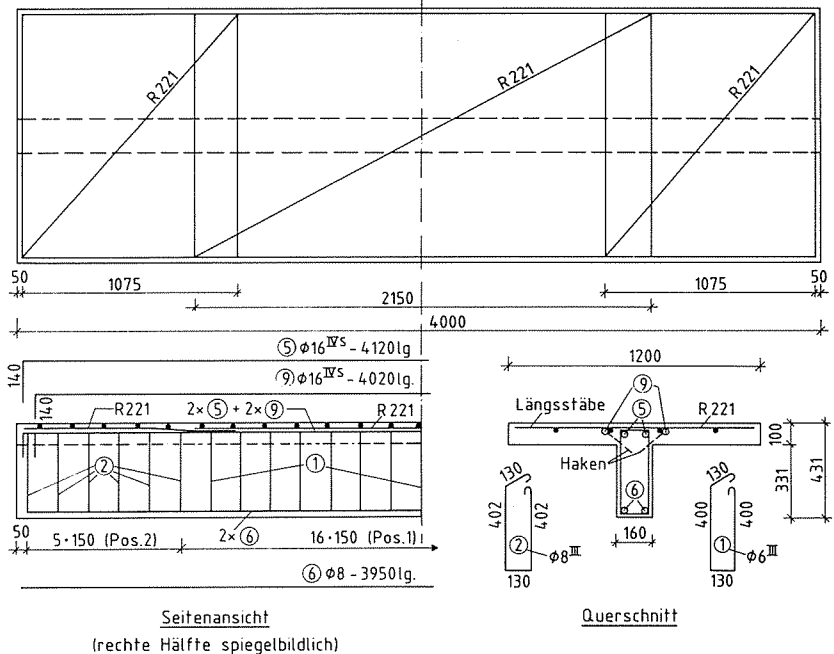


# Balken R 16



Bewehrung der Platte (Draufsicht)

# Balken PLz 16



Bewehrung der Platte (Draufsicht)

# Balken PLz 16-F

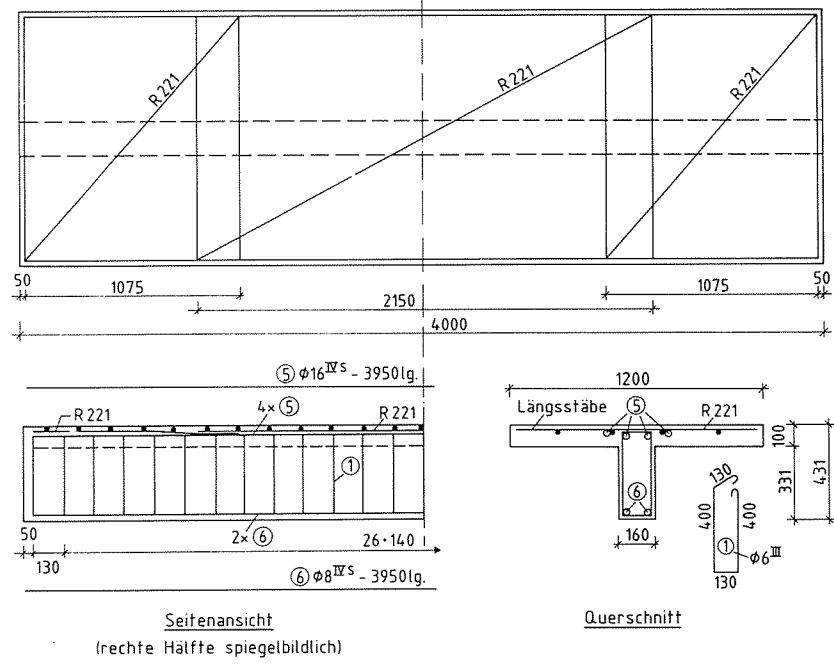


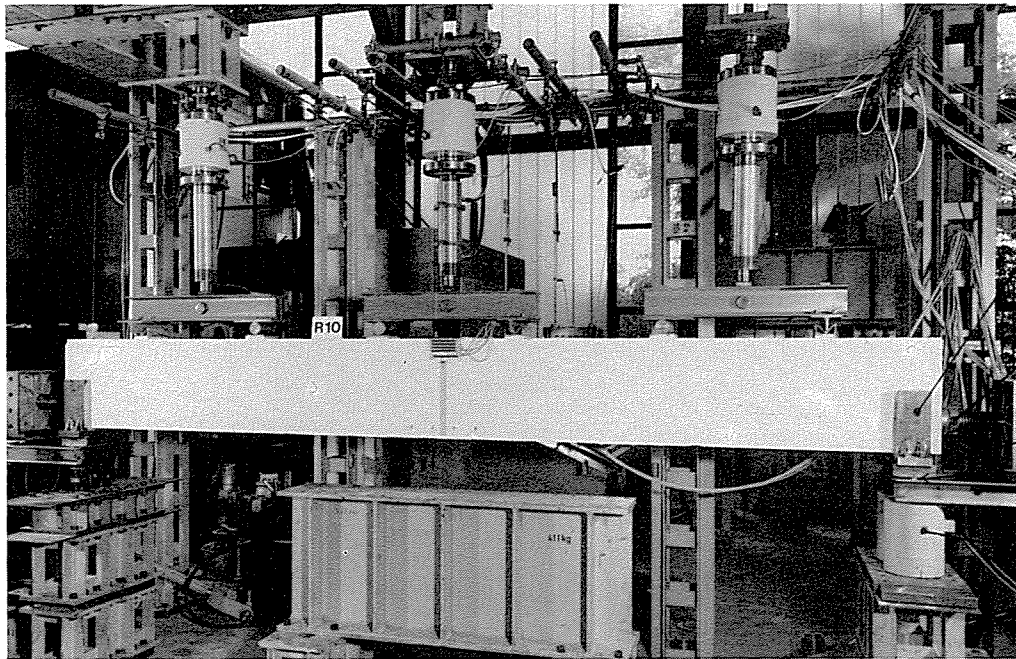
Bild 1  
 Abmessungen und Bewehrung der Balken mit 4 m Länge  
 (VI S  $\cong$  Bst 500 S)

## 4.2 Versuchsdurchführung

### 4.2.1 Auflagerung und Belastung der Balken

Die Balken wurden als gelenkig gelagerte Träger auf zwei Stützen geprüft. Vor dem Einbau waren sie um ihre Längsachse so gedreht worden, daß die Biegebewehrung und die Platten der Plattenbalken, die beim Herstellen der Balken oben lagen, nun unten lagen (s. Bild 2). Wenn auch aus versuchstechnischen Gründen der einfache Balken als statisches System gewählt worden war, lagen auf diese Weise doch die Biegebewehrung wie im Bereich negativer Momente eines Durchlaufträgers in der schlechter verdichteten Zone des Betons und die Platte der Plattenbalken in der Zugzone.

Um auch bei den zu erwartenden großen Verformungen eine zwangsfreie Beanspruchung des Probekörpers sowie eine exakte Messung der Kräfte zu gewährleisten, wurde besonderes Augenmerk auf die Auflagerung der Balken und die Einleitung der Last gelegt. Auf beiden Auflagern war der Balken in Längsrichtung verschieblich gelagert durch Anordnung einer Fettschicht zwischen je zwei Stahlplatten. Verstellbare Anschläge (s. Bild 3) an den Balkenstirnseiten wurden während des Versuchs so eingestellt, daß die Balkenmitte, deren Position optisch kontrolliert wurde, stets in Feldmitte verblieb. Unter der unteren der beiden bereits erwähnten Stahlplatten und oberhalb einer dritten Stahlplatte befand sich ein Rundstahl  $\emptyset$  20 mm mit hoher Festigkeit, der, in die untere und mittlere Platte je 3 mm eingelassen, die Drehbarkeit des Auflagers und die gleichbleibende Lage der Auflagerkraft garantierte. Die Platte unter dem Rundstahl wurde über einen an einem Festpunkt angelenkten Kragarm stabilisiert, der auch alle bei größeren Verformungen möglichen horizontalen Kräfte aufnahm und eine lediglich vertikale Belastung der unter der Platte angeordneten Kraftmeßdosen sicherte. Für die Belastung der Balken wurden als Einheit verschraubte Kombinationen von Kraftmeßdose und hydraulischer Presse mit einer Gesamtlänge von rd. 1230 mm verwendet, die an ihrem oberen Ende am oberen Widerlager allseitig gelenkig und an ihrem unteren Ende am Balken in einer Drehachse senkrecht zur Belastungsebene drehbar gelagert waren. Bei den Balken mit gleichmäßig verteilter Belastung wurde diese durch eine Belastung des Balkens mit sechs gleichgroßen Einzellasten angenähert (s. Bild 2). Hierzu wurden drei Kraftmeßdosen-Pressen-Kombinationen eingesetzt, bei denen der Pressenkolben gelenkig mit einem ][-Träger verbolzt war, der die



Gabellagerung als  
Kippsicherung

Verstellbarer  
Anschlag

Gleitfuge

Rundstahl

Kraftmeßdosen

Bild 2  
Prüfstand mit eingebautem Rechteckbalken R10, als Annäherung  
einer gleichmäßig verteilten Streckenlast mit 6 Einzellasten  
belastet

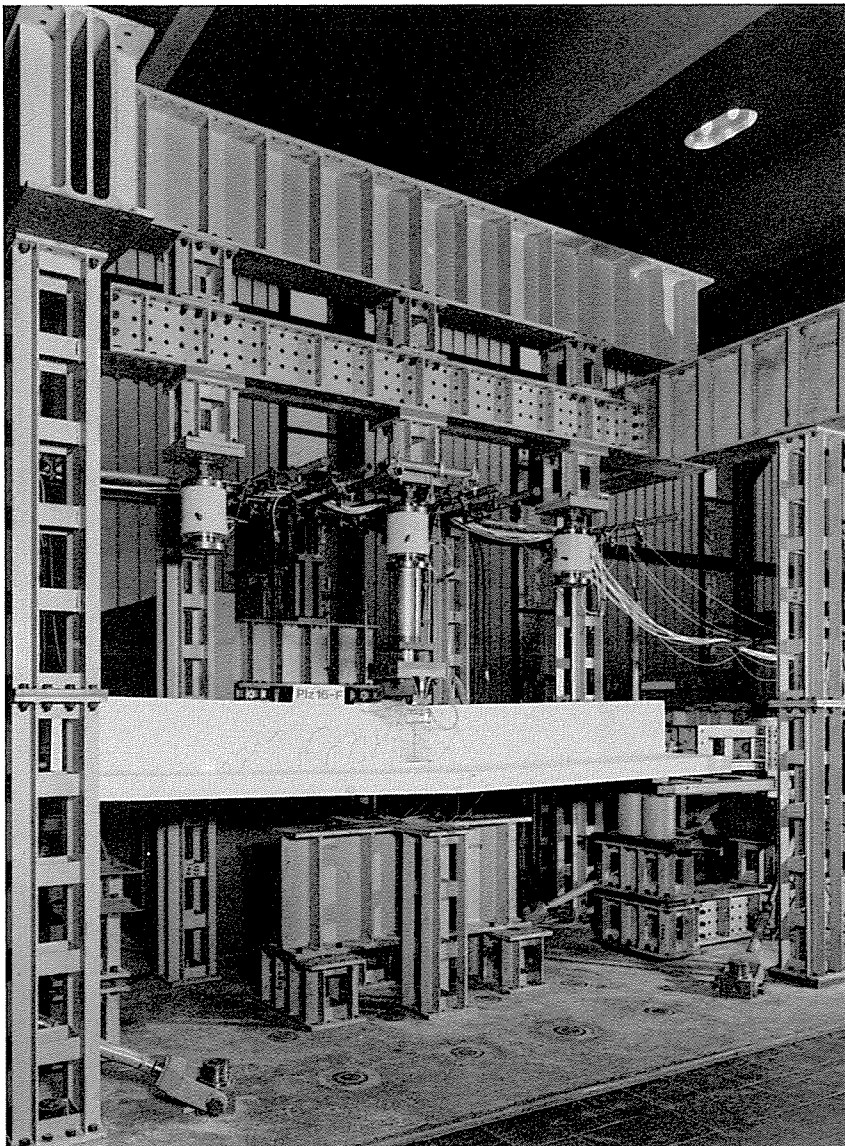


Bild 3  
Prüfstand mit eingebautem  
Plattenbalken Plz 16-F,  
durch eine Einzellast  
in Feldmitte belastet

Last an einem Ende über eine feste Schneide, am anderen Ende über eine Rolle an den Balken weiterleitete. Unter den Schneiden bzw. Rollen befanden sich 80 mm breite Lasteinleitungsplatten. Bei den nur mit einer Einzellast beanspruchten Balken (s. Bild 3) wurde eine entsprechend stärkere Kraftmeßdosen-Pressen-Kombination gewählt, die die Last über eine Schneide und eine 120 mm breite Lasteinleitungsplatte in den Balken einleitete.

#### 4.2.2 Meßprogramm

Die aufgebrachtten Lasten sowie beide Auflagerkräfte wurden elektrisch mit Kraftmeßdosen (s. Bild 4) gemessen. Zur Bestimmung der Durchbiegungslinie der Balken sind die vertikalen Verschiebungen über den Auflagern und an sieben Punkten zwischen den Auflagern (s. Bild 5) gemessen worden. Verwendung fanden Dif-

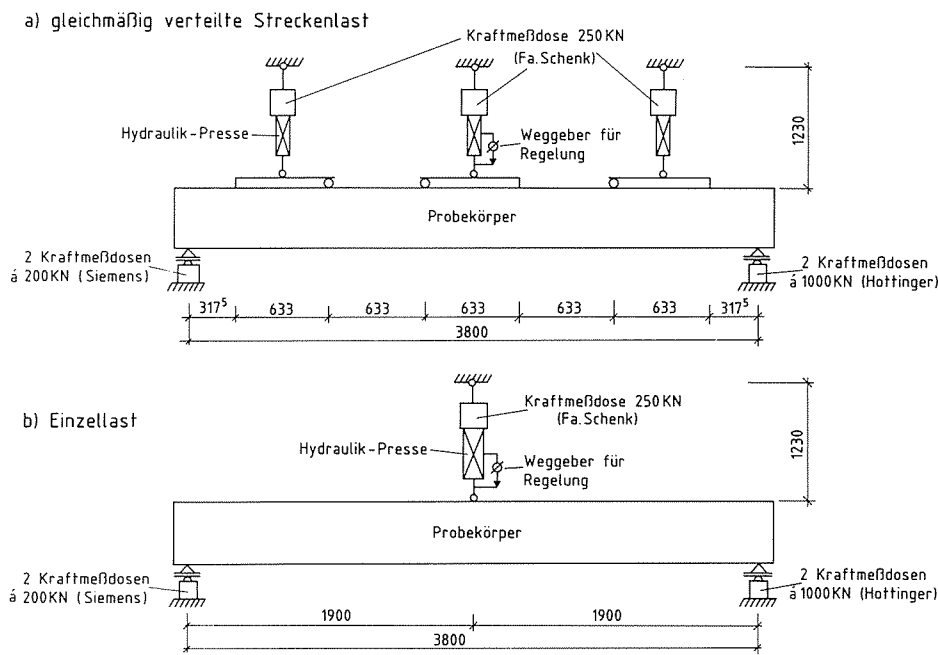


Bild 4  
Meßanordnung für  
Last- und Auflager-  
kraftmessungen

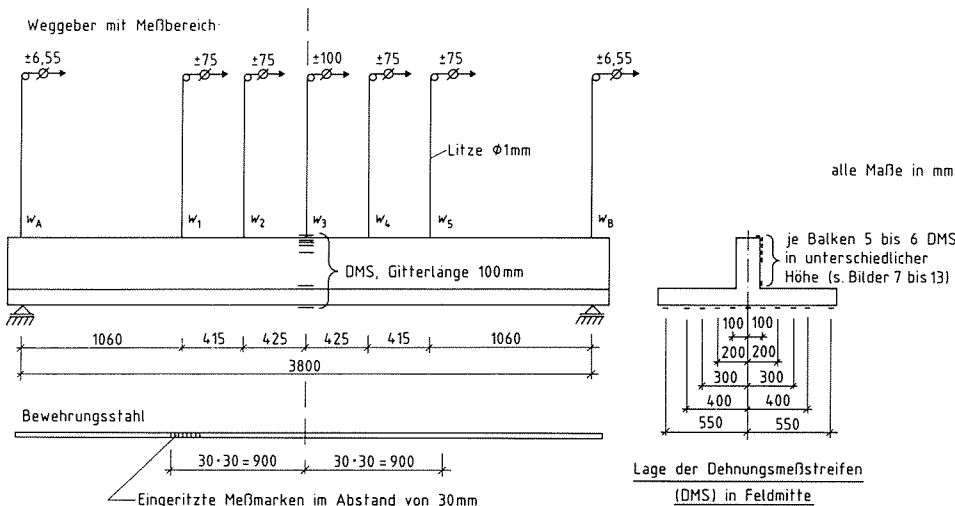


Bild 5  
Meßanordnung für  
Weg- und Dehnungs-  
messungen

ferential-Transformator-Weggeber unterschiedlicher Meßbereiche (s. Bild 5), die an einem von der Belastungseinrichtung unabhängigen Meßgerüst befestigt und über Litzen mit rd. 1 mm Durchmesser mit den Meßpunkten auf der Steg- bzw. Balkenoberseite verbunden waren. Ein weiterer Weggeber an der mittleren hydraulischen Presse bestimmte als Istwert der gewählten Wegregelung den Kolbenweg der betreffenden Presse. In Balkenmitte wurden außerdem die Betondehnungen mit Folien-Dehnungsmeßstreifen LY 41, Gitterlänge 100 mm, der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik gemessen. An der Balken- bzw. Stegseitenfläche, vornehmlich im Bereich der Druckzone, waren hierfür vier bis fünf Dehnungsmeßstreifen angebracht. Bei den durch gleichmäßig verteilte Streckenlast beanspruchten Balken mit freier Balkenoberseite in Feldmitte befand sich ein weiterer Dehnungsmeßstreifen auf der Balkenoberseite. Zur Messung der Verteilung der Betondehnungen im Stadium I über die Plattenbreite waren an der Unterseite der Plattenbalken sieben bis elf Dehnungsmeßstreifen je Balken angeordnet worden. Lage und Anzahl der Dehnungsmeßstreifen schwanken von Balken zu Balken. Sie sind in der Darstellung der Betondehnungen (s. Bilder 7 bis 13) angegeben.

Bei dem Balken Plz 10-F, oM. war auf eine Messung der Betondehnungen verzichtet worden.

Von den Dehnungen des Stahls wurden lediglich die bleibenden Dehnungen bei Versuchsende aus der Abstandsänderung von Meßmarken, die vor dem Betonieren im Abstand von 30 mm und über eine Länge von 1,80 m an einem oder mehreren Stäben der Zugbewehrung fein eingeritzt waren, bestimmt. Diese Methode erlaubt eine Messung der Stahldehnungen ohne jede Störung des Verbundes und zeichnet sich durch eine gute Darstellung der Verteilung der Stahldehnungen über die Balkenlänge aus. Da die Stahldehnungen stark vom Rißbild des Balkens durch die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen beeinflusst sein können, hätten punktuelle Messungen der Stahldehnungen nur einen begrenzten Aussagewert.

#### 4.2.3 Versuchsablauf

Die Versuche wurden weggeregelt gefahren, wobei der Kolbenweg der mittleren Presse, der in etwa der Balkendurchbiegung in Feldmitte entspricht, als Regelgröße gewählt worden war. Die

Weggeschwindigkeit betrug, solange sich der Balken noch im elastischen Bereich befand, 0,002 mm je Sekunde. Im plastischen Bereich, in dem die Wegzunahme gegenüber der Lastzunahme überwiegt, wurde die Weggeschwindigkeit auf 0,04 mm je Sekunde gesteigert. Die Belastung erfolgte monoton ohne Zwischenentlastungen.

Nur in den Prüfstufen, die für Messungen sowie das Festhalten des Rißbildes erforderlich waren und eine Zeit von je 10 bis 15 Minuten in Anspruch nahmen, wurde der jeweilige Verformungszustand des Balkens angehalten, wobei die Last in dieser Zeit infolge Relaxation des Balkens etwas abfiel. Insgesamt dauerte ein Versuch rd. zwei Stunden. Kontinuierlich wurden während des Versuchs die von der mittleren Presse ausgeübte Last und die Durchbiegung des Balkens in Feldmitte von einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. In den 12 bis 16 Prüfstufen erfolgte die Messung der Lasten, Auflagerkräfte, Verschiebungen und Betondehnungen über eine Vielstellenmeßanlage mit angeschlossener Datenerfassung auf einem Magnetband. Außerdem wurden Rißbild und allgemeine Beobachtungen protokolliert sowie, soweit sinnvoll, die Rißweiten mit einer Meßlupe, 0,1 mm Teilung, gemessen.

### 4.3 Versuchsergebnisse

#### 4.3.1 Darstellung der Versuchsergebnisse

In den Bildern 7 bis 13 sind in einem Bild je Balken folgende Versuchsergebnisse graphisch dargestellt:

- Rißbild
- Verteilung der plastischen Stahldehnung eines Bewehrungsstabs über die Balkenlänge bei Versuchsende
- Durchbiegungslinien bei drei Belastungszuständen
- Betondehnungen in Balkenmitte
- Balkenmittendurchbiegung in Abhängigkeit vom Biegemoment
- Drehung des plastischen Gelenks in Abhängigkeit vom Biegemoment.

Unter jedem Rißbild sind die Rißweiten bei einer Prüfstufe kurz vor Versuchsende eingetragen. Bei der Beurteilung der gemessenen plastischen Stahldehnungen ist zu beachten, daß diese zum Verformungszustand bei Versuchsende gehören und nicht zum Zustand "beginnendes Versagen der Druckzone", welcher hier als Versa-



ganzzustand für das plastische Gelenk angesehen wird. Die Durchbiegungslinien wurden für drei markante Belastungszustände gezeichnet. Die oberste Linie ist die Durchbiegung des Balkens beim Übergang vom elastischen zum plastischen Zustand, die zweite die Durchbiegung bei beginnendem Versagen der Druckzone und die dritte die Durchbiegung bei Versuchsende. Durch Elimination der Auflagerverschiebungen sind alle Durchbiegungswerte auf die Verbindungslinie durch die beiden Auflagerpunkte bezogen.

Die Drehung  $\vartheta$  des plastischen Gelenks wurde als der plastische Anteil der Relativedrehung der beiden im elastischen Zustand verbliebenen Auflagerbereiche ermittelt (s. Bild 6).

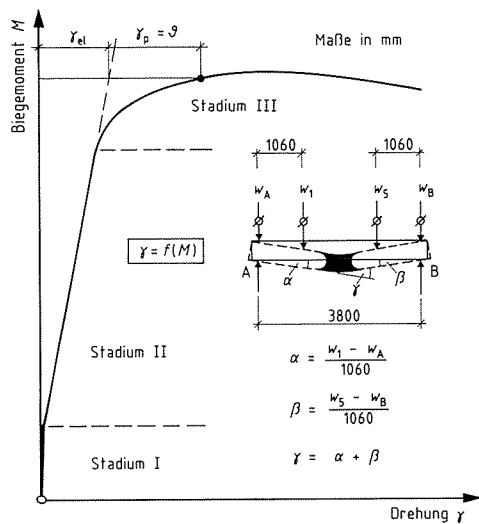


Bild 6 Bestimmung der Drehung  $\vartheta$  eines plastischen Gelenks als plastischer Anteil  $\gamma_p$  der Gesamtdrehung  $\gamma$

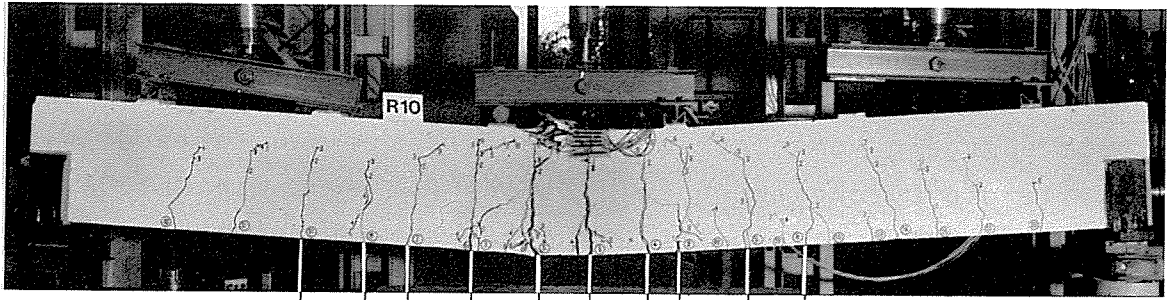
Daten der Biegezugbewehrung, die jeweils vorhandene statische Höhe und weitere Aussagen zum Rißbild, zu den erreichten Momenten sowie zum Verhalten des plastischen Gelenks sind für die sieben Balken mit 4 m Länge in der Tafel 3 zusammengestellt.

Tafel 3 Balken mit 4 m Länge, Zusammenstellung von Versuchsergebnissen

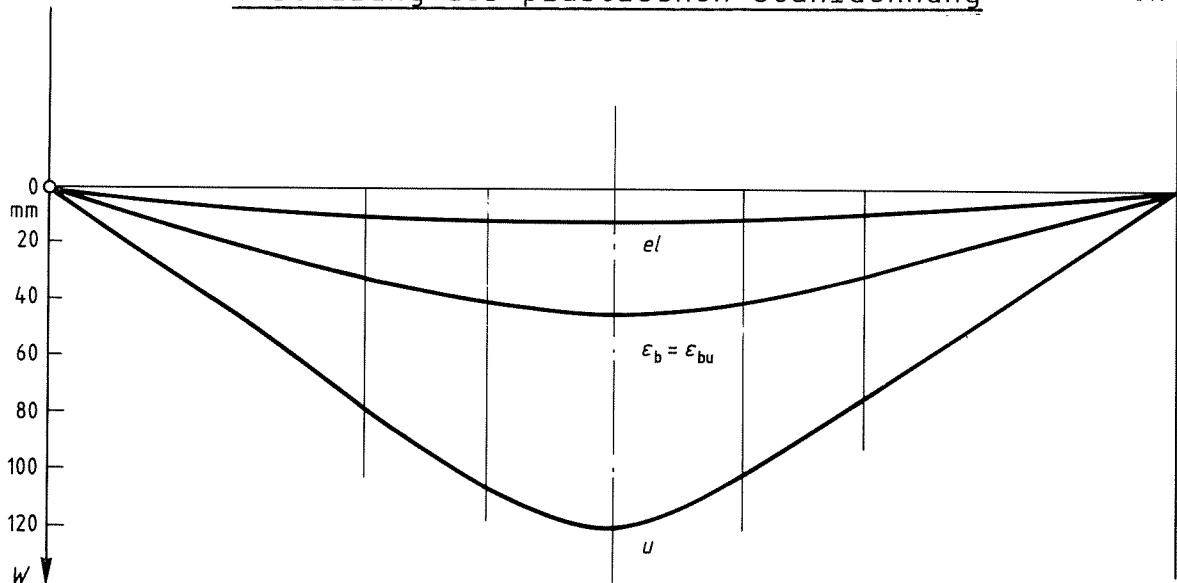
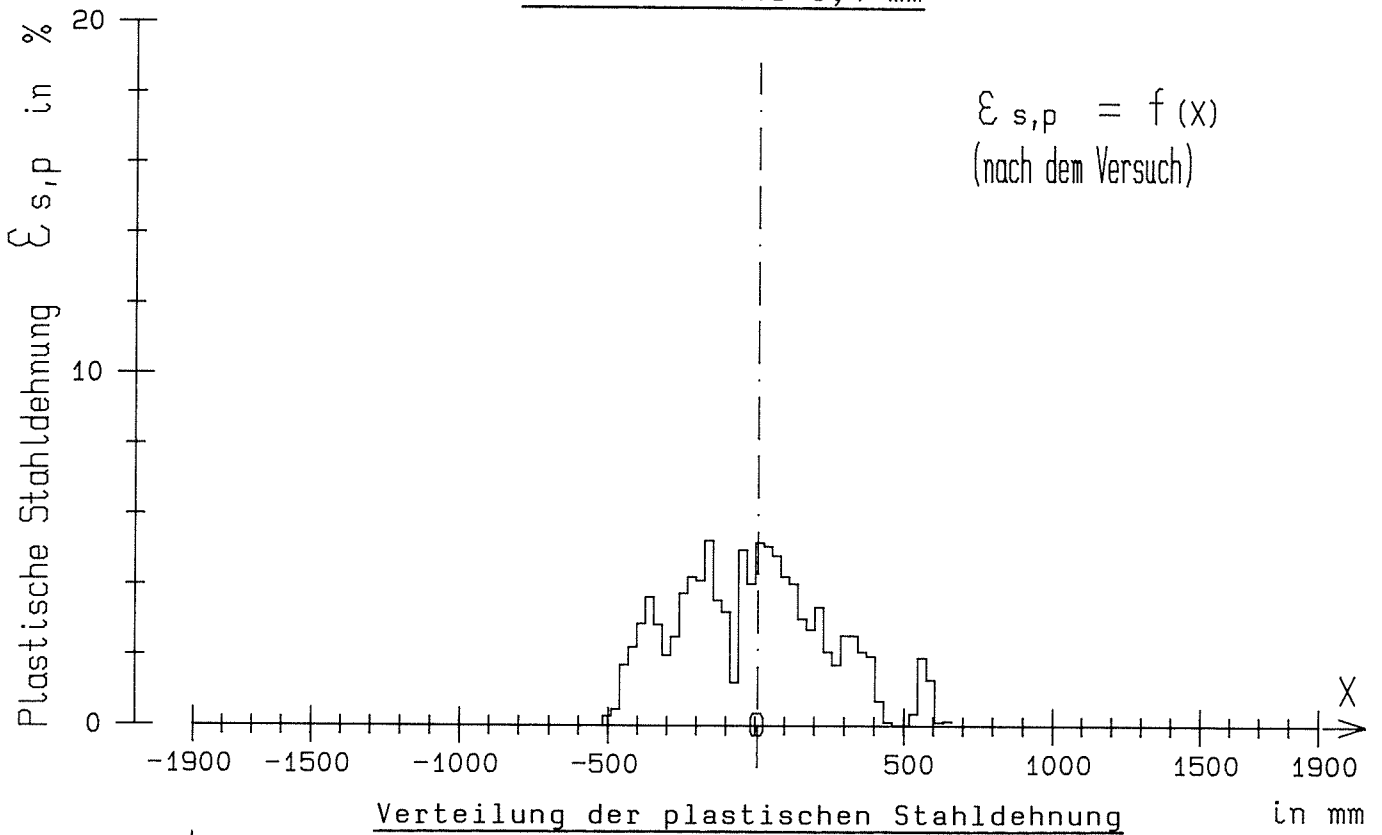
Balken	Biegezugbewehrung						Höhen und Rißbild				Momente			plastisches Gelenk					Balken	
	Anzahl und Durchmesser	Streckgrenze $R_e$	Zugfestigkeit $R_m$	$\frac{R_m}{R_e}$	Länge des Lüders-Bereichs $\epsilon_F$	Bewehrungsgrad geometrisch $\mu_{2, Ist}$	mechanisch $\omega_{2, Ist}$	stat. Höhe $h_{Ist}$	Höhe <sup>1)</sup> der Druckzone $h_x$	mittl. Rißabstand $a_R$	Anzahl der Risse mit $w_R \geq 1,0mm$	plastisches Moment $M_p$	Moment bei $\epsilon_{bu} = 1$ $M_{\epsilon_{bu}}$	max. Moment $maxM$	plastische Länge $l_p$	max. Dehnungen Stahl $\epsilon_{s,p}$	Beton $\epsilon_{b }$	max. Drehung des plast. Gelenks $\vartheta_u$		Versagen durch Bruch im:
-	mm	N/mm <sup>2</sup>	-	-	%	-	-	mm	-	-	-	kNm			mm	%	‰	rad·10 <sup>-3</sup>	-	-
R10	4 $\phi$ 10	510	670	1,31	1,6	0,51	10,3	387	42	139	7	62	70,5	71,5	1140	5,2	3,2	35,5	Beton <sup>9)</sup>	R10
Plz10		507	654	1,29	1,7	0,49	9,97	398	100	219	1	95,6	86,2	95,6	660	6)	2,9	23,1	Beton <sup>9)</sup>	Plz10
Plz10-F		508	650	1,28	1,7	0,48	9,76	407	72	188	1	86	83,4	86	400	13,07)	3,4	31,1	Beton <sup>9)</sup>	Plz10-F
Plz10-F, oM.		499	653	1,31	1,5	0,48	9,64	405	-8)	211	5	75	79	82	1010	9,8	-8)	32,5	Beton <sup>9)</sup>	Plz10-F, oM.
R16	4 $\phi$ 16	487	619	1,27	1,7	1,32	25,7	380	105	128	3	140	138	140	440	2,1	3,1	15,7	Beton <sup>9)</sup>	R16
Plz16		515	709	1,38	0,5	1,26	25,8	399	110	147	3	174	176	176	440	1,7	3,2	13,2	Beton <sup>9)</sup>	Plz16
Plz16-F		518	708	1,37	0,5	1,27	26,2	396	115	194	3	182	186	186	760	2,5	3,2	17,4	Beton <sup>9)</sup>	Plz16-F

1) bei Versagensbeginn der Druckzone  
 2) aus der Verteilung der Betondehnungen abgeschätzt (s. Bilder 7 bis 13)  
 3) Länge des Bereichs plastischer Stahldehnungen  
 4) bei Versuchsende  
 5) Absolutwerte der maximalen Betondehnungen in der Druckzone

6) nach Bruch der Druckzone  
 7) ohne Einschnürung  
 8) Betondehnungen nicht gemessen  
 9) der Druckzone

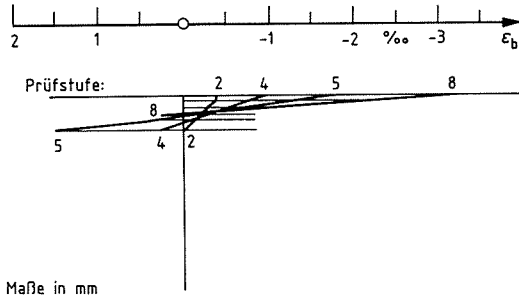
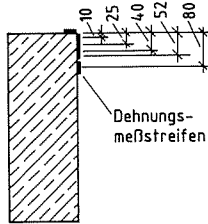


0,5    0,5    1,2    4,0    6,0    4,4    4,2    1,5    0,6 mm    Prüfstufe 10  
Rißweiten über 0,4 mm



Durchbiegungen am Ende des elastischen Zustands (el) bei Versagensbeginn der Druckzone ( $\epsilon_{bu}$ ) und bei Versuchsende (u)

Balken  
**R 10**



Betondehnungen in Feldmitte

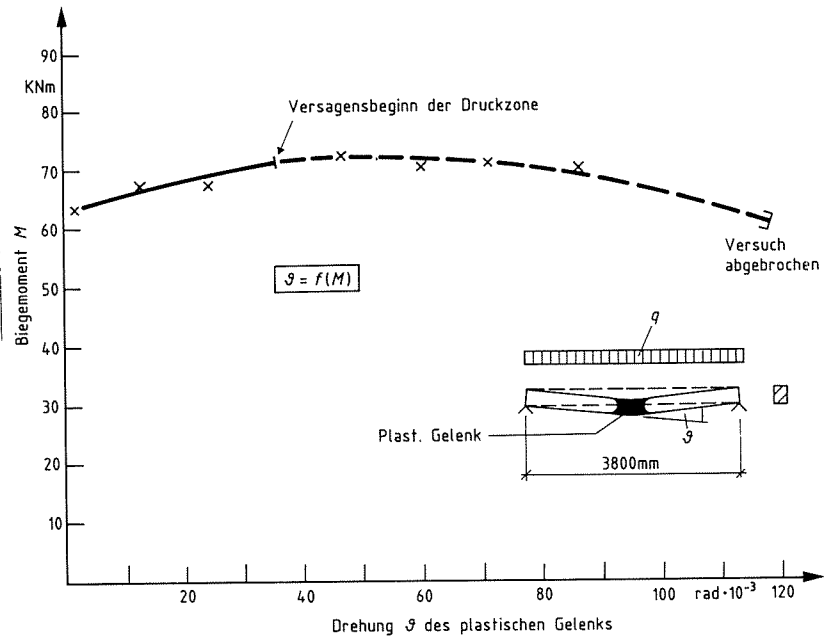
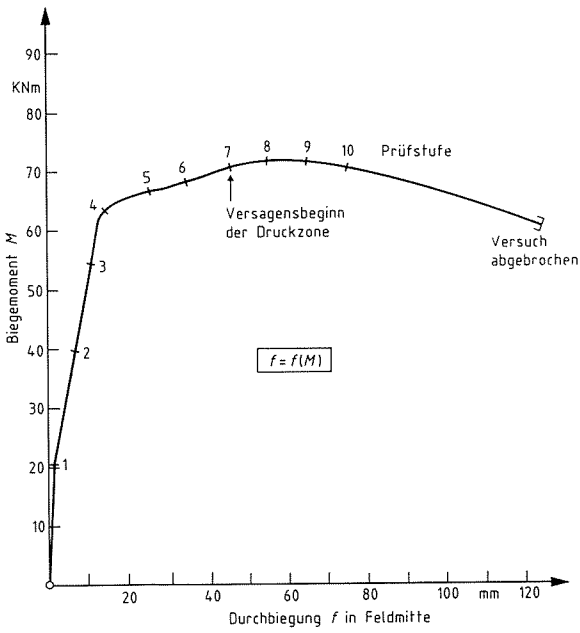
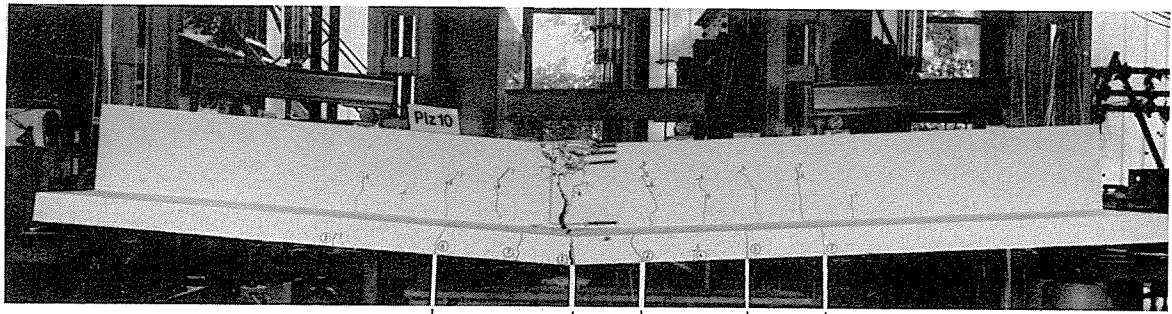
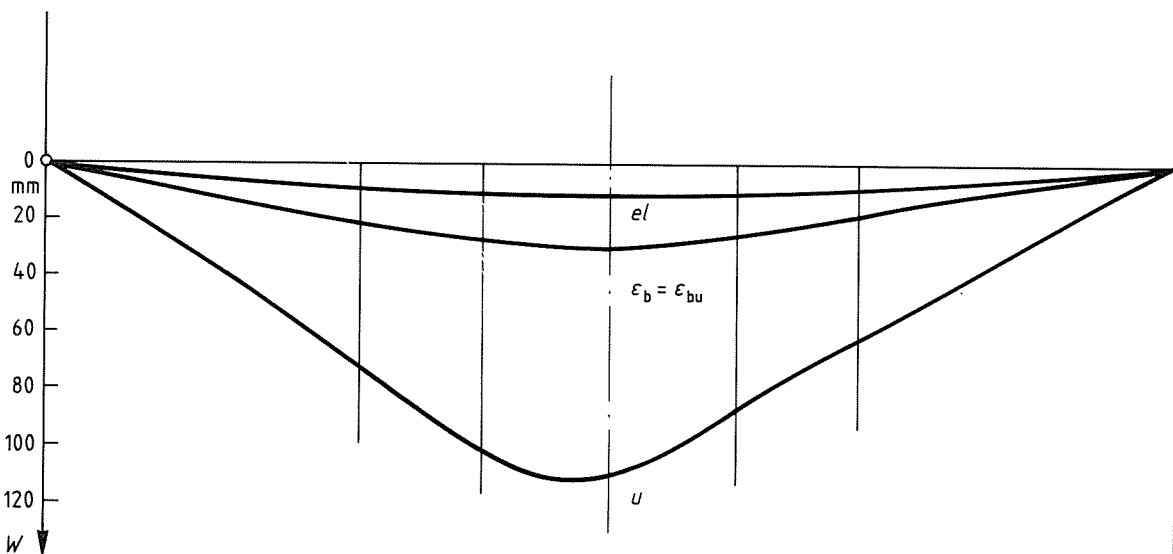
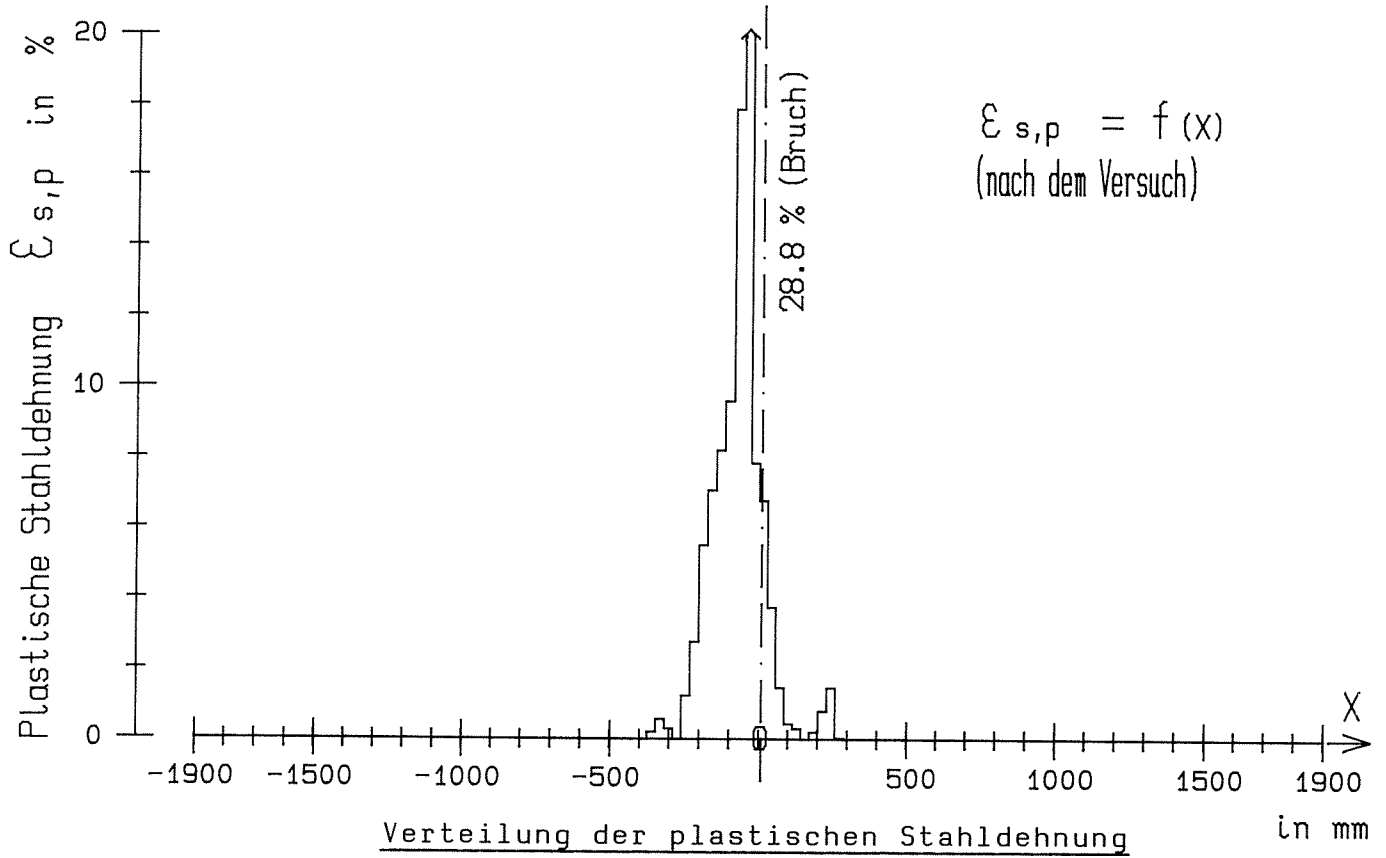


Bild 7  
 Rißbild, Wege, Dehnungen, Biegemomente und Drehungen des Balkens  
 R10 (Rechteckbalken, 4 Ø 10 mm, BSt 500 S)



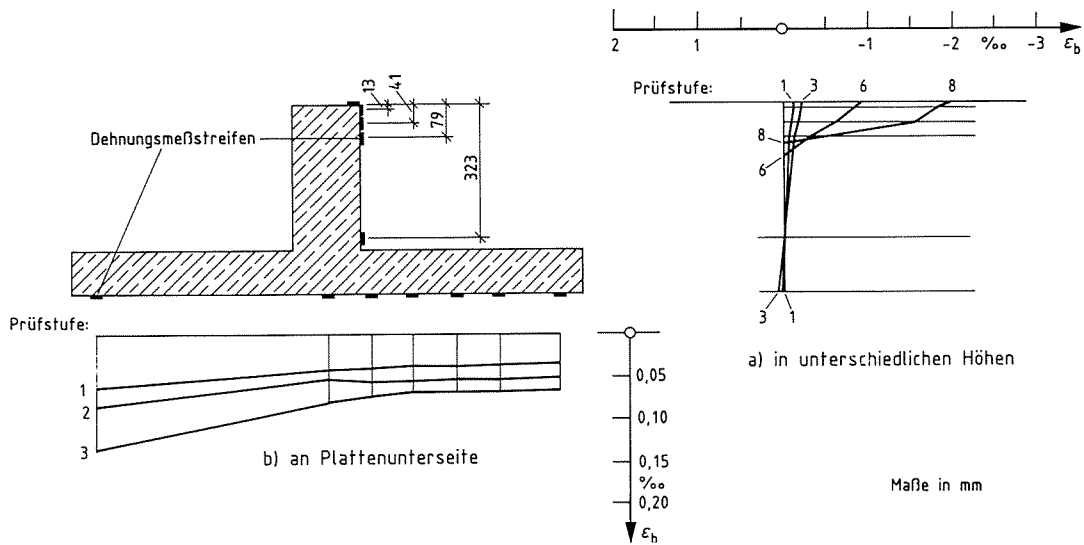
0,5 27,0 0,5 0,5 0,5 mm  
Rißweiten über 0,4 mm

Prüfstufe 10



Durchbiegungen am Ende des elastischen Zustands (el) bei Versagensbeginn der Druckzone ( $\epsilon_{bu}$ ) und bei Versuchsende (u)

**Balken**  
**PLz 10**



Betondehnungen in Feldmitte

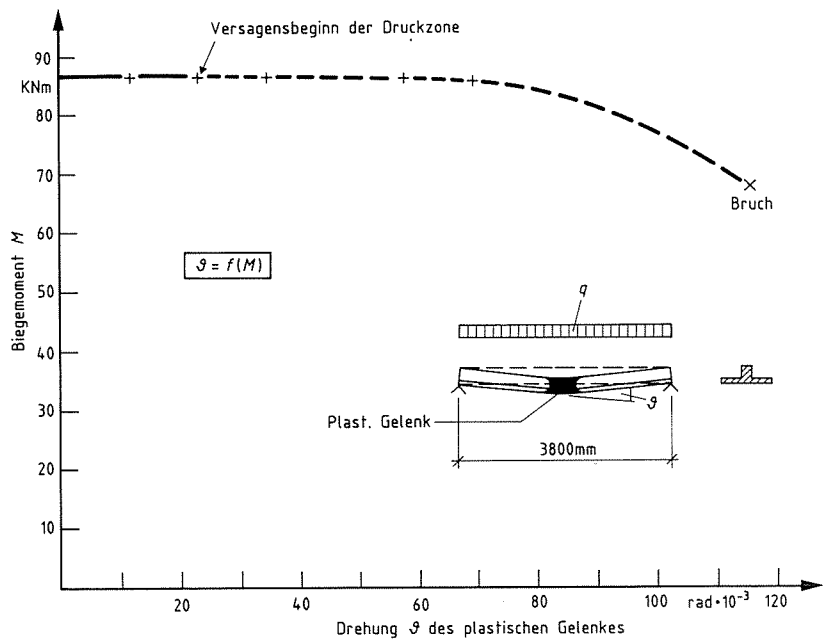
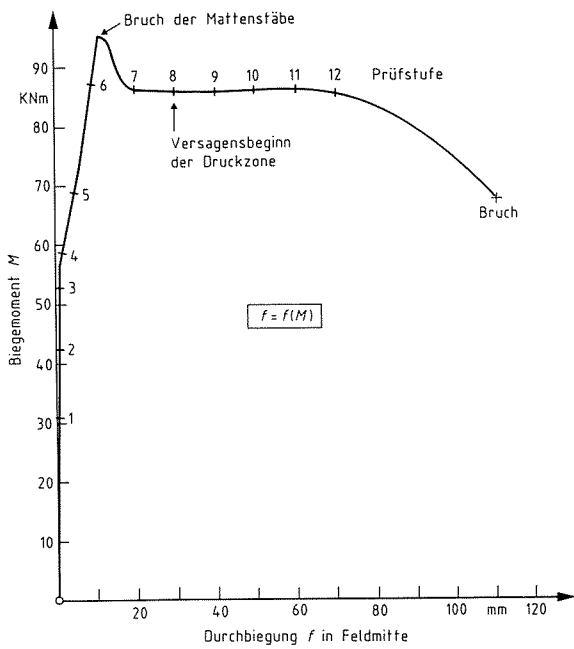
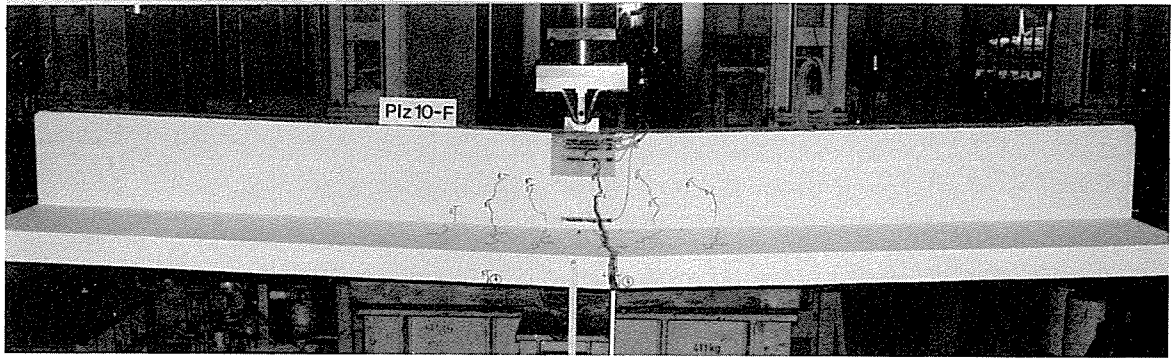


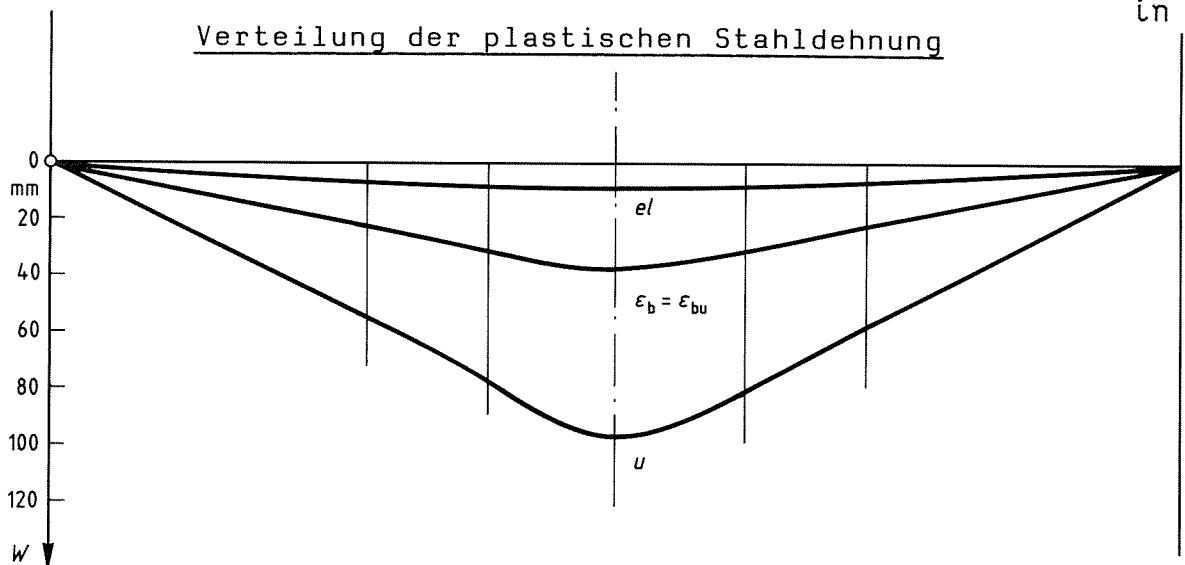
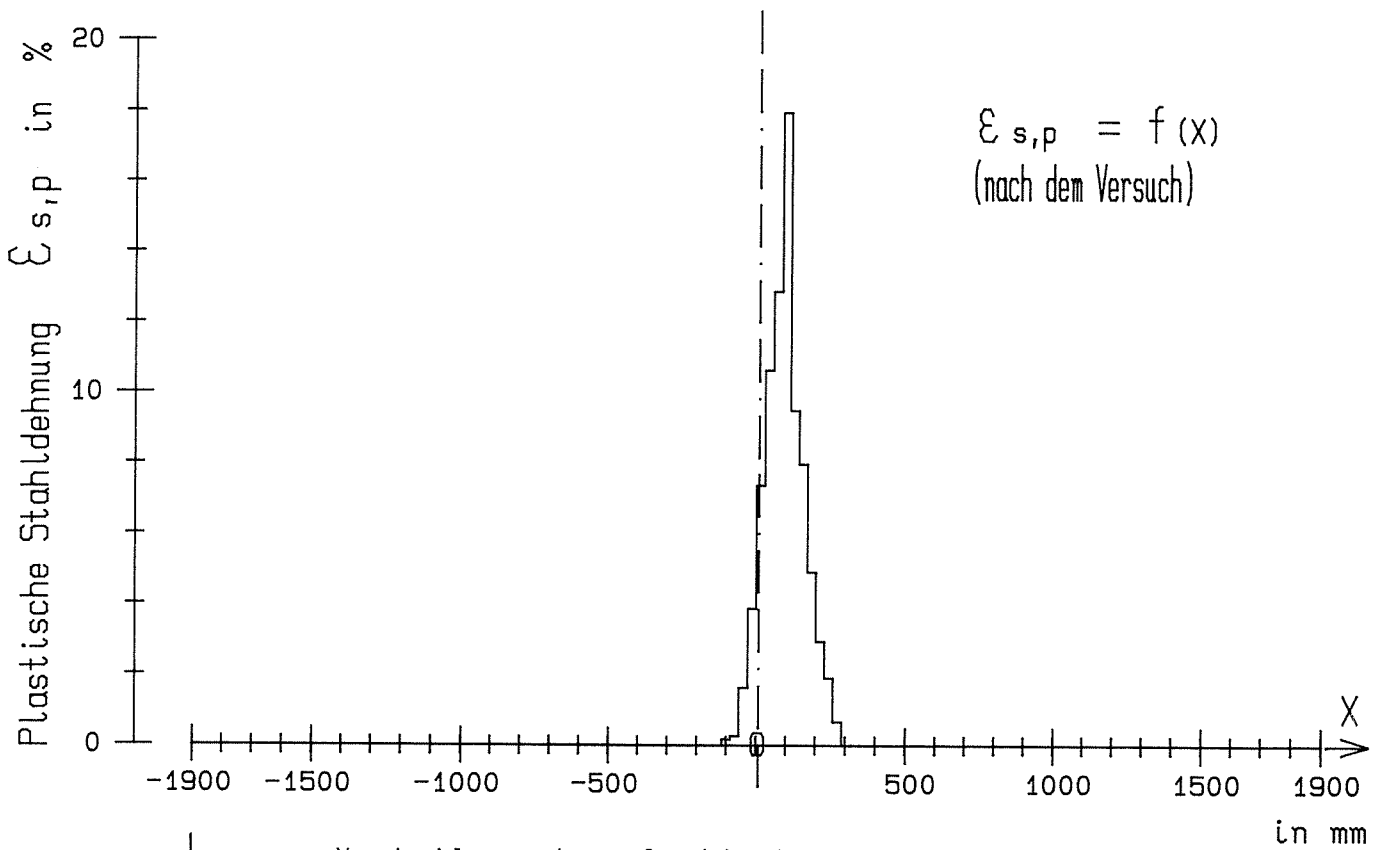
Bild 8  
 Rißbild, Wege, Dehnungen, Biegemomente und Drehungen des Balkens  
 Plz 10 (Plattenbalken, 4 Ø 10 mm, BST 500 S)



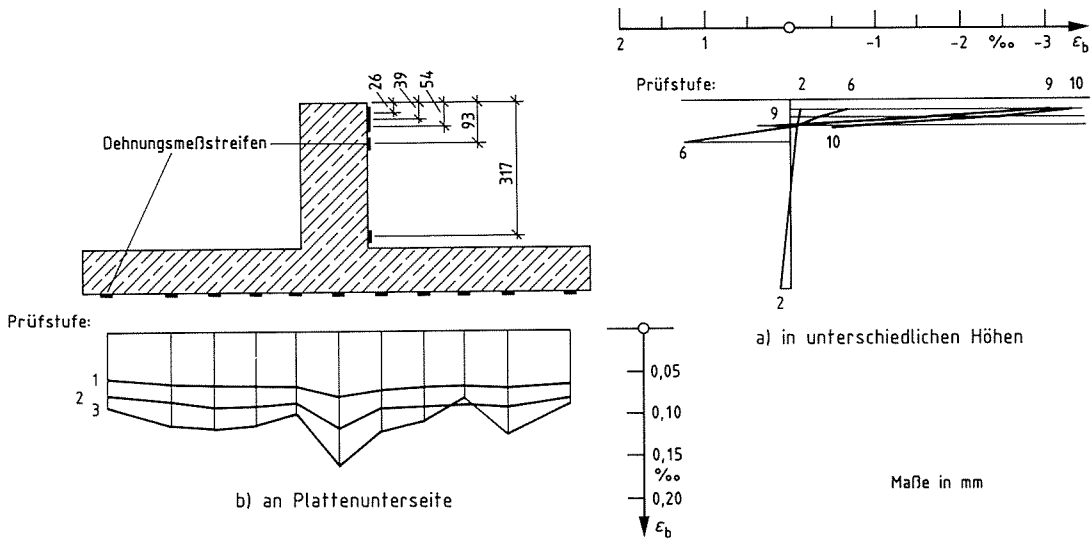
18,0

Rißweiten über 0,4 mm

Prüfstufe 11



Durchbiegungen am Ende des elastischen Zustands (el) bei Versagensbeginn der Druckzone ( $\epsilon_{bu}$ ) und bei Versuchsende (u)



Betondehnungen in Feldmitte

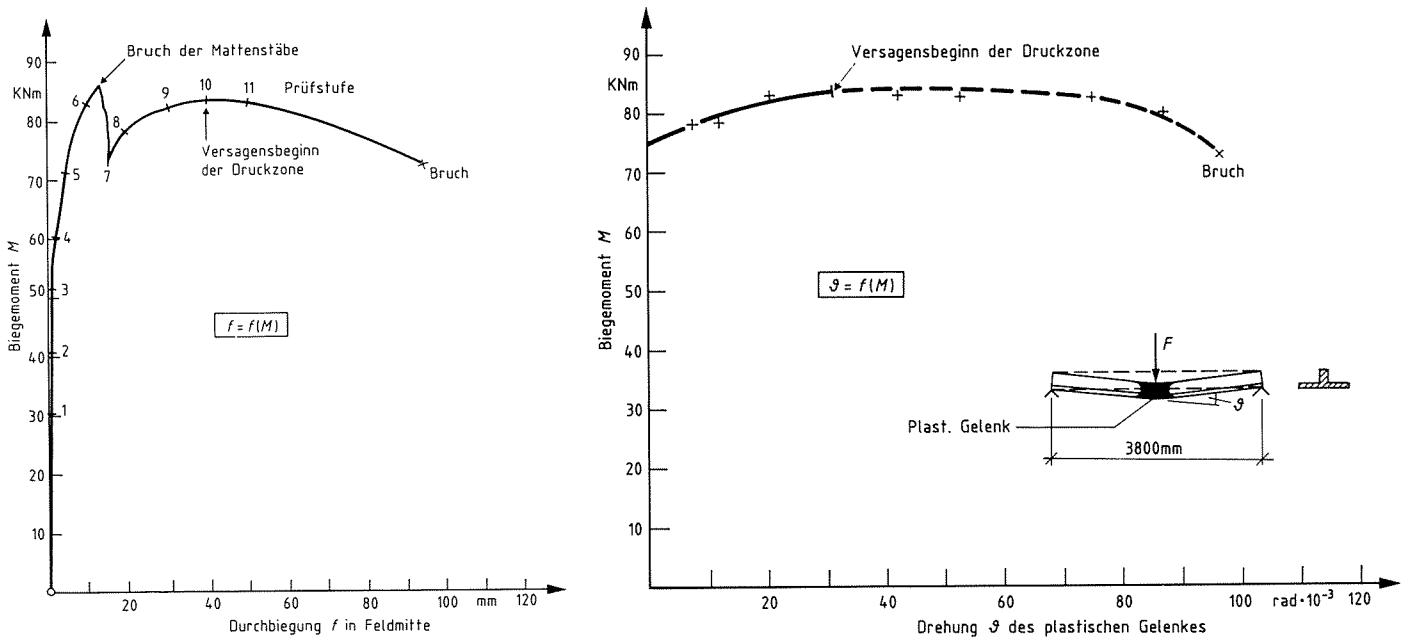
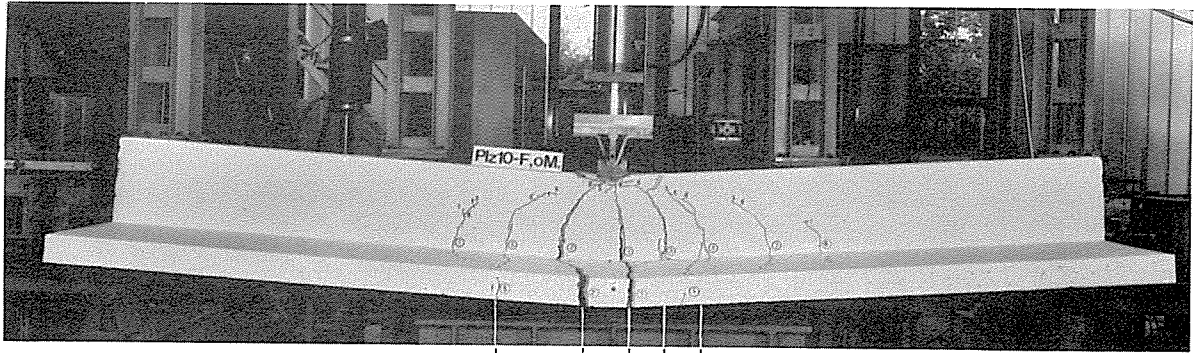


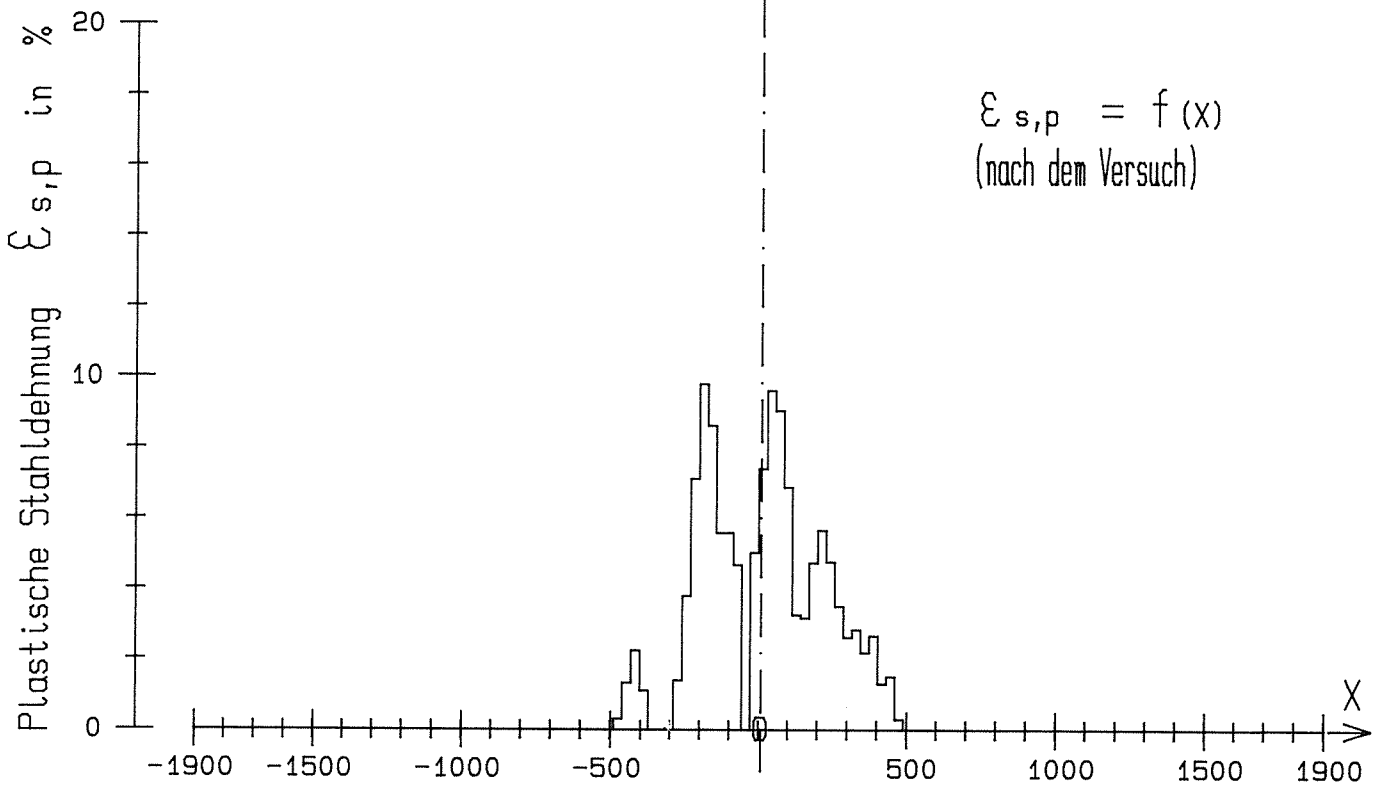
Bild 9  
 Reißbild, Wege, Dehnungen, Biegemomente und Drehungen des Balkens  
 Plz 10-F (Plattenbalken, 4 Ø 10 mm, BSt 500 S)



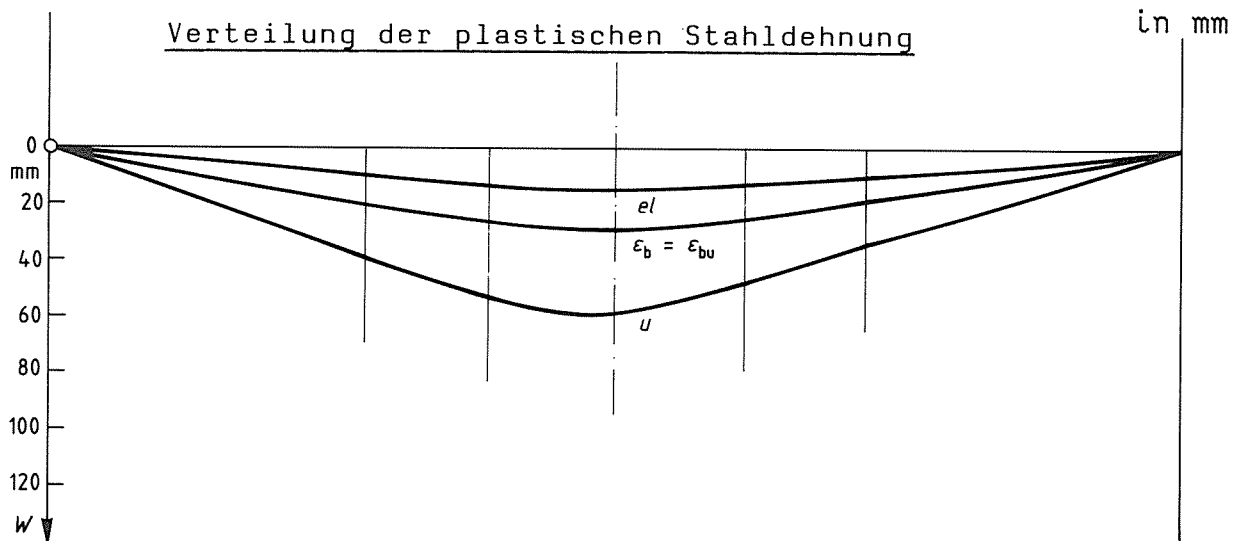
1) am Steg gemessen

nach dem Versuch

Rißweiten über 0,4 mm



Verteilung der plastischen Stahldehnung



Durchbiegungen am Ende des elastischen Zustands (el) bei Versagensbeginn der Druckzone ( $\epsilon_{bu}$ ) und bei Versuchsende (u)



Balken  
**PLz10-F,oM**

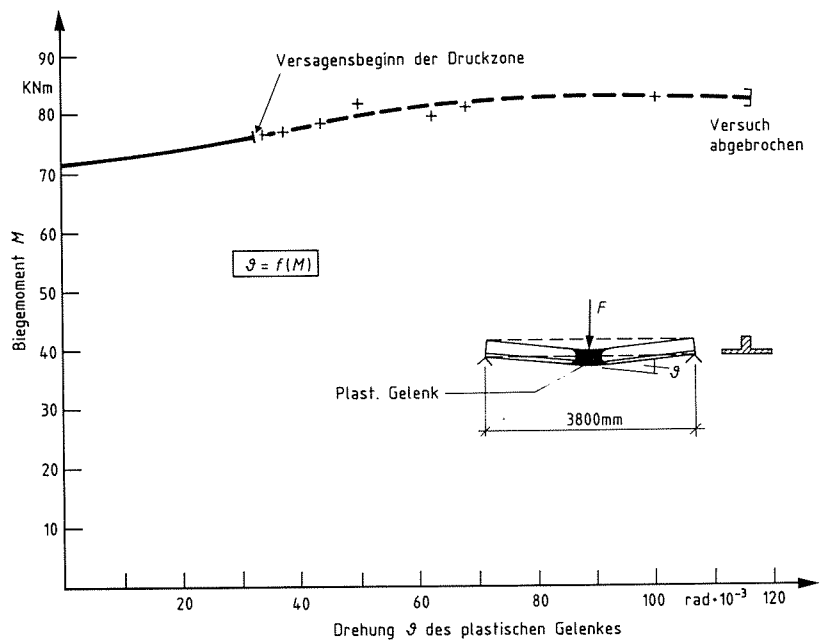
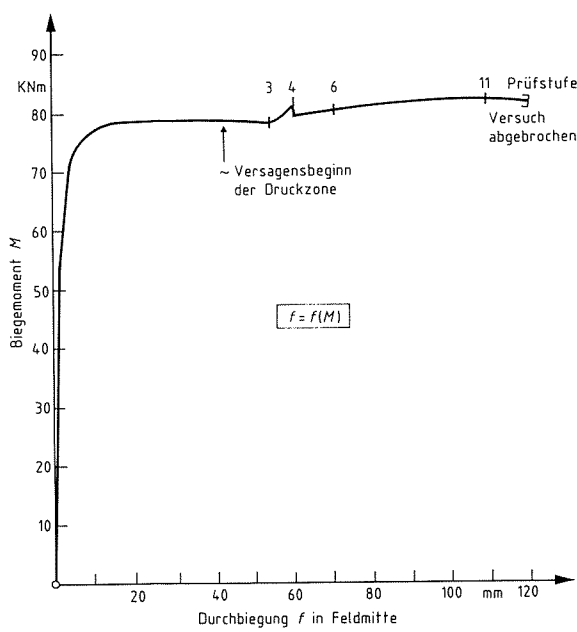
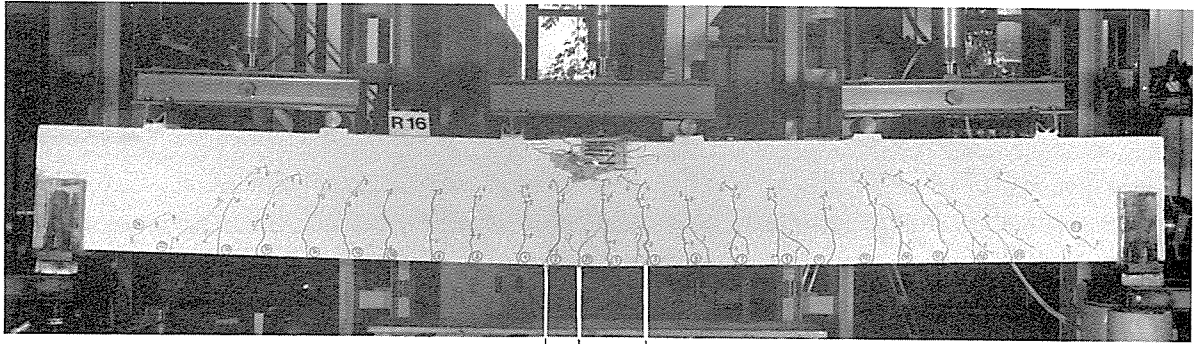
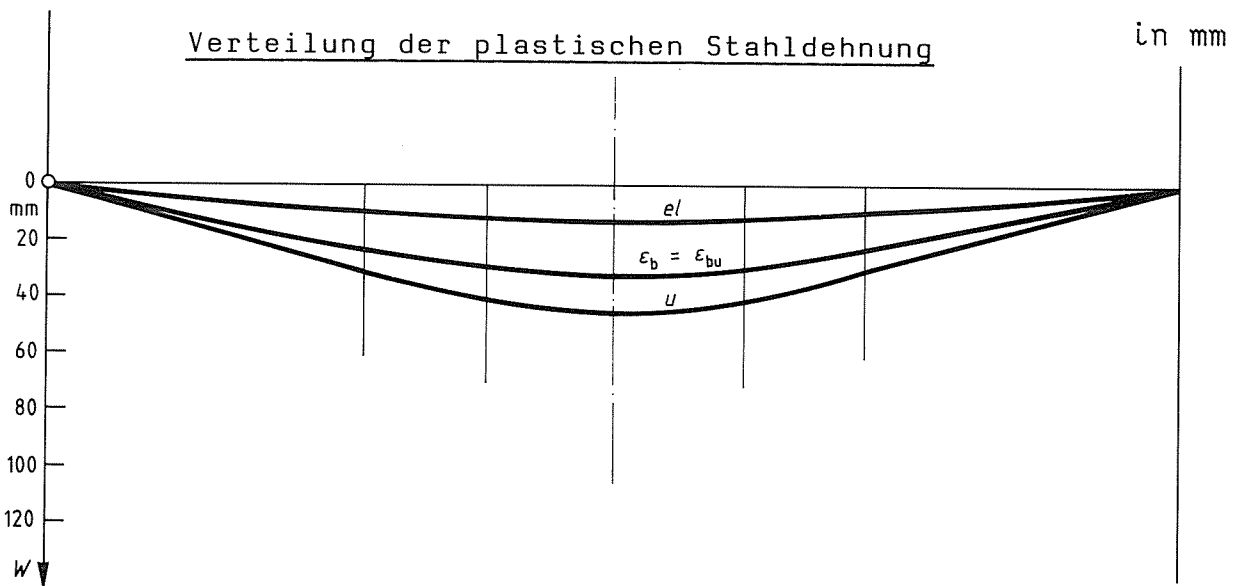
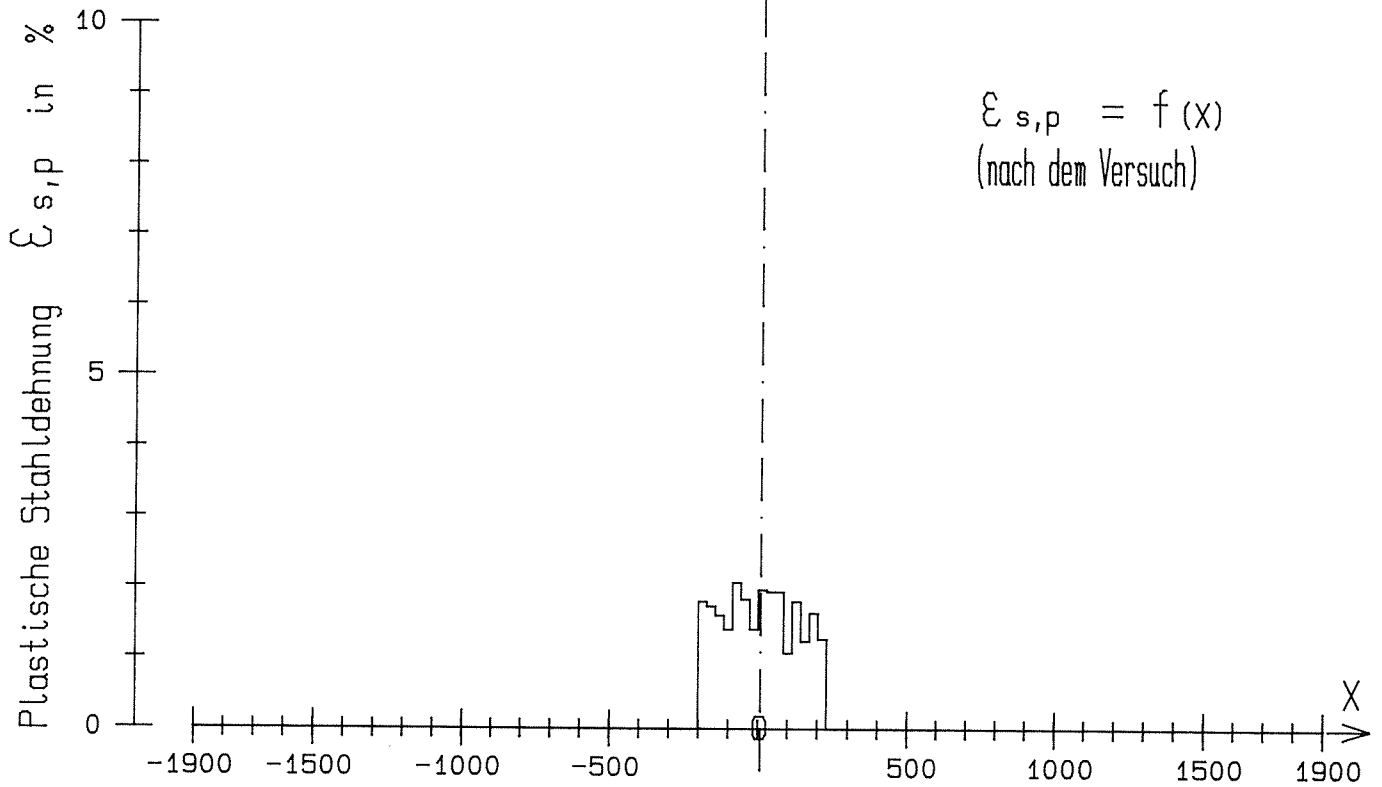


Bild 10  
 Rißbild, Wege, Dehnungen, Biegemomente und Drehungen des Balkens  
 Plz 10-F,oM. (Plattenbalken, 4  $\varnothing$  10 mm, BSt 500 S).  
 Bei diesem Balken wurden keine Betondehnungen gemessen

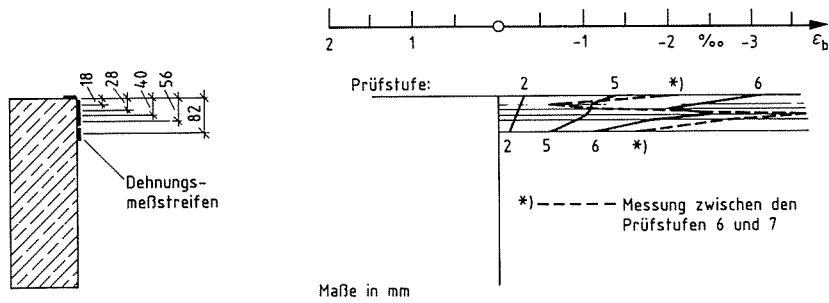


Prüfstufe 7

2,0 1,8  
1,5  
Rißweiten über 0,4 mm



Durchbiegungen am Ende des elastischen Zustands ( $el$ ) bei Versagensbeginn der Druckzone ( $\epsilon_{bu}$ ) und bei Versuchsende ( $u$ )



Betondehnungen in Feldmitte

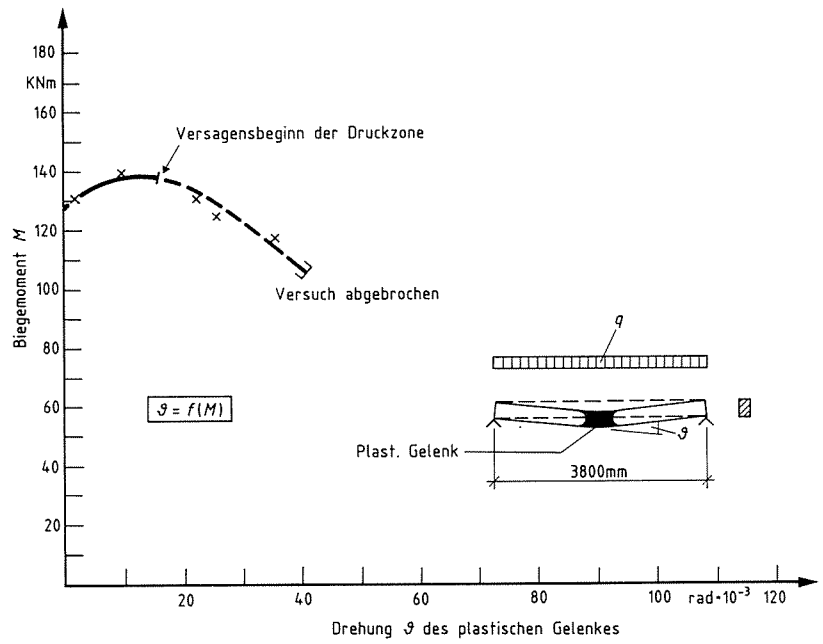
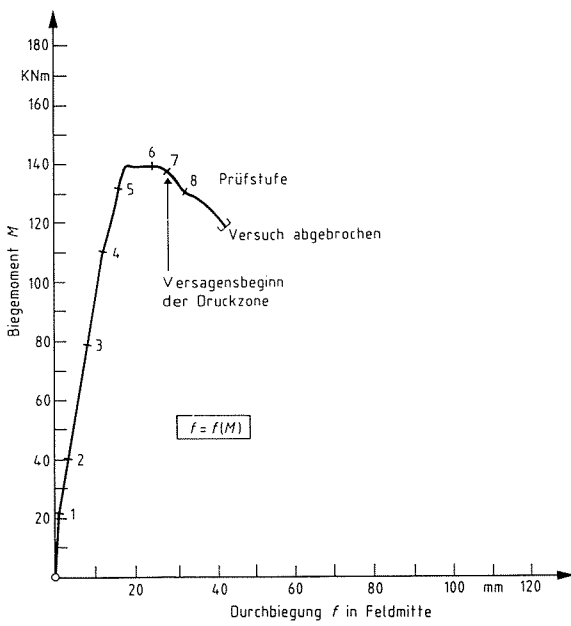
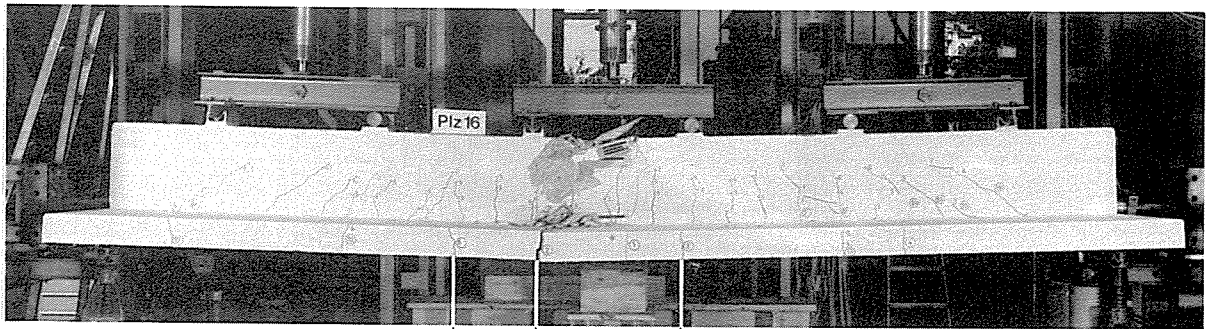


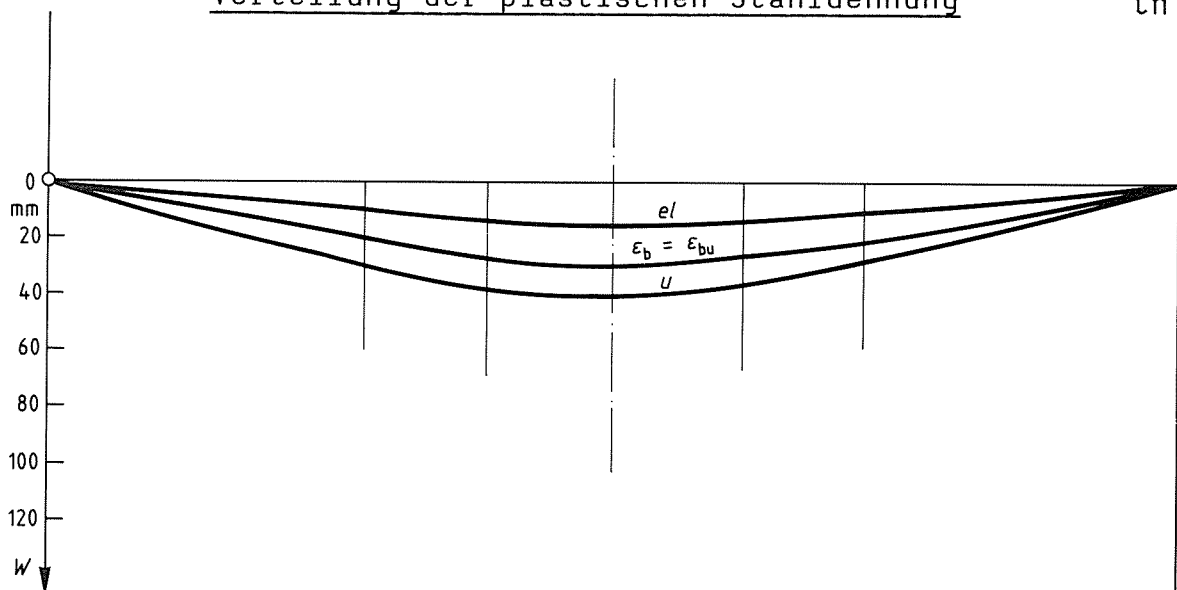
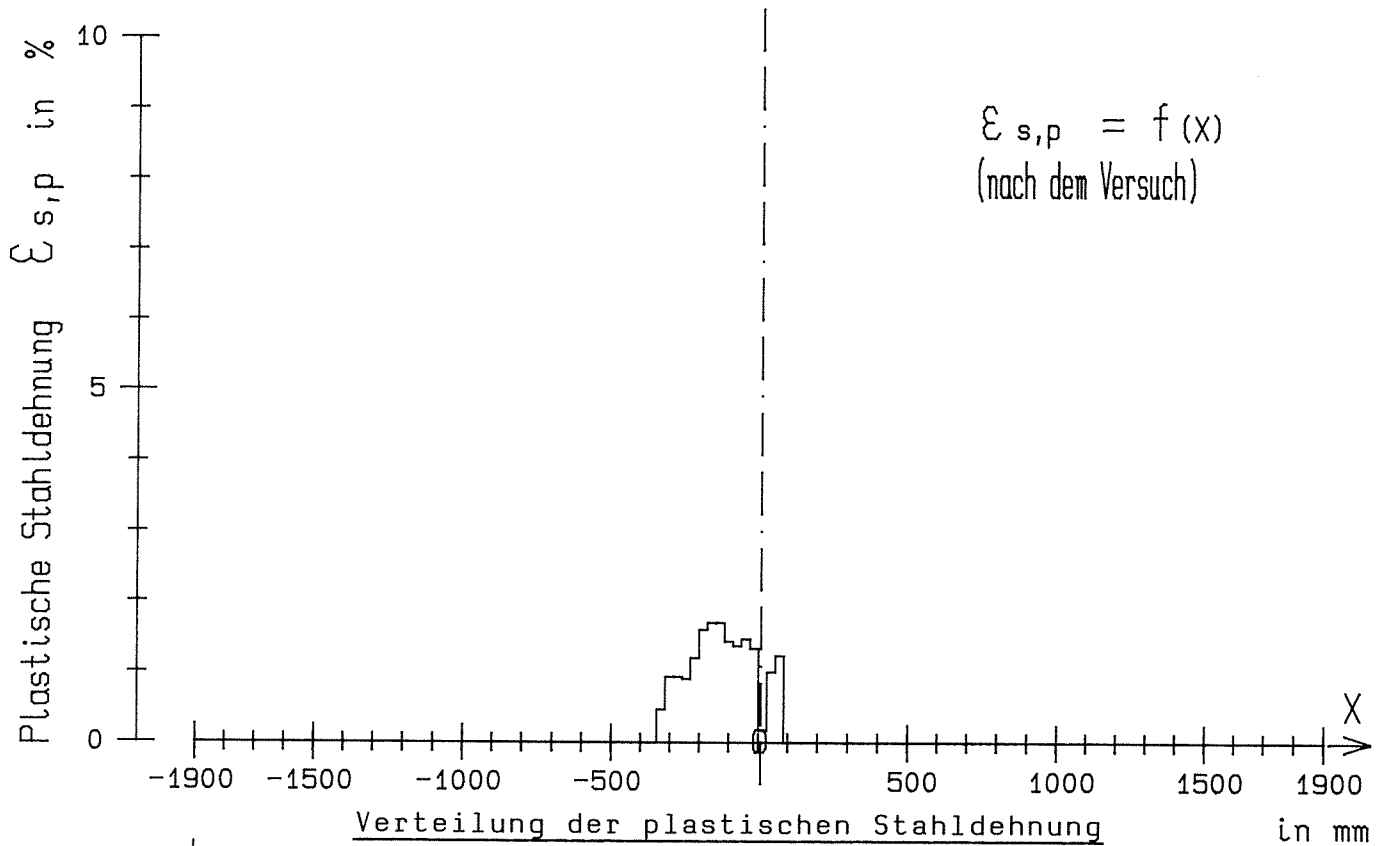
Bild 11  
 Reißbild, Wege, Dehnungen, Biegemomente und Drehungen des Balkens  
 R16 (Rechteckbalken, 4 Ø 16 mm, BSt 500 S)



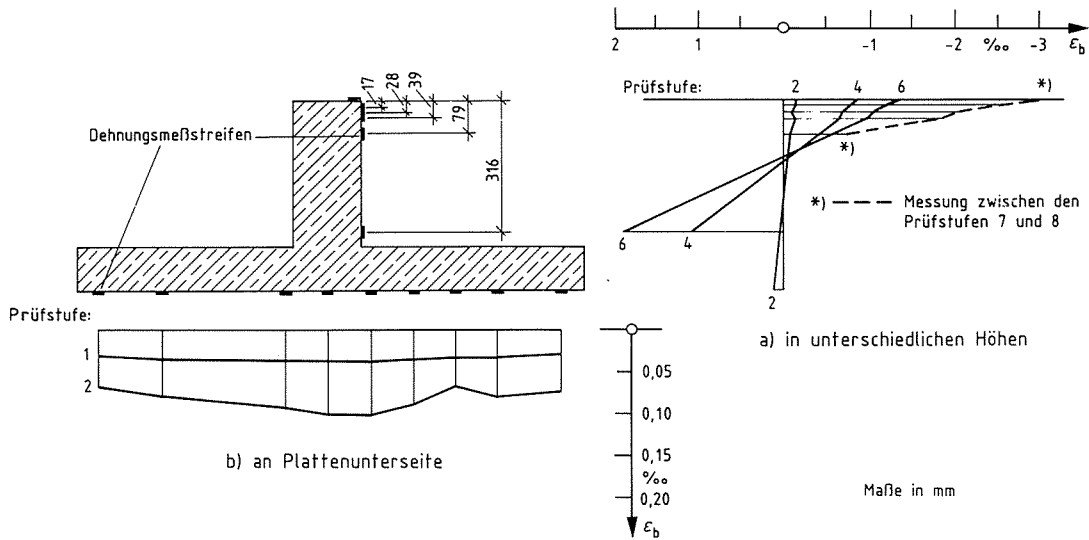
1,0 7,1 2,4

Prüfstufe 7

Rißweiten über 0,4 mm



Durchbiegungen am Ende des elastischen Zustands (el) bei Versagensbeginn der Druckzone ( $\epsilon_{bu}$ ) und bei Versuchsende (u)



Betondehnungen in Feldmitte

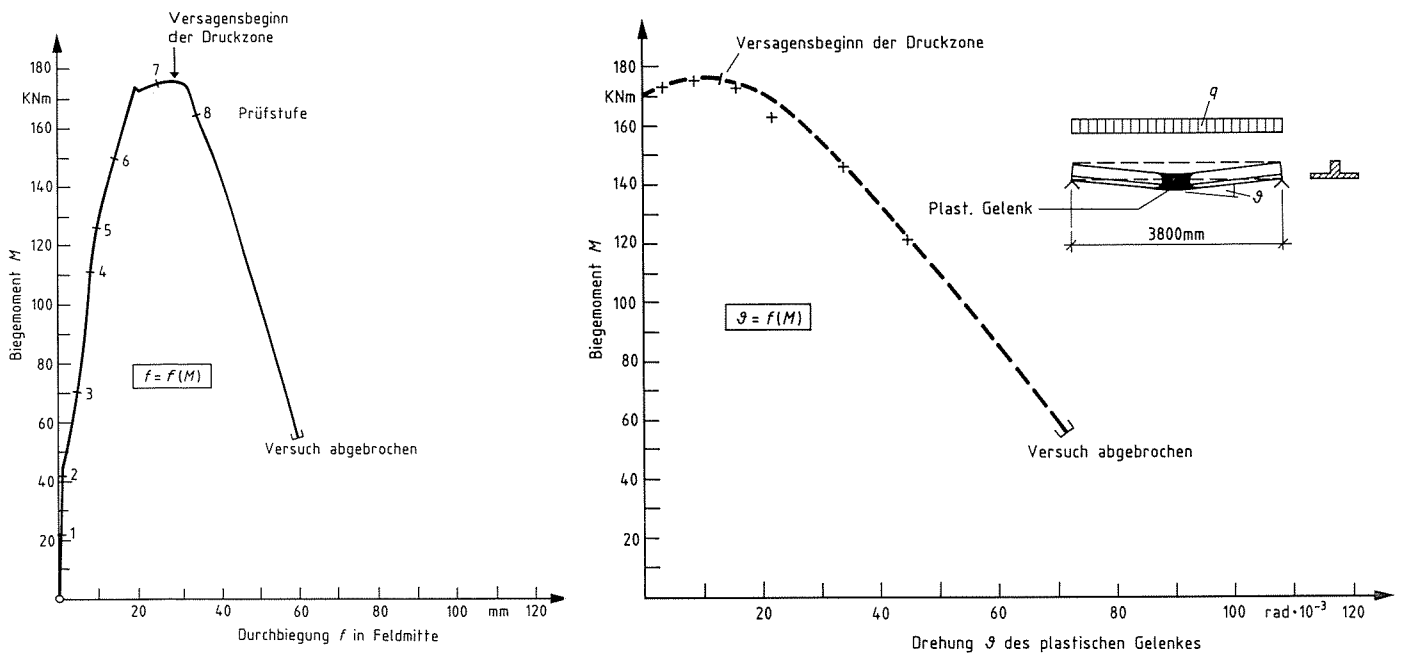
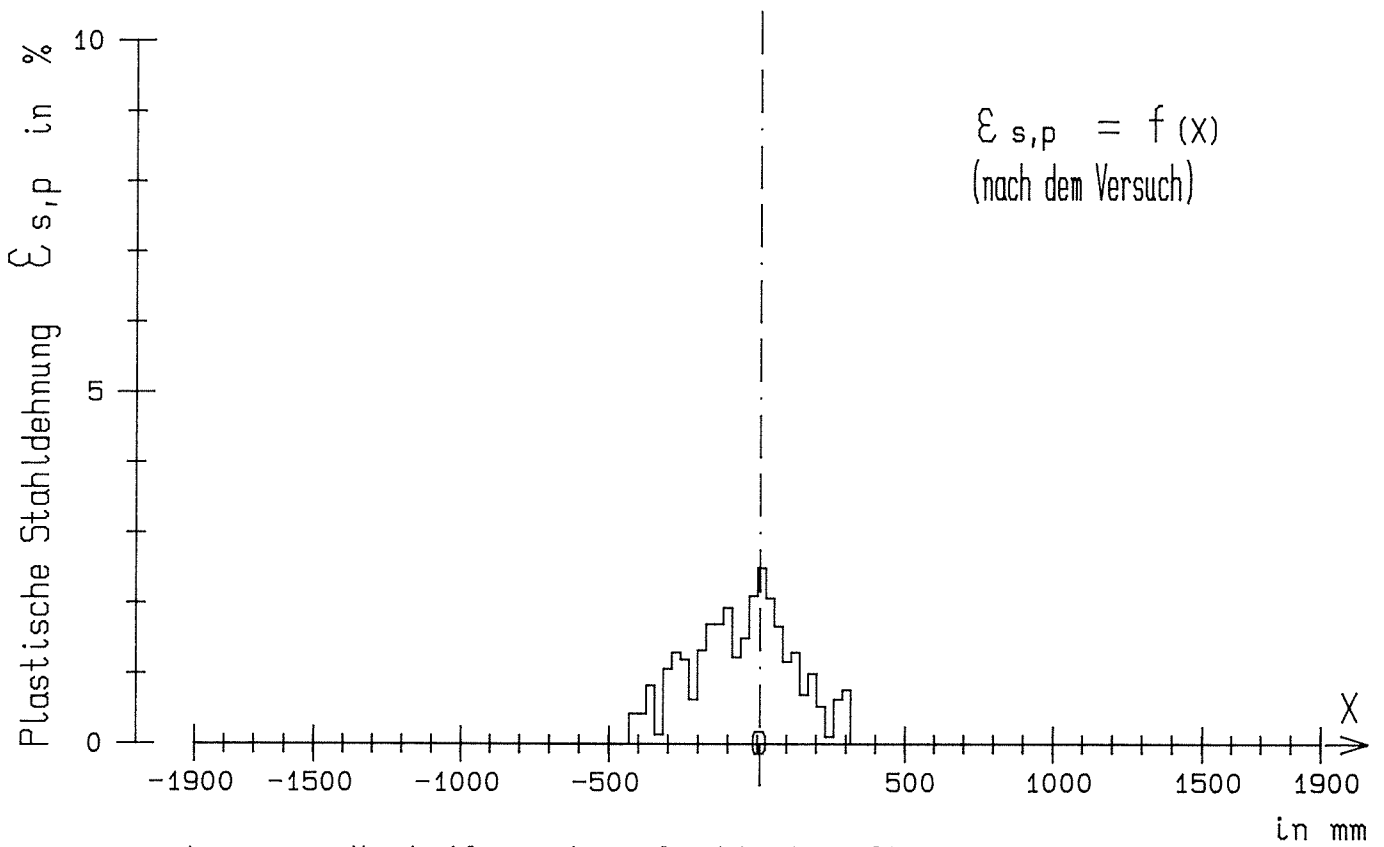
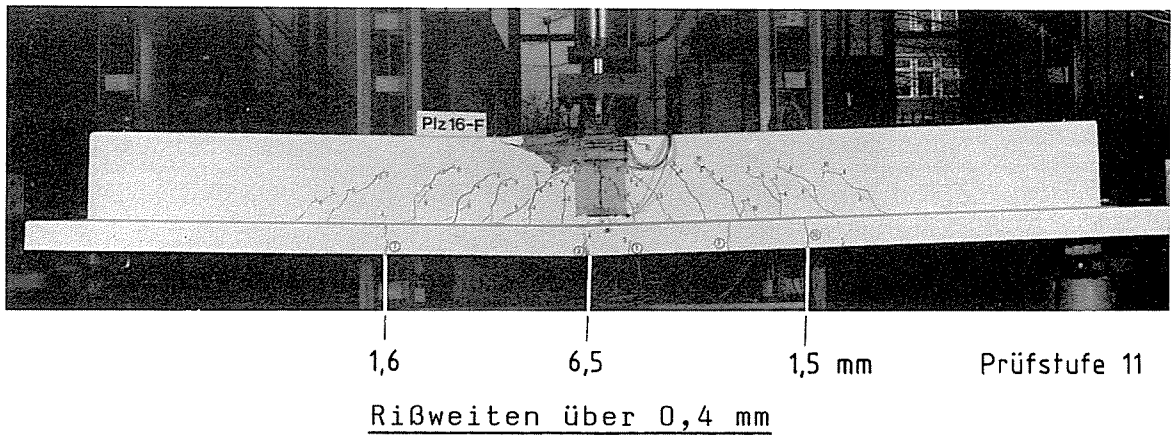
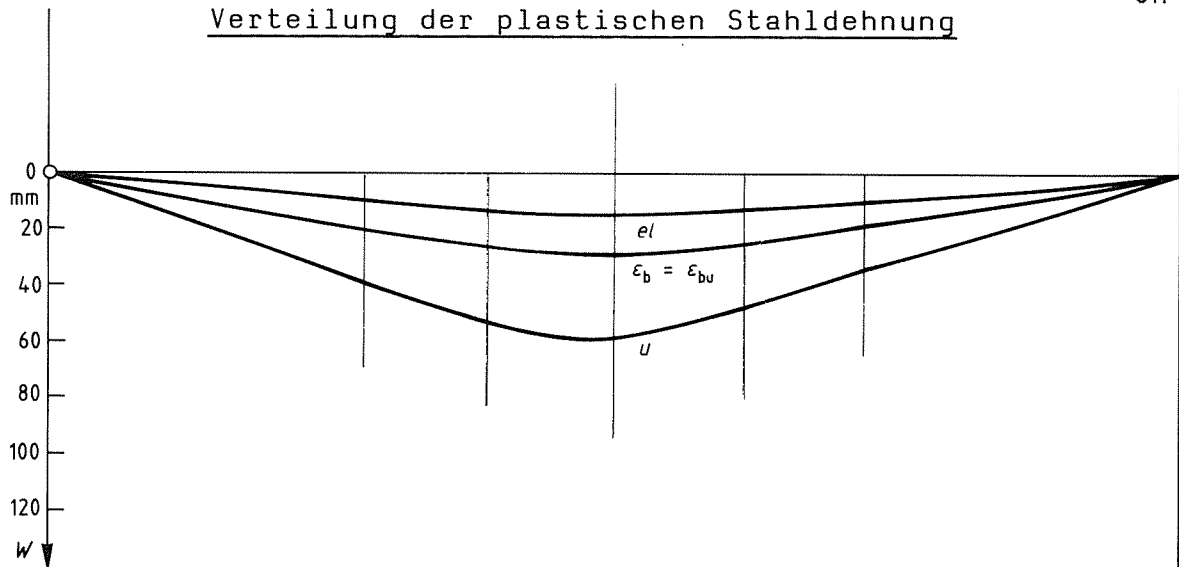


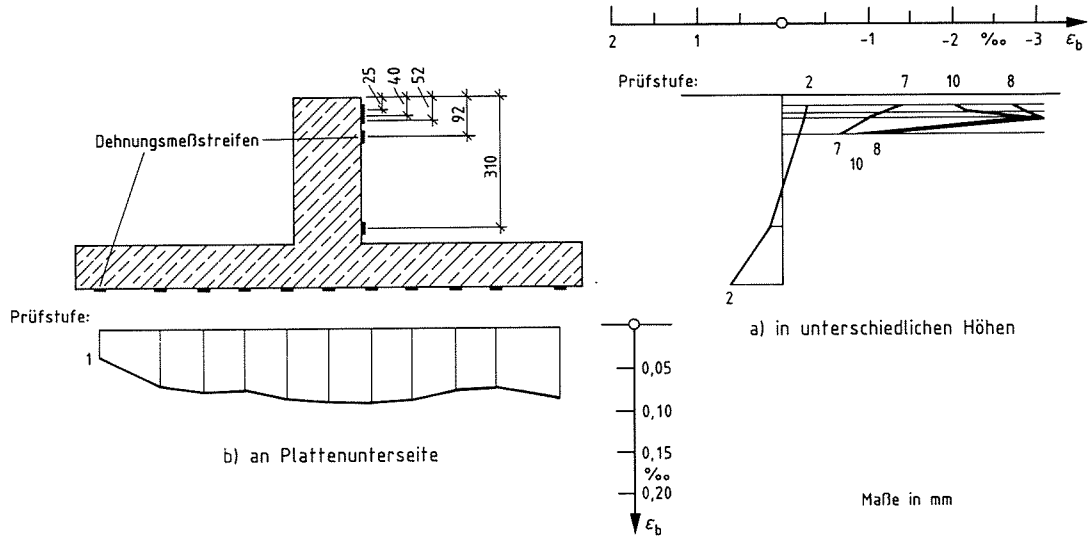
Bild 12  
 Rißbild, Wege, Dehnungen, Biegemomente und Drehungen des Balkens  
 Plz 16 (Plattenbalken, 4 Ø 16 mm, BSt 500 S)



Verteilung der plastischen Stahldehnung



Durchbiegungen am Ende des elastischen Zustands (el) bei Versagensbeginn der Druckzone ( $\epsilon_{bu}$ ) und bei Versuchsende (u)



Betondehnungen in Feldmitte

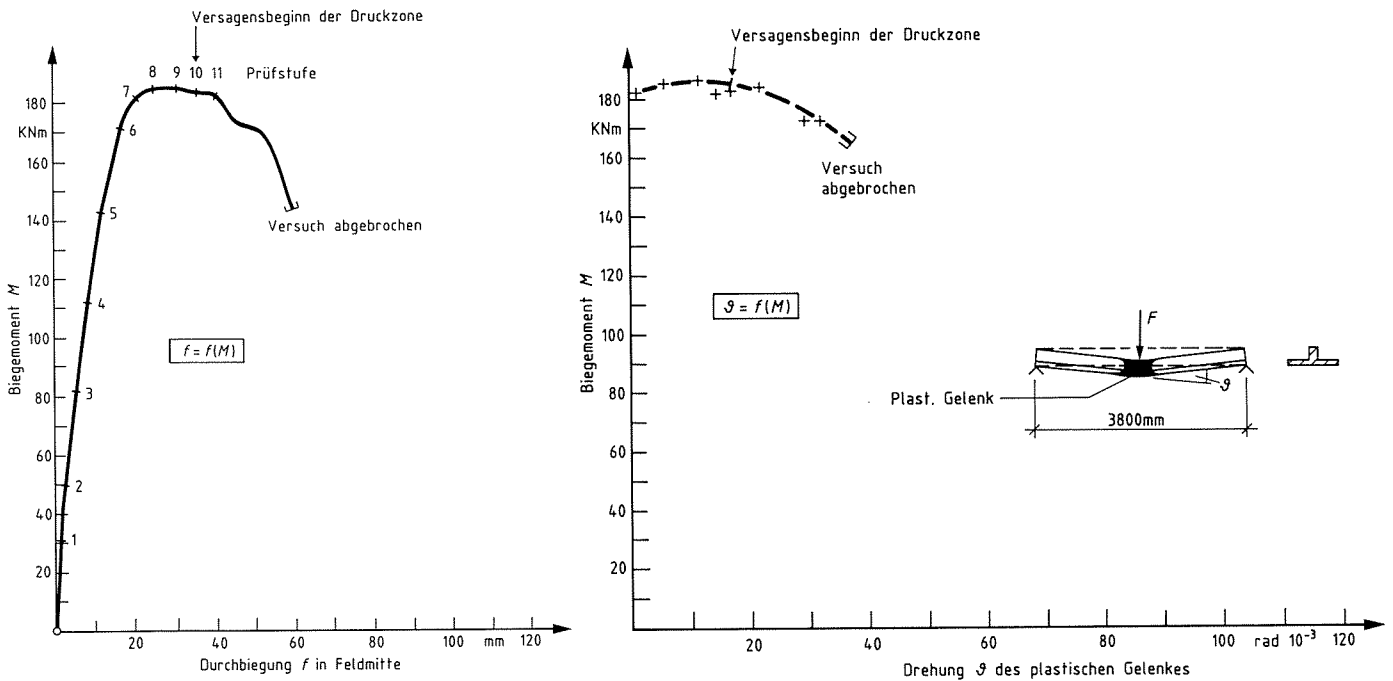


Bild 13  
 Rißbild, Wege, Dehnungen, Biegemomente und Drehungen des Balkens  
 PLz 16-F (Plattenbalken, 4 Ø 16 mm, BSt 500 S)

#### 4.3.2 Vergleichende Betrachtung der Versuchsergebnisse

Die Drehfähigkeit der plastischen Gelenke wurde in allen sieben Balken durch Versagen des Betons der Druckzone erreicht, wenn erste Risse in der Druckzone als beginnendes Versagen des plastischen Gelenks gewertet werden. Bei den schwächer bewehrten Balken (4 Ø 10 mm) bildete sich jedoch unterhalb der zerstörten Druckzone eine neue Druckzone, die aufgrund der jetzt vorliegenden Teilflächenbelastung eine höhere Tragfähigkeit aufwies als die erste zerstörte. Da die Stähle durch die höheren Stahlspannungen im Verfestigungsbereich ebenfalls höhere Zugspannungen aufnehmen konnten, sank die Tragfähigkeit der Balken trotz des nun kleineren Hebelarms zwischen Druck- und Zugkraft nur geringfügig, und die Balken erreichten nach Versagensbeginn der Druckzone noch erhebliche Verformungen (s. Bild 14). Bei den stärker bewehrten Balken (4 Ø 16 mm) war dagegen mit dem Versagensbeginn der Druckzone die Tragfähigkeit der Balken erschöpft (s. Bild 15).

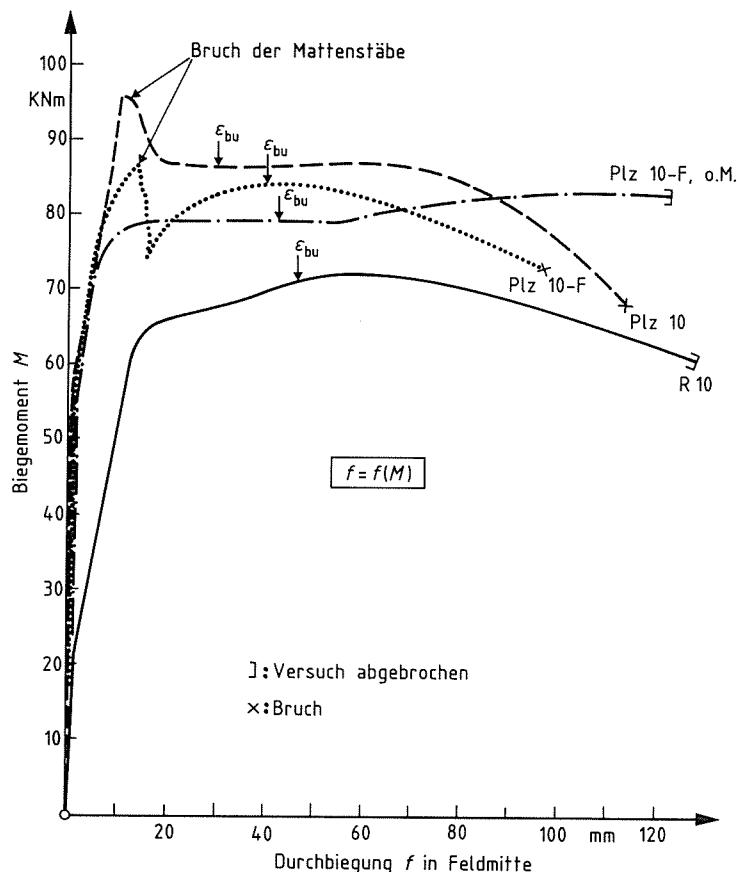


Bild 14  
Gegenüberstellung der Durchbiegungen in Feldmitte in Abhängigkeit vom Biegemoment aller mit 4 Ø 10 mm bewehrten Balken



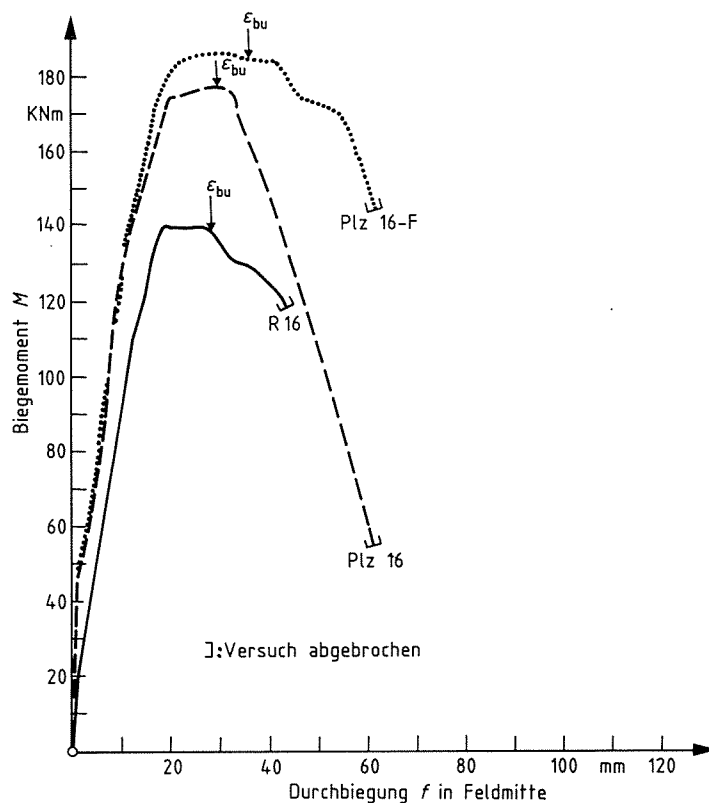


Bild 15  
Gegenüberstellung der Durchbiegungen in Feldmitte in Abhängigkeit vom Biegemoment aller mit 4 Ø 16 mm bewehrten Balken

Beide Rechteckbalken wiesen gegenüber den Plattenbalken gleicher Hauptbewehrung geringere Tragfähigkeiten auf (s. Bilder 14 und 15). Dies ist auf die abweichende Bewehrungsführung der Rechteckbalken zurückzuführen, bei denen zum Freihalten einer Betonierungslücke je zwei Stäbe übereinander angeordnet werden mußten, wodurch sich die statische Höhe (s. Tafel 3) gegenüber der der Plattenbalken verringerte. Bei den Plattenbalken waren dagegen zwei Stäbe in die Platte ausgelagert (s. Bild 1). Zusätzlich bewirkte bei den mit Ø 16 bewehrten Plattenbalken die parallel zur Hauptbewehrung liegende Verteilerbewehrung der Betonstahlmatte in der Platte eine Erhöhung der Tragfähigkeit der Plattenbalken, da die Verteilerstäbe der Balken Plz 16 und Plz 16-F erst mit beginnendem Versagen der Druckzone rissen.

Im Verformungsverhalten gab es im elastischen Bereich (Stadium I und Stadium II) zwischen Rechteckbalken und Plattenbalken infolge der unterschiedlichen Biegesteifigkeiten die zu erwartenden Unterschiede, vor allem bei den Plattenbalken den wesentlich späteren Übergang vom Stadium I (ungerissen) in das Stadium II (Beton der Zugzone gerissen). Mit Beginn der plastischen Verformungen zeigten die Balken ein sehr unterschiedliches Verhalten.

Während sich bei dem mit 4  $\emptyset$  10 mm bewehrten Rechteckbalken R10 in üblicher Art die plastischen Dehnungen auf eine größere Anzahl von Rissen verteilten, wiesen bei den mit 4  $\emptyset$  16 mm bewehrten Rechteckbalken R16 nur drei der zahlreichen Biegerisse größere Rißweiten auf. Grund hierfür ist das Fließplateau (Lüdersbereich) des verwendeten naturharten Betonstahls BSt 500 S. Wenn die Stahlspannung in dem Riß mit höchster Beanspruchung die Streckgrenze erreicht, stellt sich dort ohne weitere Laststeigerung die zum Ende des Lüdersbereichs zugehörige Stahldehnung ein. Die durch diese Stahldehnung bedingte Verringerung der Druckzonenhöhe erhöht die Beanspruchung der Druckzone. Sie versagte bei dem Balken R16 kurz nachdem die Stahldehnung den Verfestigungsbereich erreicht hatte. Benachbarte Risse, in denen die Biegemomente nur wenig kleiner waren, wiesen entsprechend den dort wirkenden Biegemomenten nur wenig kleinere Stahlspannungen auf, die aber unterhalb des Fließplateaus lagen, sich also noch im elastischen Bereich befanden und so keinen Beitrag zur plastischen Verformung leisteten (s. Soretz [6], Langer [7]). Bei dem Balken R10 hatten die maximalen Stahldehnungen so hoch im Verfestigungsbereich gelegen, daß auch in einer größeren Anzahl benachbarter Risse die Stahlspannung die Streckgrenze überschritt (s. Bild 7).

Der größere Betonquerschnitt in der Zugzone bewirkte bei den Plattenbalken einen größeren Rißabstand als bei den Rechteckbalken (s. Tafel 3 sowie Bilder 16 und 17). Die bei den plastischen Stahldehnungen erwartete stärkere Behinderung durch den größeren Betonquerschnitt in der Zugzone der Plattenbalken ist dagegen nicht klar erkennbar, da zwei Phänomene die plastischen Stahldehnungen erheblich beeinflussen. Zum einen ist es die hohe Duktilität des naturharten Betonstahls BSt 500 S, durch die bei Dehnungen im Verfestigungsbereich so große Verschiebungen zwischen Beton und Stahl entstehen können, daß eine vollkommene Zerstörung der Verbundfuge die Folge ist. Ohne Verbund ist eine Behinderung der Stahldehnungen durch den umgebenden Beton, der "tension-stiffenes-effect", nicht vorhanden, die Größe des Betonquerschnitts der Zugzone hat keinen Einfluß auf die Dehnungen des Stahls.

Der zweite Effekt ist auf die parallel zur Hauptbewehrung verlaufenden Verteilerstäbe der Betonstahlmatte in der Platte der

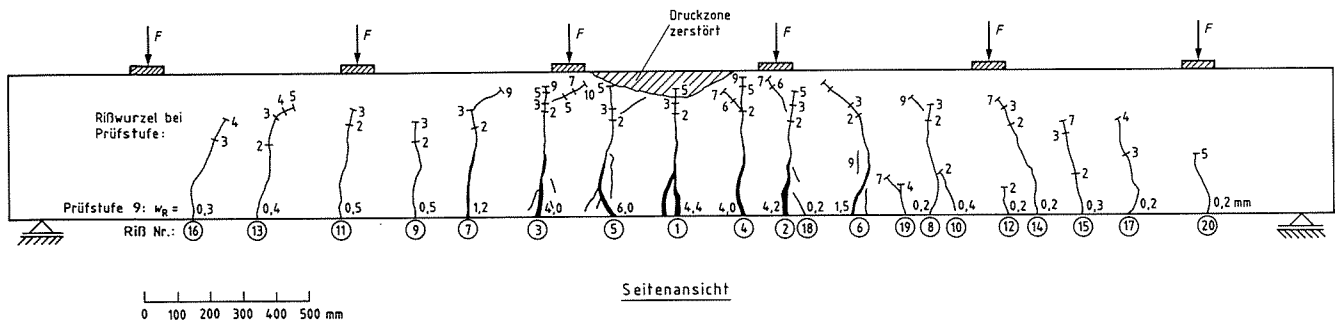


Bild 16  
 Reißbild des Rechteckbalkens R10 mit Reißweiten bei Prüfstufe 9

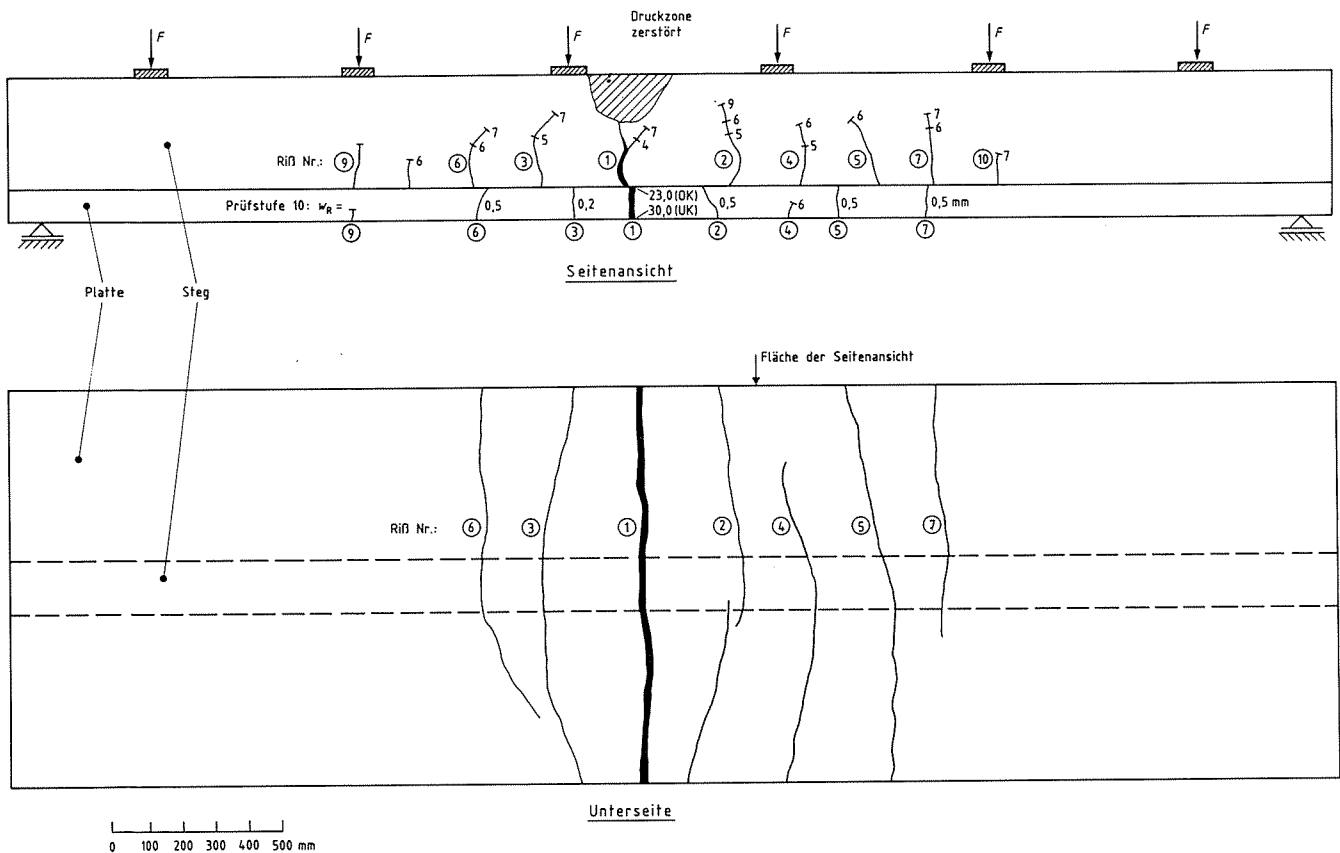


Bild 17  
 Reißbild des Plattenbalkens Plz 10 mit Reißweiten bei Prüfstufe 10

Plattenbalken zurückzuführen. Wenn die Verteilerstäbe der Matte (4 Ø 4 mm) im Verhältnis zur Hauptbewehrung auch nur einen geringen Querschnitt haben und infolge ihrer geringen Duktilität nach relativ geringer Verformung reißen, ist die Stelle ihres Bruches doch eine Unstetigkeit in der Biegesteifigkeit des Balkens. Die Balkenabschnitte mit intakten Verteilerstäben links und rechts dieser Bruchstelle leisten einer Verformung einen größeren Widerstand als die Bruchstelle. So konzentriert sich die weitere Verformung des Balkens auf den Reiß, in dem oder in dessen Nähe die Verteilerstäbe gerissen sind. Erst wenn die Verformbarkeit des Balkens so groß ist, daß durch Ansteigen der

Stahlspannungen im Verfestigungsbereich an der Bruchstelle der Verteilerstäbe von der Hauptbewehrung allein die gleiche Zugkraft aufgenommen werden kann wie von Hauptbewehrung und Verteilerstäben zuvor zusammen, sind auch in weiteren Rissen nennenswerte plastische Verformungen zu erwarten.

Bei den beiden mit je 4  $\emptyset$  10 mm bewehrten Plattenbalken Plz 10 und Plz 10-F ist in den Durchbiegungs-Biegemoment-Diagrammen (s. Bilder 8 und 9) das Reißen der Verteilerstäbe der Betonstahlmatte vor dem Versagen des plastischen Gelenks gut zu erkennen. In beiden Balken bildete sich auch nur ein Riß mit großer Weite, da das Versagen der Druckzone einsetzte, bevor der Ausfall der Verteilerstäbe durch Spannungsanstieg in der Hauptbewehrung ausgeglichen werden konnte. Die maximalen Rißweiten betragen  $w_R = 30$  mm beim Balken Plz 10 und  $w_R = 31$  mm beim Balken Plz 10-F. An den Rißufern hatte sich also der Stahl gegenüber dem Beton um rd. 15 mm verschoben. Die plastischen Stahldehnungen reichten beim Balken Plz 10 über eine Länge von  $l_p = 660$  mm mit plastischen Dehnungen bis zu 13 % und beim Balken Plz 10-F über eine Länge von  $l_p = 400$  mm mit Dehnungen bis zum Bruch des Stahls.

Aus den gemessenen plastischen Stahldehnungen lassen sich über die hier bekannten Arbeitslinien der Stähle die Stahlspannungen und aus deren Änderung in Richtung Stabachse die Verbundspannungen ermitteln. Eine Berechnung der Verbundspannungen in dieser Art ergab für den Balken Plz 10 einen Bereich von 225 mm Länge und für den Balken Plz 10-F einen Bereich von rd. 200 mm Länge, in denen eine Verbundwirkung praktisch nicht mehr vorhanden war. Durch die große Verschiebung zwischen Stahl und Beton war die Verbundfuge vollkommen zerstört worden.

Um den Einfluß der Verteilerstäbe mit Bildung nur eines Risses großer Weite auszuschalten, war ein weiterer, mit 4  $\emptyset$  10 mm bewehrter Plattenbalken, Bezeichnung Plz 10-F, oM. geprüft worden, bei dem im mittleren Bereich nur Querstäbe angeordnet und die Verteilerstäbe weggelassen worden waren (s. Bild 1). Im übrigen entsprach aber der Balken in Ausführung und Beanspruchung dem Balken Plz 10-F. In diesem Balken bildeten sich bei Beanspruchung nun mehrere Risse größerer Rißweiten, die sich in der Verteilung der plastischen Stahldehnungen auch deutlich markie-

ren (s. Bild 10). Trotzdem erreichte dieser Balken keine nennenswert größere Drehfähigkeit des plastischen Gelenks als der Balken Plz 10 mit Verteilerstäben, da die drei wesentlichen Risse des Balkens Plz 10-F, oM. auf die Lasteinleitungsstelle in eine gemeinsame Betonversagenszone zuliefen, in der bei nahezu gleicher Verformung wie bei dem Balken Plz 10-F das Versagen der Druckzone einsetzte.

Einen wesentlichen Unterschied im Tragverhalten beider Balken gab es nur bei Versuchsende. Während bei dem Balken Plz 10-F durch den Bruch eines Stahls der Hauptbewehrung und die Einschnürung eines zweiten eine entscheidende Minderung der Balken-tragfähigkeit eintrat, gab es bei dem Balken Plz 10-F, oM. keine Anzeichen von Stahlversagen. Der Versuch wurde bei einer Durchbiegung von 120 mm aus freiem Ermessen abgebrochen.

Die beiden mit 4  $\emptyset$  16 mm bewehrten Plattenbalken Plz 16 und Plz 16-F wiesen, wie schon bei den mit  $\emptyset$  10 mm bewehrten Plattenbalken beobachtet, größere Riabstnde als der entsprechende mit 4  $\emptyset$  16 mm bewehrte Rechteckbalken R 16 auf. Die Verteilerstäbe in den Platten der Plattenbalken rissen ebenfalls, jedoch trat nahezu gleichzeitig das Gesamtversagen der Balken ein. Deshalb hatte der Bruch der Verteilerstäbe keinen Einfluß auf das Rißbild. Beide Plattenbalken wie auch der Rechteckbalken wiesen drei Risse mit größerer Riweite auf. Die Stahldehnungen erreichten knapp den Verfestigungsbereich (s. Bilder 11 bis 13), wobei zu beachten ist, daß die in den Plattenbalken verwendeten Betonstähle  $\emptyset$  16 mm einen wesentlich kürzeren Lüdersbereich aufwiesen als die Stähle des Balkens R 16 (s. Tafel 3).

Die bei beiden Stahldurchmessern erreichten größeren Drehfähigkeiten der durch eine Einzellast beanspruchten Balken sind zum Teil auf die gewählte Versuchseinrichtung zurückzuführen. Bei den Balken mit Streckenlast, bei denen die Streckenlast im Versuch durch eine Belastung aus 6 Einzellasten angenähert worden war, konnte sich in Balkenmitte zwischen der dritten und vierten Einzellast unbehindert der Bruch der Betondruckzone ausbilden. Bei den durch eine Einzellast in Feldmitte belasteten Balken dagegen wird die Druckzone in Feldmitte, an der Stelle der höchsten Beanspruchung, durch die als Querlast wirkende Einzellast an einem Ausweichen behindert und so die Tragfähigkeit der Druck-

zone erhöht. Der günstige Einfluß einer direkten Lasteinleitung auf die Druckzone eines plastischen Gelenks ist erheblich und sollte bei der Auswertung von Versuchsergebnissen stets beachtet werden.

## **5. Tastversuche an 0,7 m langen Kleinbalken**

### **5.1 Begründung der Versuche**

Bei der Prüfung der Plattenbalken Plz 10 und Plz 10-F zeigte es sich, wie im Abschnitt 4.3.2 beschrieben, daß zwei Phänomene die plastischen Stahldehnungen und damit die Drehfähigkeit des plastischen Gelenks erheblich beeinflussen, die vollkommene, weit in den Beton hineinreichende Zerstörung des Verbundes durch die hohen Dehnungen des verwendeten Betonstahls BSt 500 S und die Unstetigkeitsstelle der Biegesteifigkeit, hervorgerufen durch das Reißen der Verteilerstäbe der als Plattenbewehrung verwendeten Betonstahlmatte.

Da nicht ausgeschlossen werden kann, daß hierbei nicht nur die unterschiedlichen Duktilitäten der Stähle, naturharter Stabstahl BSt 500 S - kaltverformte Betonstahlmatte BSt 500 M, von Bedeutung sind, sondern auch die unterschiedlichen Durchmesser der Stähle, da ja der Stabdurchmesser das Verhältnis von Verbundkraft zur Stahlzugkraft beeinflusst, wurden an Kleinbalken mit 0,7 m Länge Tastversuche durchgeführt, die zwei Fragen beantworten sollen:

- a) Gibt es für den naturharten Betonstahl BSt 500 S einen Grenzdurchmesser, unterhalb dessen die Verbundschicht zwischen Beton und Stahl nicht völlig und vom Riß ab sukzessive fortschreitend zerstört wird, sondern durch den besseren Verbund der kleineren Stahldurchmesser die plastischen Stahldehnungen auf einen engen Rißbereich beschränkt bleiben?
- b) Reicht es aus, bei einer parallel zur Hauptzugbewehrung angeordneten Bewehrung wesentlich kleinerer Durchmesser, wie Mattenbewehrung der Deckenplatte oder Längsstäbe von Bügelmatte, auf ausreichend hohe Duktilität zu achten oder bedingt der bessere Verbund des dünnen Stabes auch bei hoher Duktilität ein vorzeitiges Reißen des dünnen Stabes und ein damit verbundenes Markieren einer Unstetigkeitsstelle der Biegesteifigkeit des Balkens?

Der Beantwortung der Frage a) dienten die Kleinbalken P4, P6, P8 und P10, der der Frage b) die Kleinbalken P4K, P4U, P6K und P6U.

## 5.2 Probekörper

Alle acht Kleinbalken besaßen mit 700 mm Länge, 150 mm Höhe und 150 mm Breite die gleichen Abmessungen. Um die Bildung eines Risses in Balkenmitte zu erzwingen, waren dort in der Zugzone der Balken 20 mm hohe Blechstreifen quer zur Balkenachse eingesetzt worden (s. Bild 18). Außer der jeweiligen Hauptbewehrung befanden sich in den Balkenhälften, durch den vorgegebenen Riß getrennt, Zusatzbewehrungen, die eine Beschränkung plastischer Stahldehnungen der Hauptbewehrungen allein auf den vorgegebenen Riß einschließlich seiner Ufer sichern sollten (s. Bild 18).

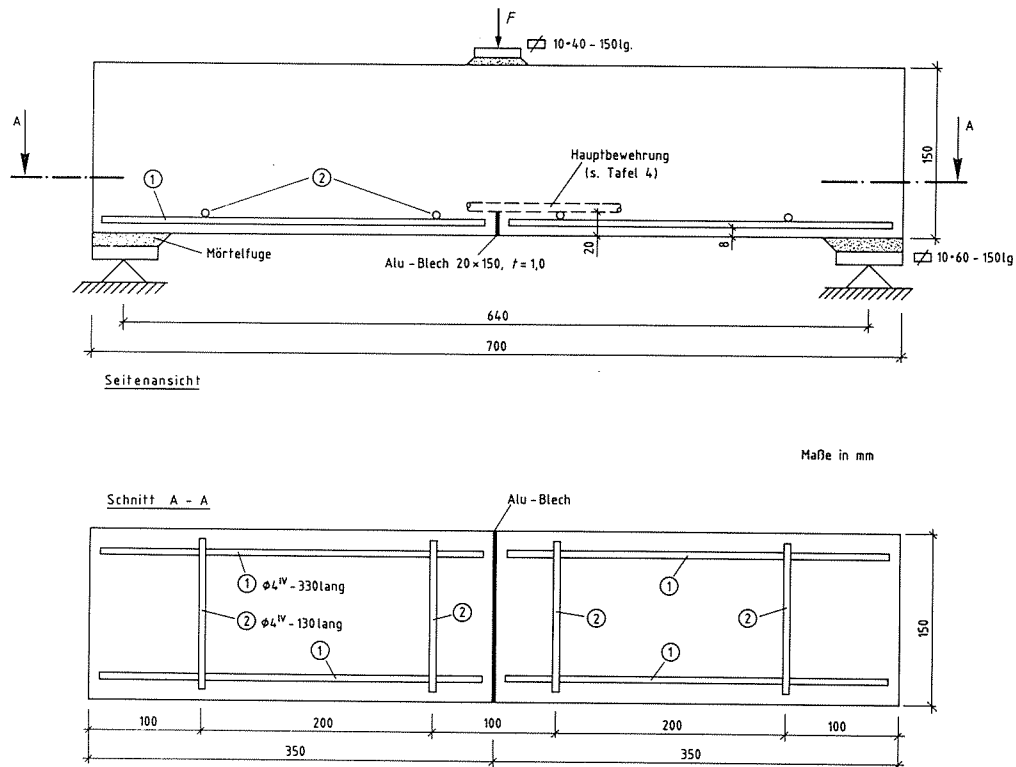


Bild 18  
Abmessungen, Zusatzbewehrung, vorgegebener Riß und Lastbild der Kleinbalken

Als Hauptbewehrung war für die Kleinbalken P6, P8 und P10 der auch in den Balken mit 4 m Länge verwendete naturharte Betonstahl BSt 500 S vorgesehen. Lediglich bei dem Balken P4 mußte auf kaltverformtes Betonstahlmatten-Vormaterial BSt 500/550 RK zurückgegriffen werden, da es den Betonstahl BSt 500 S nicht mit einem Durchmesser von 4 mm gibt. Der Kleinbalken P4 war mit vier Stäben  $\varnothing 4$  mm, der Kleinbalken P6 mit zwei Stäben  $\varnothing 6$  mm, der Kleinbalken P8 mit einem Stab  $\varnothing 8$  mm und der Kleinbalken P10 mit einem Stab  $\varnothing 10$  mm, stets ohne Aufbiegungen und ohne Endhaken, bewehrt.



Mit den Kleinbalken der zweiten Serie sollte neben dem Einfluß des Stahldurchmessers auch der Einfluß unterschiedlicher Duktilität der Stähle auf den Stahldehnweg im Bereich eines Risses untersucht werden. Da es hier um die Mitwirkung von Betonstahlmatten oder Bügelmatte geht, wurden als Hauptbewehrung der Kleinbalken P6U und P6K Stababschnitte aus einer Betonstahlmatte R 221 und für die Kleinbalken P4U und P4K ein Betonstahlmatten-Vormaterial BSt 500/550 RK verwendet. Die für die Kleinbalken P4U und P6U bestimmten Stababschnitte wurden bei 850 °C 30 Minuten geblüht und bis zum Abkühlen im Ofen belassen, um so Stäbe mit großer Duktilität, aber gleicher Oberflächenbeschaffenheit und gleichem Querschnitt wie die Stäbe der Betonstahlmatte zu erhalten. Die Kleinbalken P4K und P4U waren mit je vier Stäben  $\varnothing$  4 mm, die Kleinbalken P6K und P6U mit je drei Stäben  $\varnothing$  6,5 mm bewehrt. Die wesentlichen Daten der Kleinbalken sind aus der Tafel 4 zu ersehen. Alle Stäbe der Hauptbewehrung beider Serien waren vor dem Betonieren mit eingeritzten Meßmarken, Abstand 15 mm, versehen worden. Die Herstellung der Balken erfolgte in Stahlschalungen, wobei die Bewehrung unten lag. Verdichtung und Nachbehandlung des Betons entsprach der der Balken mit 4 m Länge.

Tafel 4  
Kleinbalken, Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Serie	Kleinbalken	Betonfestigkeit $\beta_{w,pr\ddot{u}f}$	Hauptbewehrung <sup>1)</sup>				Biegemomente		Durchbiegung max f	Verformungswerte		plast. Bereich $l_p$	stat. Höhe $h_x$	Bemerkungen
			Stahlsorte BSt	Stäbe	Bewehrungsgrade $\mu_2$ $\omega_2$		$M_p$	max M		Stahldehnweg $\int_0^l \epsilon_s \cdot dx$	Stahldehnung max $\epsilon_p$			
-	-	N/mm <sup>2</sup>	-	mm	%		kNm		mm		%	mm	mm	-
a)	P4	40,4	500/550 RK	4 $\varnothing$ 4 <sup>4)</sup>	0,26	5,7	3,96	3,96	4,1	1,3	Stahlbruch	30	130	Stahlbruch
	P6		500 S	2 $\varnothing$ 6	0,30	8,4	4,51	4,97	13,0	5,7	Stahlbruch	90	128	Stahlbruch
	P8		(natur-	1 $\varnothing$ 8	0,27	7,4	3,98	4,65	16,0	8,7	Stahlbruch	150	125	Stahlbruch
	P10		hart)	1 $\varnothing$ 10	0,42	9,4	5,21	6,69	25,0 <sup>3)</sup>	14,2	10,5	270	125	Kein Bruch des Stahls, Versuch bei f = 25 mm beendet
b)	P4K	38,7	500/550 RK	4 $\varnothing$ 4 <sup>4)</sup>	0,27	6,7	3,76	3,90	5,3	1,7	Stahlbruch	45	125	Stahlbruch
	P4U		500/550 RK geblüht	4 $\varnothing$ 4 <sup>4)</sup>	0,27	2,1	1,36	1,76	12,5	11,0	Stahlbruch	60	126	Stahlbruch
	P6K		500 M	3 $\varnothing$ 6,5 <sup>5)</sup>	0,53	15,2	>7,66	7,66	3,3	0	0	0	125	Schubbruch
	P6U		500 M geblüht	3 $\varnothing$ 6,5 <sup>5)</sup>	0,53	5,6	3,91	4,40	25,0 <sup>3)</sup>	16,6	18,0	165	125	Kein Bruch der Stähle, Versuch bei f = 25 mm beendet

- 1) mechanische Kennwerte s. Tafel A3
- 2) mit  $\epsilon_{s,p} = A_g$  für Werte  $\epsilon_{s,p} > A_g$
- 3) Bei der Durchbiegung f = 25 mm wurde der Versuch beendet
- 4) Betonstahlmatten-Vormaterial
- 5) Tragstäbe der Matte R 221

### 5.3 Versuchsdurchführung

Die Kleinbalken wurden bei gelenkiger Lagerung auf zwei Stützen durch eine Einzellast in Balkenmitte auf Biegung beansprucht (s. Bild 19). Die Stützweite betrug 640 mm. Für die Prüfung wurde eine Prüfmaschine verwendet, deren Kolben weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 0,05 mm/s die Balken verformte. Um in Anbetracht der geringen Spannweite von 640 mm nicht eine übermäßige Drehung des plastischen Gelenks mit Dehnungsbehinderung des Stahls durch Reibung an den Umlenkstellen zu erhalten, wurde die Mittendurchbiegung der Balken auf maximal 25 mm begrenzt. Gemessen und von einem x-y-Schreiber aufgezeichnet wurden während des Versuchs die von der Presse ausgeübte Last und die Durchbiegung der Balken in Feldmitte. Nach dem Versuch konnten die bleibenden Dehnungen der Stähle nach ihrem Herauslösen aus dem Beton durch Messung der Abstandänderungen der eingeritzten Meßmarken bestimmt werden.

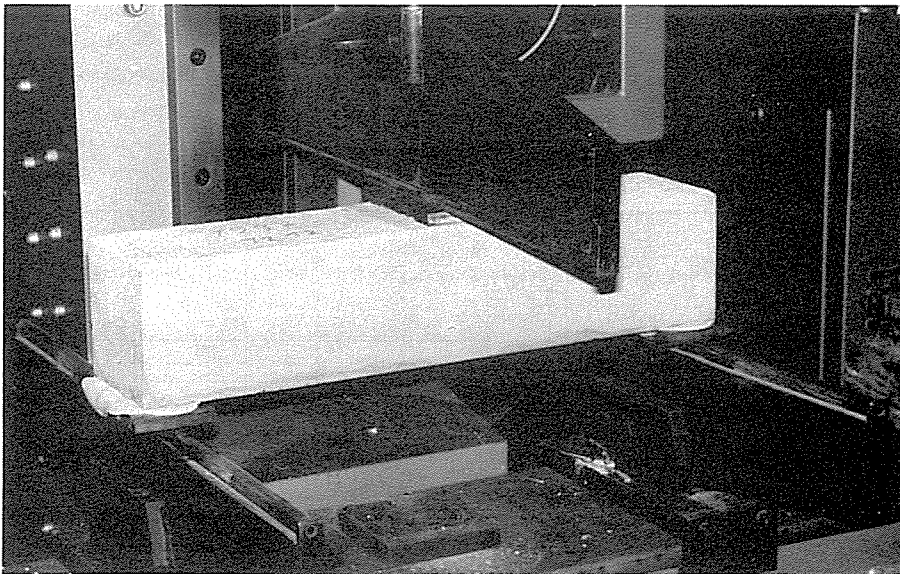


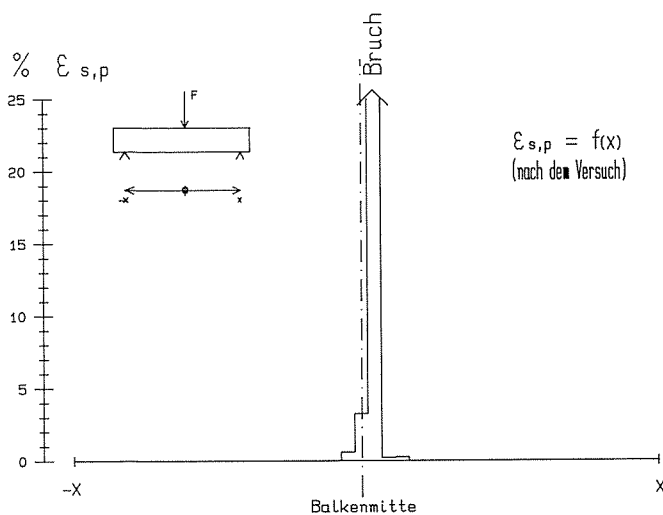
Bild 19  
Prüfmaschine mit  
eingebautem  
Kleinbalken

## 5.4 Versuchsergebnisse

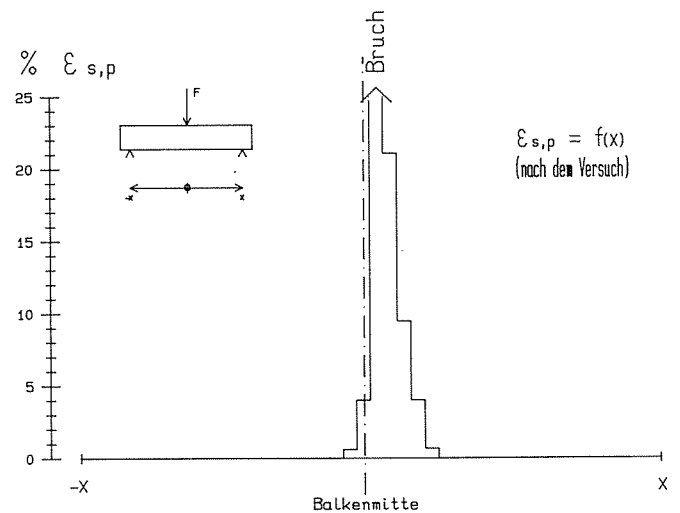
### 5.4.1 Darstellung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse der Kleinbalken sind zahlenmäßig in der Tafel 4 zusammengestellt.

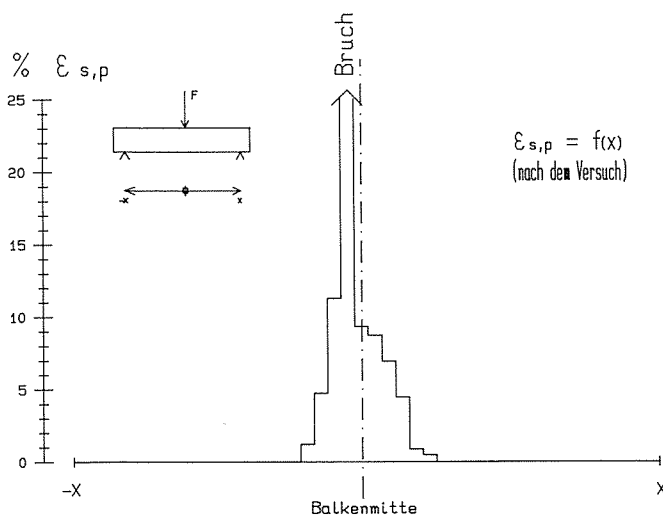
Die Bilder 20 und 21 zeigen den Verlauf der plastischen Stahldehnungen über die Balkenlänge, während in Bild 22 die Länge der plastischen Bereiche und in Bild 23 der plastische Anteil des Gesamtdehnwegs des Stahls aller Kleinbalken in Abhängigkeit vom Durchmesser des Stahls aufgetragen sind.



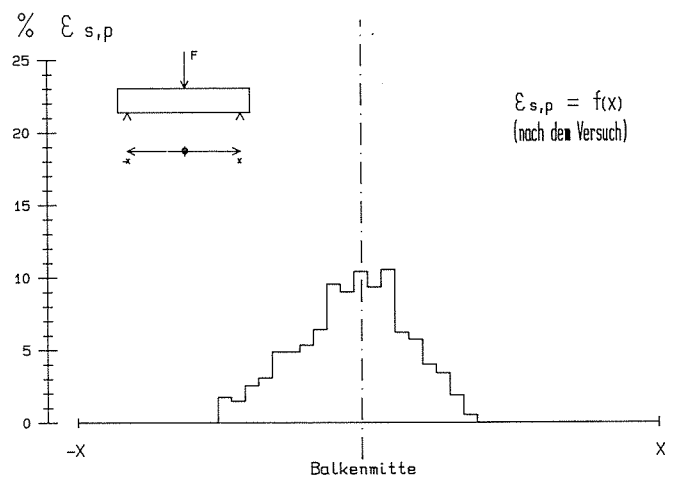
a) Balken P4, BSt 500/550 RK  
(kaltverformt)



b) Balken P6, BSt 500 S  
(naturhart)



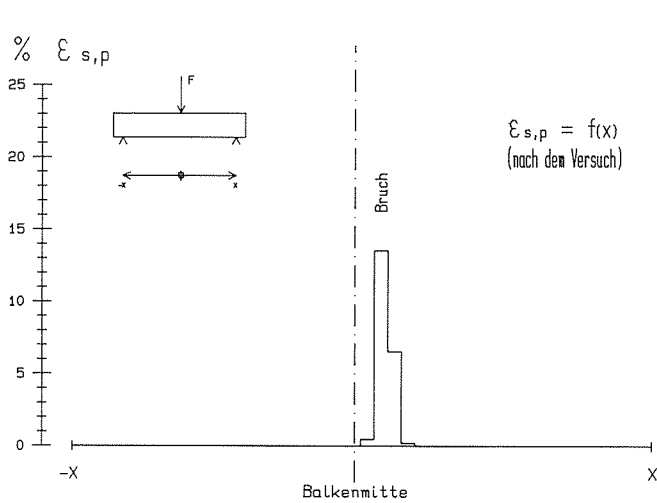
c) Balken P8, BSt 500 S  
(naturhart)



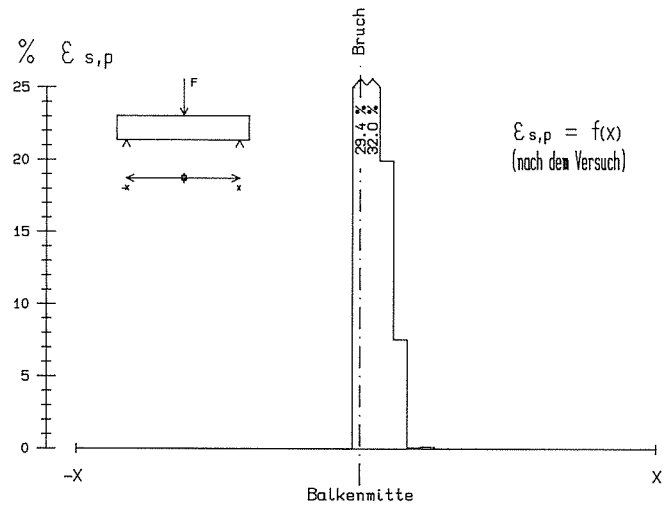
d) Balken P10, BSt 500 S  
(naturhart)

Bild 20

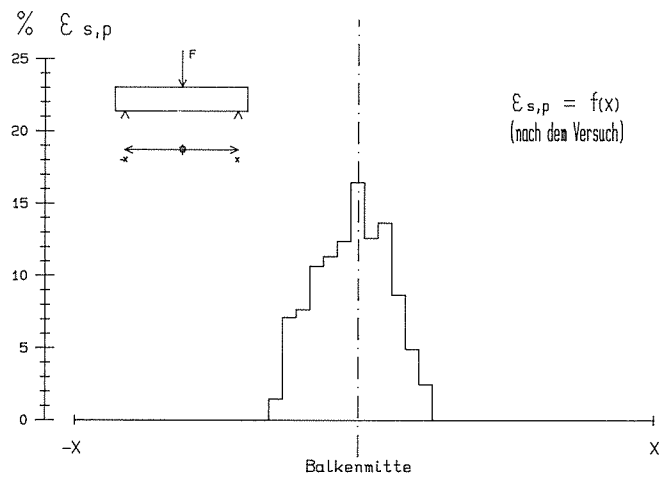
Verteilung der plastischen Stahldehnungen über die Balkenspannweite in den Kleinbalken P4, P6, P8 und P10. Die Intervallbreite beträgt 15 mm



a) Balken P4K, BSt 500/550 RK  
(kaltverformt)



b) Balken P4U, BSt 500 M  
(geglüht)



c) Balken P6U, BSt 500 M  
(geglüht)

Bild 21  
Verteilung der plastischen Stahldehnungen über die Balkenspannweite in den Kleinbalken P4K, P4U und P6U. Die Intervallbreite beträgt 15 mm

#### 5.4.2 Kleinbalken P4, P6, P8 und P10

Mit Abnahme des Stahldurchmessers vermindert sich sehr stark die Länge des Bereichs plastischer Stahldehnungen (s. Bild 22) und ebenfalls, wenn auch in abgeschwächter Form, der plastische Anteil des Gesamtdehnwegs des Stahls (s. Bild 23). Bei dem Kleinbalken P10, wie die schwach bewehrten, 4 m langen Balken mit Durchmesser 10 mm bewehrt, war der Verbund nur über eine Länge von 75 mm zerstört. Bei den 4 m langen Balken war dagegen eine Länge zerstörten Verbunds von 200 und 225 mm festgestellt worden. Die geringere Länge zerstörten Verbunds bei dem Kleinbalken P10 ist darauf zurückzuführen, daß der Versuch bei einer Durchbiegung von 25 mm abgebrochen wurde, und auch die Höhe des Kleinbalkens wesentlich geringer war.

Der mit dem nächst kleineren Durchmesser 8 mm bewehrte Kleinbalken P8 wies noch einen 45 mm langen Bereich zerstörten Verbundes

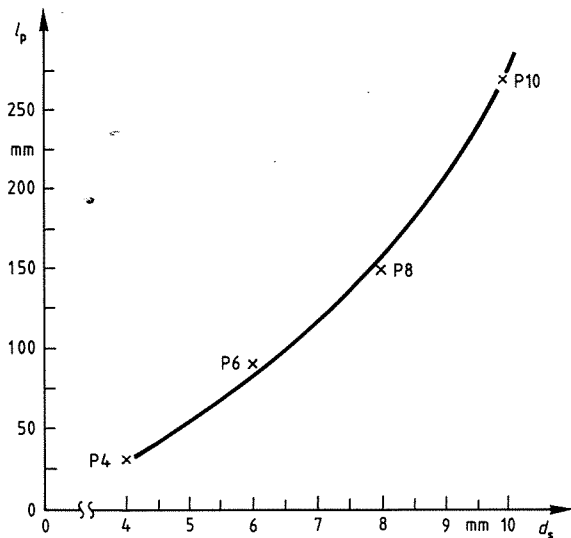


Bild 22  
Länge  $l_p$  des Bereichs plastischer Stahldehnungen in den Kleinbalken P4, P6, P8 und P10 in Abhängigkeit vom Stahldurchmesser  $d_s$

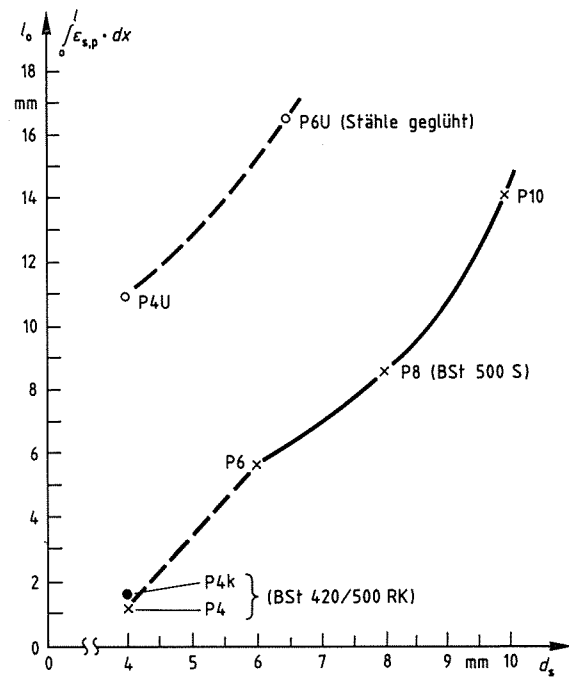


Bild 23  
Gesamte plastische Stahldehnwege  $\int_0^l \epsilon_{s,p} \cdot dx$  aller Kleinbalken in Abhängigkeit vom Stahldurchmesser

auf, der also deutlich kürzer ist als der des Kleinbalkens P10. Die Durchbiegung von 25 mm wird nicht mehr erreicht, der Stahl riß bei einer Durchbiegung von 20 mm. Der Kleinbalken P6, Stahldurchmesser 6 mm, und erst recht der Balken P4, Stahldurchmesser 4 mm, wiesen nur im Rißbereich hohe Stahldehnungen auf, die zu beiden Seiten des Risses schnell abfielen (s. Bild 20).

Nach dem Ergebnis der Tastversuche an den Kleinbalken P4 bis P10 ist es wahrscheinlich, daß das bei den 4 m langen und mit Stählen Durchmesser 10 mm bewehrten Balken beobachtete völlige Zerstören des Verbunds mit dem daraus folgenden breiten Plateau der Stahldehnungen schon bei Stählen Durchmesser 8 mm sehr eingeschränkt ist, und daß bei den noch kleineren Durchmessern mit keinem nennenswerten Bereich zerstörten Verbunds mehr zu rechnen ist. Diese Annahme ist allerdings auf den in den Versuchen verwendeten Stahl, einen naturharten Betonstahl BSt 500 S, beschränkt.

#### 5.4.3 Kleinbalken P4K, P4U, P6K und P6U

Der mit 4 Stäben, Durchmesser 4 mm, aus kaltverformtem Stahl bewehrte Kleinbalken P4K versagte durch Reißen der Stähle bei

einer Durchbiegung des Balkens von 5,3 mm und einem plastischen Stahldehnweg von 1,7 mm. Bei dem Kleinbalken P4U mit gleicher Bewehrung wie P4K, aber in geglähter Form, war die Bruchursache des Balkens zwar auch das Reißen der Stähle, jedoch erreichte zuvor der Balken eine Durchbiegung von 12,5 mm, und der plastische Stahldehnweg betrug 11,0 mm.

Der mit drei aus einer Betonstahlmatte R 221 herausgeschnittenen Tragstäben, Durchmesser 6,5 mm bewehrte Kleinbalken P6K versagte leider vor dem Einsetzen plastischer Verformungen durch Schubbruch und steht somit für den Kleinbalken P6U mit gleicher, aber geglähter Bewehrung als Vergleichswert für mögliche plastische Stahldehnwege nicht zur Verfügung. Letzterer wurde bis zum vorgegebenen Wert der Durchbiegung von 25 mm ohne Anzeichen eines Versagens verformt. Der plastische Stahldehnweg betrug 16,6 mm.

Zur Beantwortung der Frage b) des Abschnitts 5.1, ob der bessere Verbund eines dünnen Stabs auch bei hoher Duktilität des Stahls ein Reißen des dünneren Stabs vor dem Versagen des plastischen Gelenks verursachen kann, sind die Versuchsergebnisse der Kleinbalken P4U und P6U zu vergleichen. Hinsichtlich des plastischen Stahldehnwegs, der als Maßstab für eine mögliche Rißaufweitung vor einem Reißen der dünneren, parallel zur Hauptbewehrung liegenden Bewehrung gelten soll, ist bei dem Kleinbalken P4U mit 11,0 mm ein deutlich kleinerer plastischer Stahldehnweg als bei dem Kleinbalken P6U mit 16,6 mm zu verzeichnen. Aber auch bei dem Stabdurchmesser 4 mm wäre der plastische Stahldehnweg mit 11,0 mm groß genug, um das Reißen einer parallel zur Hauptbewehrung angeordneten Bewehrung wesentlich kleinerer Durchmesser als die der Hauptbewehrung vor dem Versagen des plastischen Gelenks auszuschließen. Bei den 4 m langen Balken Plz 10 und Plz 10-F war z. B. jeweils der erste der vier Verteilerstäbe der Betonstahlmatte bei einer Rißaufweitung von 5 bzw. 8 mm gerissen.

Die Materialkennwerte der geglähten Stäbe mit der hohen Gleichmaßdehnung von  $A_g = 23 \%$  und der geringen Zugfestigkeit von  $R_m = 290 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $355 \text{ N/mm}^2$  weichen allerdings so weit von denen einer in der Praxis anwendbaren Betonstahlmatte höherer Duktilität ab, daß die Tastversuche hinsichtlich Frage b) nur eine Tendenz angeben können.

## 6. Rechnerische Ermittlung der Drehfähigkeit

### 6.1 Rechenmodell

Der rechnerischen Ermittlung der Drehfähigkeit plastischer Gelenke wird das in [8] vorgestellte Rechenmodell zugrunde gelegt. Bei diesem Modell wird davon ausgegangen, daß in einem plastifizierten Bereich des Balkens sich die Balkenkrümmung auf die Biegerisse konzentriert und die zwischen den Rissen liegenden Betonblöcke nur einen geringen Beitrag zur Krümmung leisten. Damit stellt die Biegelinie im plastifizierten Bereich des Balkens vereinfacht einen Polygonzug mit Knickpunkten in den Biegerissen dar, wobei die Neigungsänderung der Biegelinie in einem Riß der Formänderung eines Balkenelements entspricht, welches durch die Mittenquerschnitte der benachbarten Betonblöcke begrenzt ist (s. Bild 24). Dieses Element besitzt eine Höhe gleich

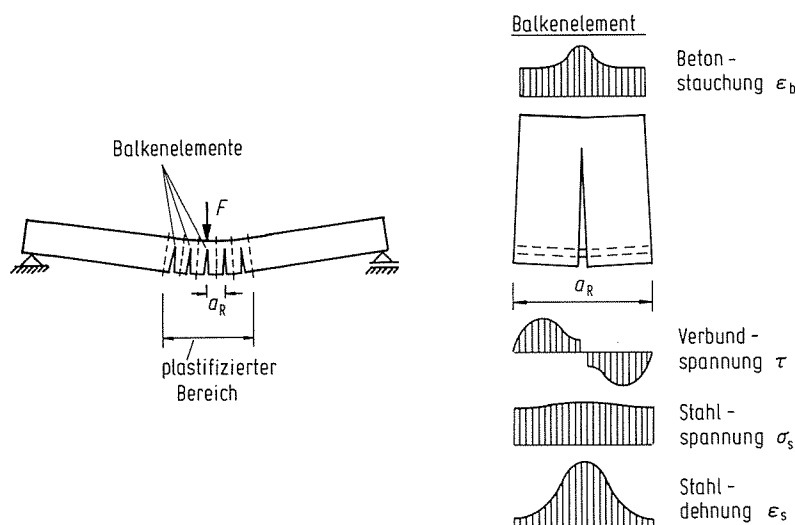


Bild 24  
Rechenmodell

Balkenhöhe, eine Länge gleich dem Rißabstand und einen BiegeriB in Elementmitte. Vorausgesetzt wird eine Biegebeanspruchung mit nur geringer Querkraft. Ausgehend von der aus der äußeren Beanspruchung bekannten Stahlspannung im RiB wird mit Hilfe von Verbundgesetzen (s. [8]) der Verlauf der Stahlspannungen und über die als bekannt vorausgesetzten Arbeitslinie des Stahls auch der Verlauf der Stahldehnungen über die Elementlänge ermittelt. Aus dem Integral der Stahldehnungen über die Elementlänge kann nun die Drehung des Elements als Relativdrehung der Elementränder berechnet werden, nachdem zuvor geprüft worden war, bei welcher Drehung des Elements die Druckzone versagt. Die Summe der plastischen Anteile der Drehungen aller BiegeriBelemente ergibt die Drehfähigkeit des plastischen Gelenks. Vor der Berechnung der Drehungen ist der mittlere RiBabstand zu ermit-

teilen, wobei ebenfalls die Verbundgesetze Anwendung finden. Die Grundlagen dieses Modells sind in [8] ausführlich beschrieben.

## 6.2 Erweiterung des Rechenmodells auf Plattenbalken und auf Stähle mit ausgeprägtem Lüdersbereich

Das bisher nur für Balken mit einfachem Rechteckquerschnitt und einer Bewehrung aus kaltverformtem Stahl (Rippentorstahl, BSt 420/500 RK) entwickelte Modell soll nun für Plattenbalken mit Platte in der Druckzone oder Platte in der Zugzone erweitert werden. Da der früher viel verwendete, kaltverformte Rippentorstahl inzwischen von dem Betonstahl BSt 500 S, meist als naturharter Stahl hergestellt, verdrängt worden ist, ergab sich außerdem die Notwendigkeit, für einen naturharten Stahl mit ausgeprägtem Lüdersbereich einen neuen Ansatz für die Beschreibung der Abhängigkeit der Stahldehnung von der Stahlspannung anzugeben.

Für die Berücksichtigung der Balkenquerschnittsform "Plattenbalken" ist es erforderlich, zwei unterschiedliche Balkenbreiten, eine für die Druckzone und eine für die Wirkungszone der Bewehrung in der Zugzone einzuführen. Bei Plattenbalken mit Platte in der Druckzone wird hierfür als Breite der Druckzone die mittragende Breite, z. B. nach DIN 1045, angesetzt. Die Höhe der Druckzone wird zur Vereinfachung des Ansatzes auf die Dicke der Platte als Maximalwert begrenzt, was in Anbetracht der geringeren Druckzonenhöhen bei plastischen Verformungen vertretbar erscheint. Die Breite der Wirkungszone der Bewehrung entspricht der Stegbreite. Zugbeanspruchte Querschnittsanteile der Platte werden nicht berücksichtigt.

Liegt die Platte des Plattenbalkens in der Zugzone, ist die Breite der Druckzone durch die Stegbreite gegeben. In der Platte liegende Anteile der Druckzone, die nur bei im Verhältnis zur Balkenhöhe sehr dicken Platten vorhanden sein können, werden vernachlässigt. Die Breite der Wirkungszone der Bewehrung in der zugbeanspruchten Platte ist abhängig von der Verteilung der Zugbewehrung, die konzentriert im Stegbereich, aber auch z. T. ausgelagert neben dem Steg in der Platte angeordnet sein kann. Als Breite der Wirkungszone soll hier die beidseitig um das Maß



$e_H = 15 \cdot d_s \leq 30 \text{ cm}$  vergrößerte Verteilungsbreite der Hauptzugbewehrung angenommen werden (s. Bild 25). Die Höhe der Wirkungszone wird auf die Plattendicke begrenzt, wobei der vom Ribbild abhängige Verlauf der Wirkungszonenhöhe sich wie auch beim Plattenbalken mit Platte in der Druckzone nach den in [8] angegebenen Regeln ergibt.

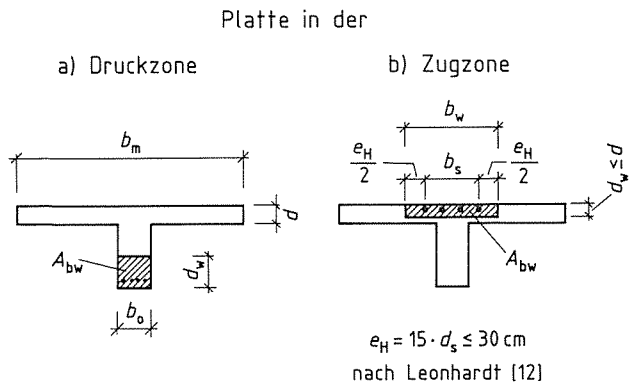
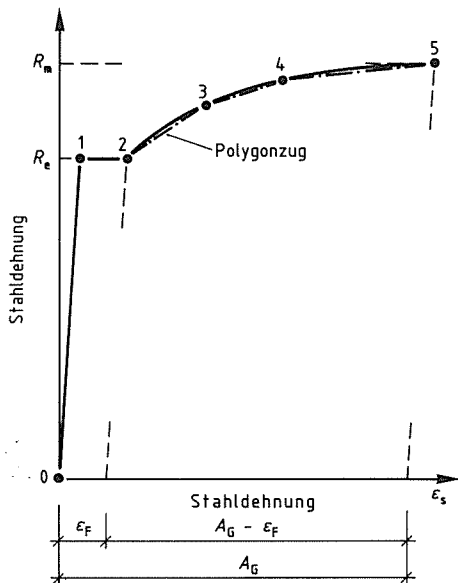


Bild 25  
Angenommene Breite der Wirkungszone der Bewehrung bei Plattenbalken

Die zweite Erweiterung des vorhandenen Rechenmodells ist die Entwicklung eines neuen Ansatzes für die Beschreibung der Abhängigkeit der Stahldehnung von der Stahlspannung, da die für kaltverformte Stähle bisher verwendete und gut brauchbare Potenzfunktion bei naturharten Stählen, deren Arbeitslinien ja am Beginn und Ende des Lüdersbereichs Knickpunkte aufweisen, nicht verwendet werden kann. Als einfache, aber an den Verlauf einer Arbeitslinie mit Lüdersbereich gut anpassungsfähige Näherung wird hier der Polygonzug gewählt, wobei zur Darstellung des Verfestigungsbereichs nur zwei, über die üblichen mechanischen Kennwerte hinausgehende Wertepaare benötigt werden. Das Bild 26 zeigt den gewählten Polygonzug mit den Wertepaaren Stahlspannung - Stahldehnung seiner Eckpunkte.

Die Länge  $\varepsilon_F$  des Lüdersbereichs und die Stahlspannungen  $\sigma_{S,3}$  im ersten Viertelpunkt des Verfestigungsbereichs und  $\sigma_{S,4}$  auf halber Länge des Verfestigungsbereichs sind der Spannungs-Dehnungs-Linie des jeweiligen Stahls zu entnehmen.

Die Einschnürungsdehnung des Stahls vor dem Bruch wird nicht berücksichtigt, d. h. die mittlere Gleichmaßdehnung  $A_G$  wird in der Rechnung als höchstmögliche Stahldehnung angesetzt.



Punkt	Stahlspannung	Stahldehnung
0	$\sigma_{s,0} = 0$	$\epsilon_{s,0} = 0$
1	$\sigma_{s,1} = R_e$	$\epsilon_{s,1} = \frac{R_e}{E_s}$
2	$\sigma_{s,2} = R_e$	$\epsilon_{s,2} = \frac{R_e}{E_s} + \epsilon_F$
3	$\sigma_{s,3} = f(\epsilon_{s,3})^{1)}$	$\epsilon_{s,3} = \frac{\sigma_s}{E_s} + \epsilon_F + \frac{A_G - \epsilon_F}{4}$
4	$\sigma_{s,4} = f(\epsilon_{s,4})^{1)}$	$\epsilon_{s,4} = \frac{\sigma_{s,4}}{E_s} + \epsilon_F + \frac{A_G - \epsilon_F}{2}$
5	$\sigma_{s,5} = R_m$	$\epsilon_{s,5} = \frac{R_m}{E_s} + A_G$

<sup>1)</sup> der  $\sigma - \epsilon$ -Linie des Stahles zu entnehmen

Bild 26

Verwendeter Polygonzug für die rechnerische Darstellung des Zusammenhangs von Stahlspannung und Stahldehnung bei Stählen mit ausgeprägtem Lüdersbereich

### 6.3 Nachrechnung der Versuche an Balken mit 4 m Länge

Mit dem in den Abschnitten 6.1 und 6.2 vorgestellten Rechenmodell wurden die an Rechteck- und Plattenbalken mit 4 m Länge durchgeführten Versuche (s. Abschnitt 4) nachgerechnet, wobei für jeden Balken die tatsächlichen Materialkennwerte des verwendeten Betons und der eingebauten Stähle angesetzt wurden. Dabei sind allerdings die Verteilerstäbe der Plattenbewehrung nicht als Teil der Zugbewehrung bewertet worden, da aufgrund der geringen Duktilität der Mattenstäbe ihr Reißen vor dem Versagen des plastischen Gelenks erwartet wurde. Entgegen der in [8] gemachten Einschränkung des Rechenmodells auf Balkenbereiche mit geringer Querkraft wurden auch die mit einer Einzellast belasteten Balken nach diesem Modell nachgerechnet, da zahlreiche Versuche der BAM (s. [9]) gezeigt haben, daß plastische Gelenke im Bereich mäßiger Querkraftbeanspruchung ( $M/Q \cdot h > 3,5$ ) keine kleinere Drehfähigkeit aufweisen als plastische Gelenke im Bereich geringer Querkraft unter einer Streckenlast. Die Querkraftbeanspruchung der durch eine Einzellast beanspruchten Balken Plz 10-F, Plz 10-F, oM. und Plz 16-F liegt mit  $Q/M \cdot h = 4,6$  bis  $4,8$  deutlich über diesem Erfahrungswert.

Die Verbreiterung der Zugkraftlinie unter einer Einzellast wird mit einem Versatzmaß  $v$  nach Leonhardt [10]

$$v = h \left( 0,3 + \frac{1,2}{60 \frac{\tau_a}{\beta_w}} \right) \quad \text{mit } 0,5 h < v < 0,8 h$$

berücksichtigt.

In der Tafel 5 sind die in den Versuchen ermittelten Rißabstände, Momente, Dehnungen und Gelenkdrehungen den entsprechenden, errechneten Werten gegenübergestellt. Bei den mittleren Rißabständen stimmen Versuchs- und Rechenwerte gut überein. Deutlich ist der Einfluß eines größeren Betonquerschnitts in der Zugzone auf den mittleren Rißabstand zu erkennen. Bei den Momenten gibt es zwar eine gute Übereinstimmung von Versuchs- und Rechenwerten bei den Balken mit Rechteckquerschnitt, bei den Plattenbalken dagegen sind die errechneten Momente deutlich kleiner als die im Versuch ermittelten. Dies ist zum größten Teil auf das Nichtberücksichtigen der Plattenbewehrung in der Rechnung zurückzuführen. Hinzu kommt, daß bei den Plattenbalken Plz 10 und Plz 10-F durch die Ausbildung nur eines Risses mit größeren plastischen Stahldehnungen an dieser Stelle höhere Stahldehnungen und damit höhere Stahlspannungen im Versuch vorhanden waren, als es die Rechnung lieferte. Die Konzentration der plastischen Verformungen auf allein einen Riß an der Bruchstelle der Plattenbewehrung kann von dem Rechenprogramm nicht so gut erfaßt werden wie die Verteilung der plastischen Verformungen auf mehrere Risse.

Als Bruchursache wird für alle Balken in Versuch und Rechnung übereinstimmend das Versagen des Betons der Druckzone ermittelt. Die errechneten Drehfähigkeiten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den im Versuch erreichten, wenn im Versuch "beginnendes Versagen der Druckzone", d. h. erste Rißbildung in der Druckzone, als Begrenzung der Drehung des plastischen angesehen wird.

Tafel 5  
Vergleich von Versuchswerten und errechneten Werten für die Balken mit 4 m Länge

Balken	Bewehrung			stat. Höhe $h_x$	mittlerer Rißabstand $\alpha_R$		plast. Moment $M_p$		Moment bei $\epsilon_b = \epsilon_{b,u}$				Maximale plast. Stahldehnungen $\max \epsilon_{s,p}$		Maximale Betonstauchung $\epsilon_{b,u}$		Drehung des Gelenks bei $\epsilon_b = \epsilon_{b,u}$		plast. $\varphi_{u,Rech}$		Bruchart		
	Stäbe	$R_e$	$R_m$		AG	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung	Ver-such	Rech-nung
-	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	mm	mm		kNm				mm		%		‰		rad·10 <sup>-3</sup>		-	-	-	-	
R10	4Ø10	510	670	11,0	387	139	168	62,5	59,3	70,7	65,7	1140	1008	5,2	2,9	3,2	3,45)	35,5	39,5	1,11	B	B	
Plz10		507	654	12,5	398	219	216	95,6	60,7	86,4	68,2	660	332	Bruch	7,0	2,9		23,1	28,5	1,23	B und St	B	
Plz10-F		508	650	12,5	407	188	218	86,0	62,3	83,4	68,3	400	338	13,0	10,3	3,4		31,1	32,9	1,06	B	B	
Plz10-F, oM.		499	653	15,5	405	211	218	75,0	60,9	79,0	68,0	1010	882	9,8	3,6	-		32,5	33,3	1,02	B	B	
R16	4Ø16	487	619	11,6	380	128	119	140	134	138	136	440	595	2,1	2,0	3,1	4,66)	15,7	10,7	0,68	B	B	
Plz16		515	709	10,9	399	147	157	174	148	176	157	440	785	1,7	1,3	3,2		13,2	14,3	1,08	B	B	
Plz16-F		518	708	10,4	396	194	156	182	148	186	156	760	780	2,5	1,1	3,2		17,4	17,2	0,99	B	B	

1) Stahlquerschnitt der Betonstahlmatte nicht berücksichtigt  
2) bei Versuchsende, also nach maximaler Verformung des Balkens  
3) bei Betonstauchung  $b = b_u$

4) B: Versagen der Druckzone, St: Reißen der Hauptbewehrung  
5) keine Umschnürung der Betondruckzone angenommen  
6) mit Umschnürung der Betondruckzone

#### 6.4 Parameterstudie

Mit dem in den Abschnitten 6.1 und 6.2 beschriebenen Rechenmodell sind für rd. 300 gelenkig auf zwei Stützen gelagerte Balken die Drehfähigkeiten der sich in Balkenmitte bildenden plastischen Gelenke berechnet worden. Folgende Parameter wurden variiert:

- Querschnittsform (Rechteckbalken oder Plattenbalken mit Platte in der Zugzone)
- Bewehrungsgrad ( $4 \% \leq \omega_2 \leq 30 \%$ )
- Stahldurchmesser ( $d_s = 6 - 10 - 14 - 20 - 28 \text{ mm}$ )
- Stahlsorte (kaltverformter BSt 450/500 RK oder naturharter BSt 500 S)
- Betonierlage der Bewehrung (oben oder unten liegend)
- Lastbild (gleichmäßig verteilte Streckenlast oder Einzellast in Feldmitte).

Plattenbalken mit Platte in der Druckzone wurden nicht untersucht, da sie im allgemeinen durch die große Breite der Druckzone und die geringere Dehnungsbehinderung des Stahls im schmaleren Steg eine große Verformungsfähigkeit aufweisen (s. [11]).

Mit 6,0 m Länge, 650 mm Höhe und 400 mm Stegbreite bzw. Balkenbreite bei den Rechteckbalken sind für die Parameterstudie größere Balkenabmessungen als bei den Versuchsbalken gewählt worden. Grund hierfür war das Bestreben, den Bewehrungsgrad in einem möglichst weiten Rahmen auch bei einem vorgegebenen Stahldurchmesser variieren zu können. Die Platte der Plattenbalken war 1500 mm breit und 150 mm dick angenommen worden. Die schlechtere Verbundqualität oben liegender Stähle wird durch halb so hohe Verbundspannungen wie bei unten liegenden Stählen berücksichtigt. Als Schubdeckung wird allein eine Bügelbewehrung angenommen. Der Querschnitt der Biegezugbewehrung wird über die Länge des plastifizierten Bereichs eines Balkens als konstant angesetzt. Bei den mit einer Einzellast in Feldmitte belasteten Balken wird die Verbreiterung der Zugkraftlinie unter der Einzellast, wie bereits im Abschnitt 6.3 beschreiben, durch den Ansatz eines Vorsatzmaßes erfaßt.

Als Materialkennwerte wurden in der Studie folgende Werte angenommen:

##### Beton

Mittlere Betonwürfeldruckfestigkeit:	$\beta_w = 40 \text{ N/mm}^2$
Rechenfestigkeit:	$\beta_R = 23 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul:	$E_b = 30\,000 \text{ N/mm}^2$
Größenbeiwert der Biegedruckfestigkeit:	$\alpha_w = 0,675$

## Stahl

Stahlsorte	<u>BSt 420/500 RK</u>	<u>BSt 500 S</u>
Zugfestigkeit	$R_m = 530 \text{ N/mm}^2$	$R_m = 650 \text{ N/mm}^2$
Streck- bzw. 0,2 % Dehngrenze	$R_{p0,2} = 430 \text{ N/mm}^2$	$R_e = 530 \text{ N/mm}^2$
Gleichmaßdehnung	$A_G = 4 \%$	$A_G = 10 \%$
Länge des Lüdersbereichs	-	$\varepsilon_F = 1,5 \%$
Exponent m für		
$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + 0,002 \left( \frac{\sigma_s}{R_{p0,2}} \right)^m$	$m = 14,0$	-
Hilfswerte zum Darstellen der	-	$\sigma_{s,3} = 596 \text{ N/mm}^2$
$\sigma_s$ - $\varepsilon_s$ -Linie (s. Abschn. 6.2)	-	$\sigma_{s,4} = 634 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul		$E_s = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

Die errechneten Drehfähigkeiten sind in Abhängigkeit vom mechanischen Bewehrungsgrad in den Bildern 27 bis 32 graphisch dargestellt. In den Bildern 27 und 28 sind die Drehfähigkeiten plastischer Gelenke in Plattenbalken denen in Rechteckbalken gegenübergestellt, jeweils bei in Betonierlage oben liegender Bewehrung aus Stäben Durchmesser 10 mm oder 20 mm der Stahlsorten BSt 420/500 RK oder BSt 500 S. In den Bildern 29 und 30 werden, wieder für Stäbe Durchmesser 10 mm und 20 mm aus Betonstahl BSt 420/500 RK oder BSt 500 S, Rechteckbalken, bei denen die Bewehrung unten liegend angeordnet ist, mit Rechteckbalken mit oben liegender Bewehrung verglichen. Die Bilder 31 und 32 zeigen die errechneten Drehfähigkeiten von Plattenbalken mit oben liegender Bewehrung bei stark unterschiedlichen Stabdurchmessern (6 mm - 14 mm - 28 mm) aus den Stahlsorten BSt 420/500 RK und BSt 500 S.

Wenn die in den Bildern 27 bis 32 gezeigten Drehfähigkeiten auch nur Rechenwerte sind, denen die Absicherung durch Versuchswerte fehlt, zeigen sie doch, zumindest qualitativ, die möglichen Einflüsse der genannten Parameter auf. So zeigt der Vergleich von Rechteckbalken und Plattenbalken (s. Bilder 27 und 28), beide mit oben liegender Bewehrung, bei Stahldurchmessern 10 mm im Bereich mittlerer Bewehrungsgrade größere Unterschiede in den Drehfähigkeiten beider Querschnittsformen. Ursache für das unterschiedliche Verhalten ist der Einfluß des Rißabstands. In den Plattenbalken ist der Rißabstand durch die größere Betonwirkungszone der Bewehrung erheblich größer als in Rechteckbalken gleichen Bewehrungsgrades. Bei den mit Stahldurchmesser 20 mm bewehrten Balken ist dagegen ein Einfluß der Querschnittsform nicht erkennbar, da der Rißabstand in beiden Balkenarten nahezu gleich ist.

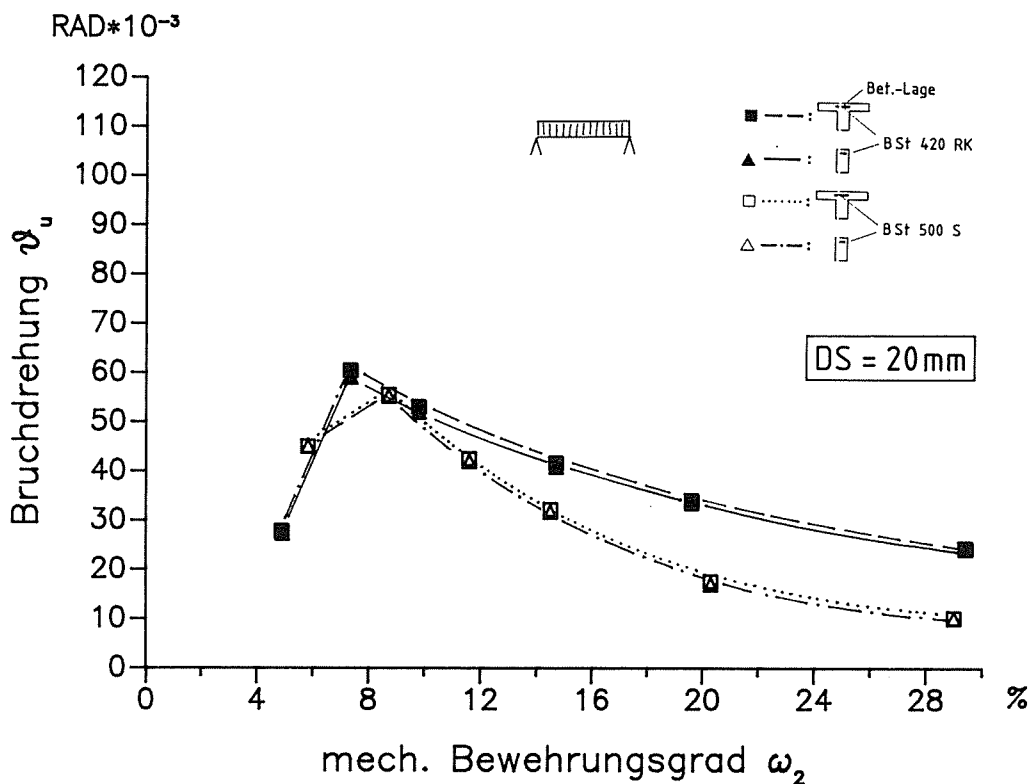
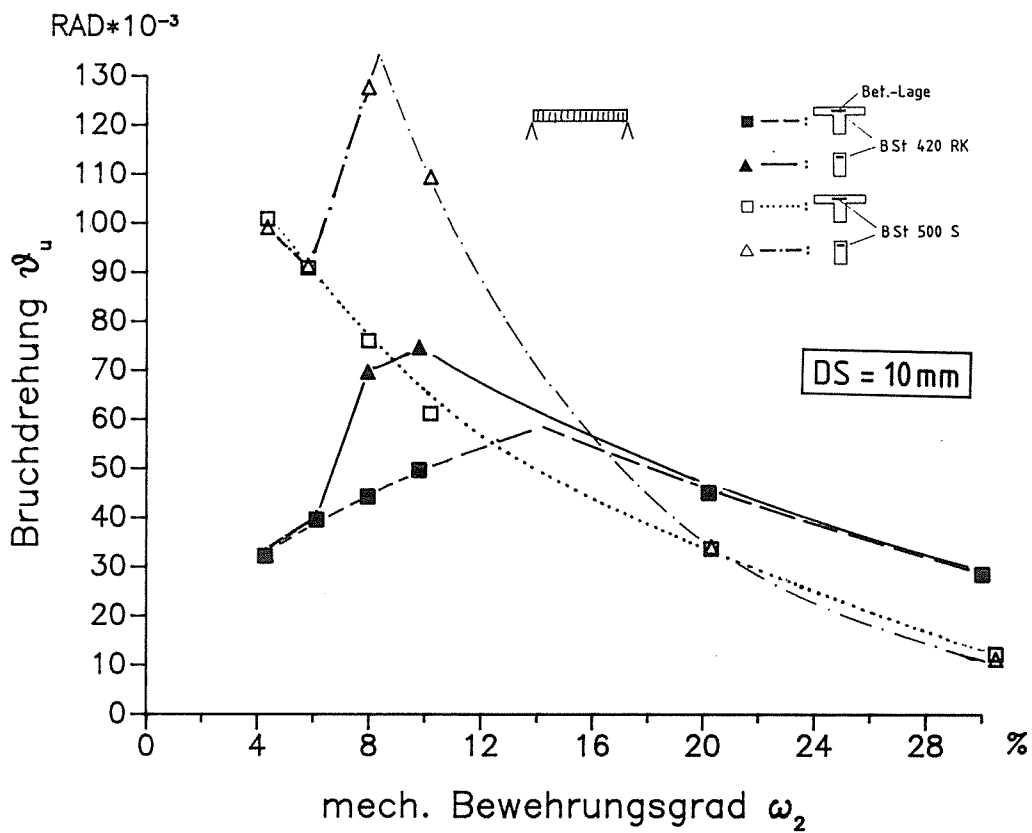


Bild 27  
 Berechnete Bruchdrehungen plastischer Gelenke in Rechteckbalken und Plattenbalken mit Platte in der Zugzone, belastet durch eine gleichmäßig verteilte Streckenlast und bewehrt mit Betonstählen BSt 420/500 RK oder BSt 500 der Durchmesser 10 mm und 20 mm bei in Betonierlage oben liegender Bewehrung

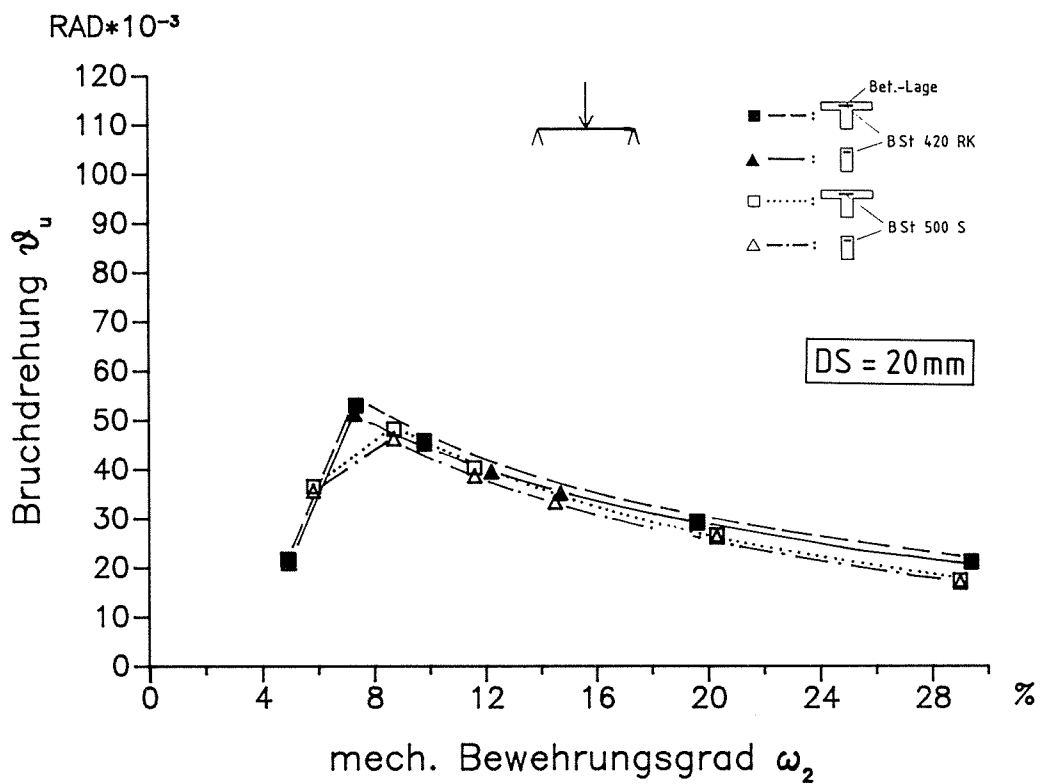
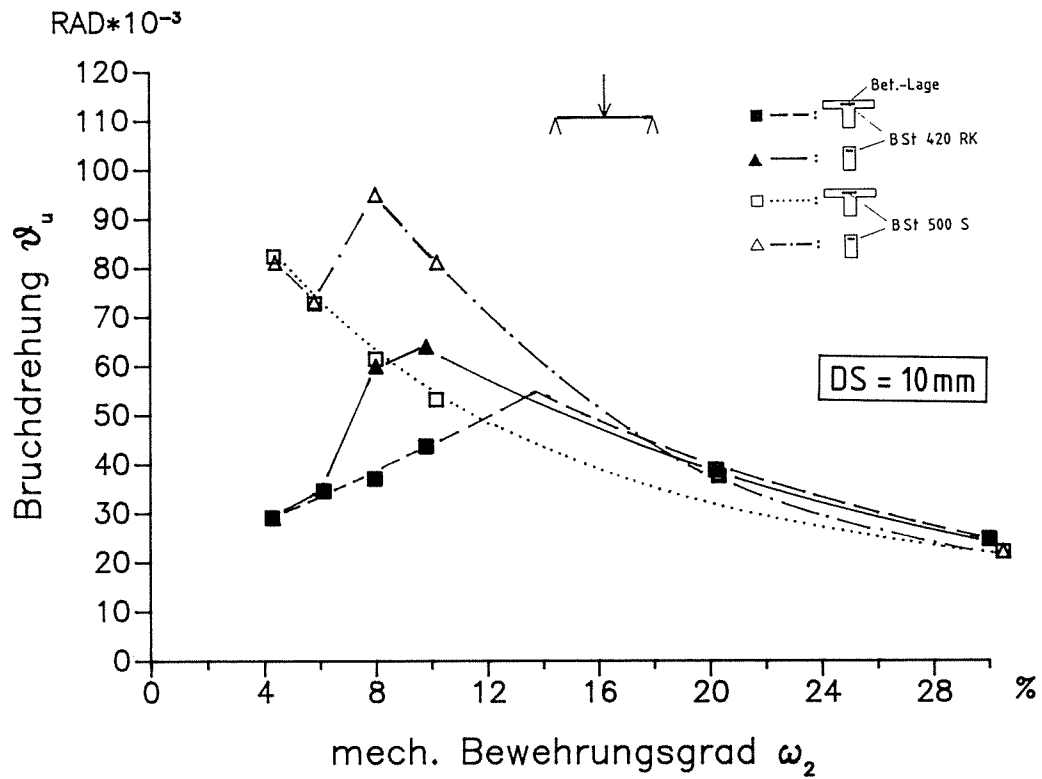


Bild 28  
Wie Bild 27, jetzt aber bei Belastung durch eine Einzellast in Feldmitte

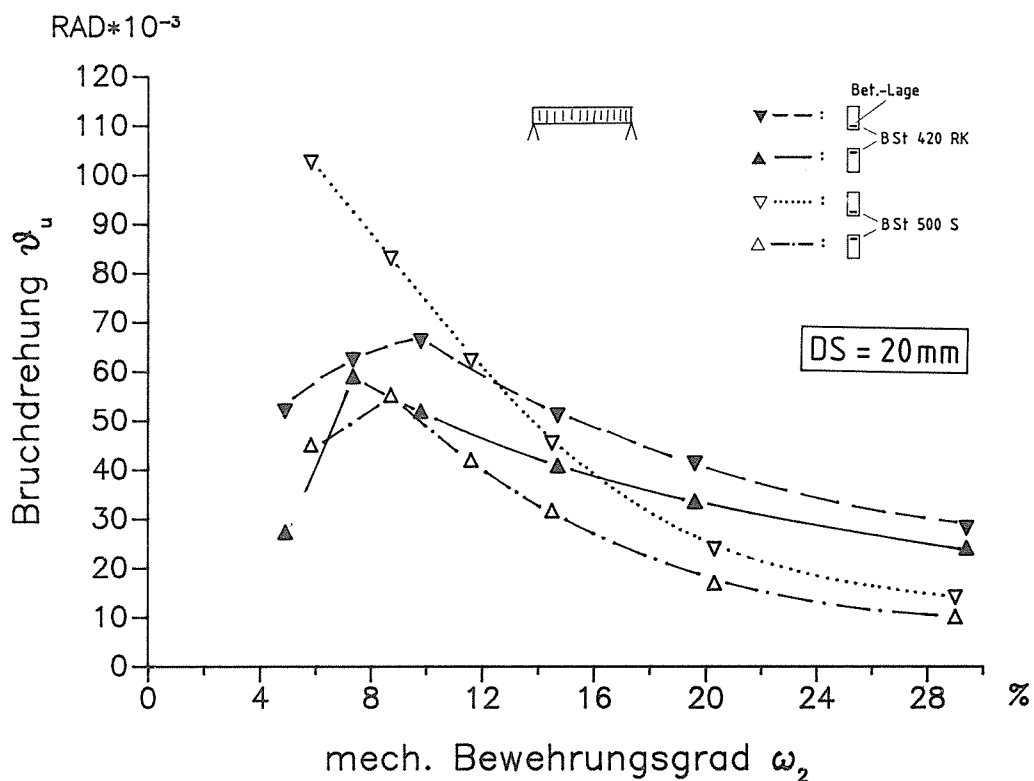
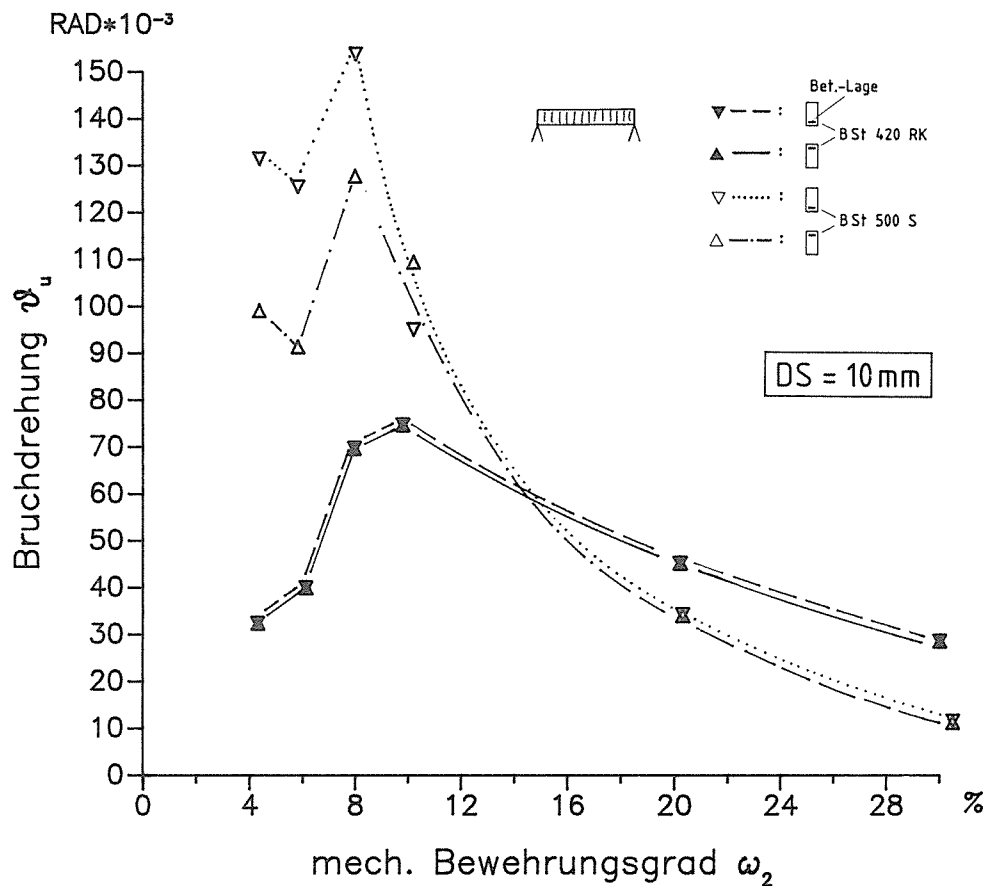


Bild 29  
 Berechnete Bruchdrehungen plastischer Gelenke in Rechteckbalken, belastet durch eine gleichmäßig verteilte Streckenlast und bewehrt mit Betonstählen BST 420/500 RK oder BST 500 S der Durchmesser 10 mm und 20 mm bei in Betonierlage oben liegender oder unten liegender Bewehrung



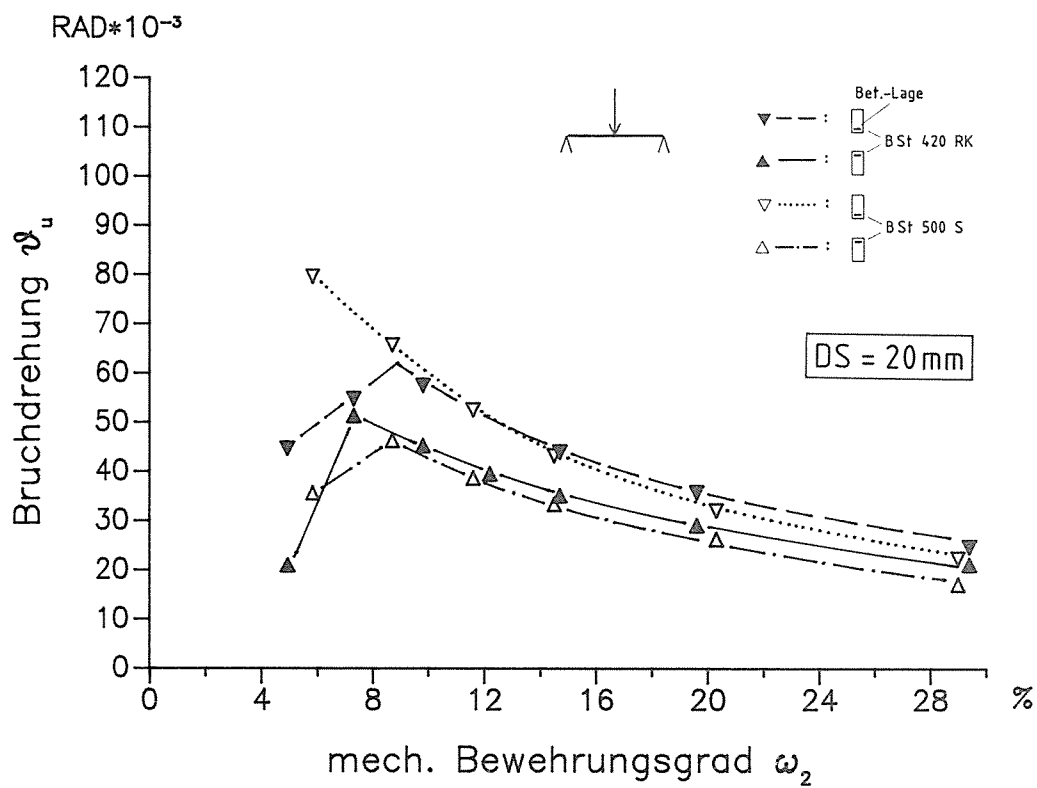
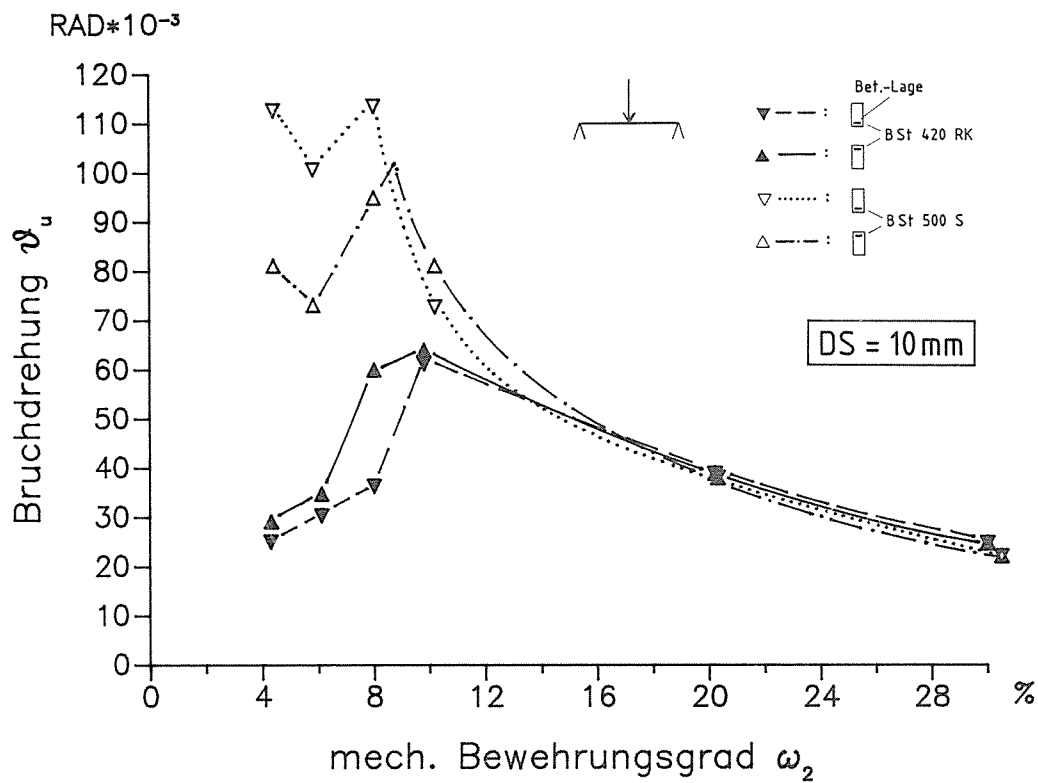


Bild 30  
Wie Bild 29, jetzt aber bei Belastung durch eine Einzellast in Feldmitte

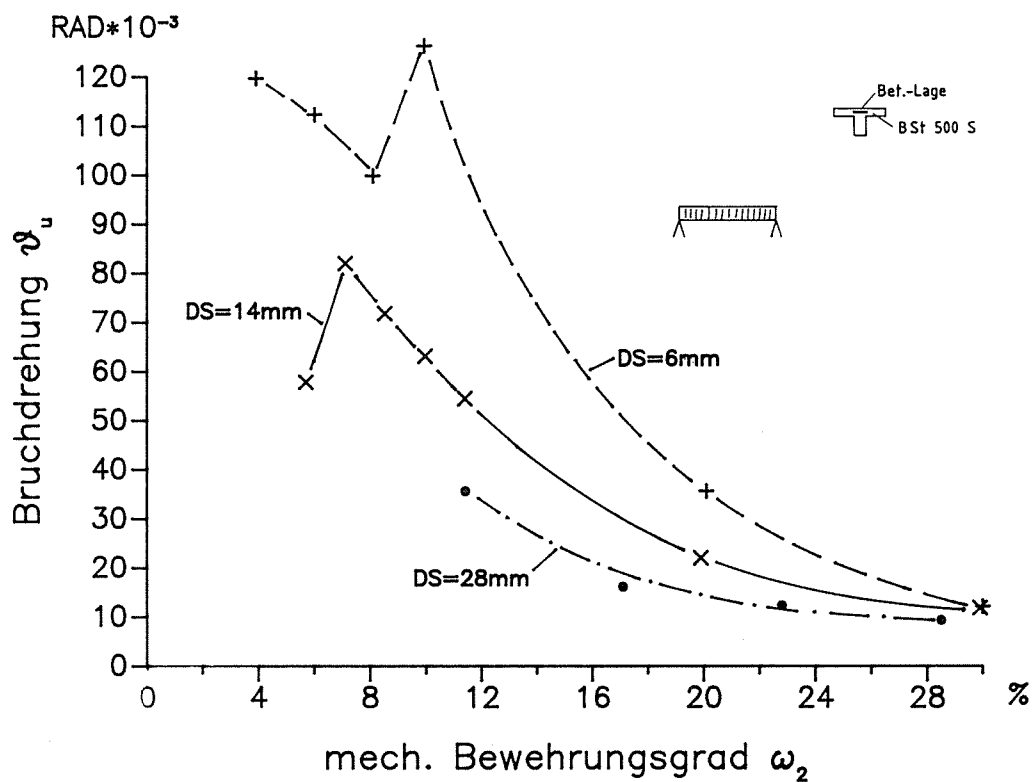
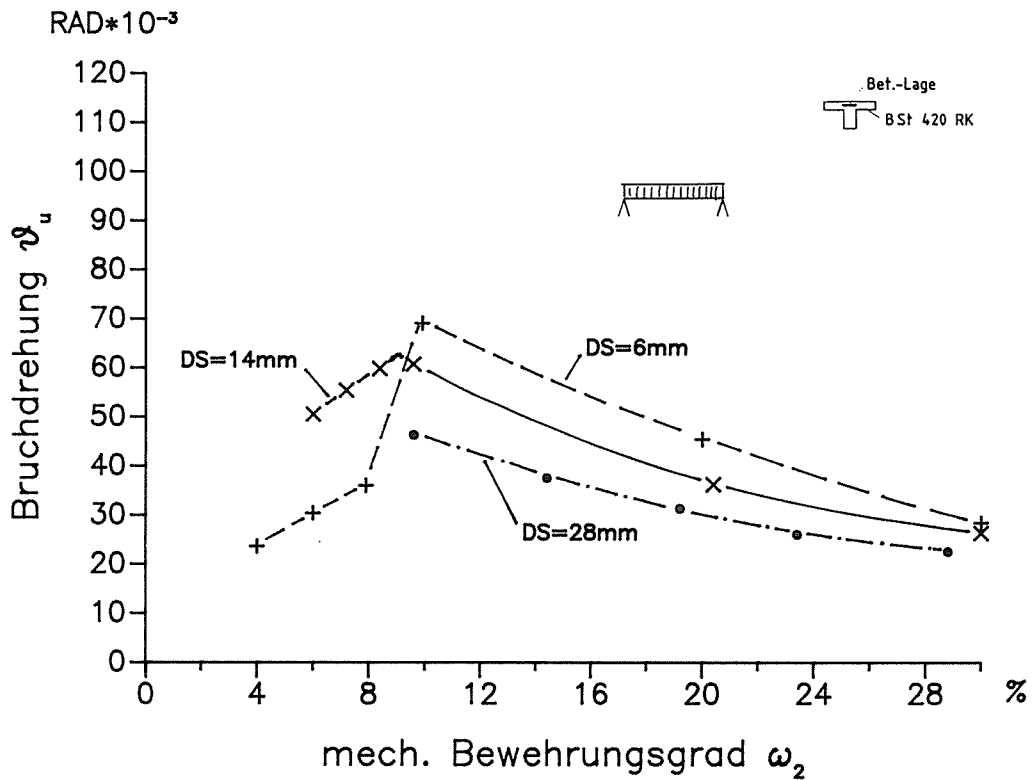


Bild 31

Berechnete Bruchdrehungen plastischer Gelenke in Plattenbalken mit Platte in der Zugzone, belastet durch eine gleichmäßig verteilte Streckenlast und bewehrt mit Betonstählen der Durchmesser 6 mm, 14 mm und 28 mm der Stahlsorten BSt 420/500 RK bzw. BSt 500 S

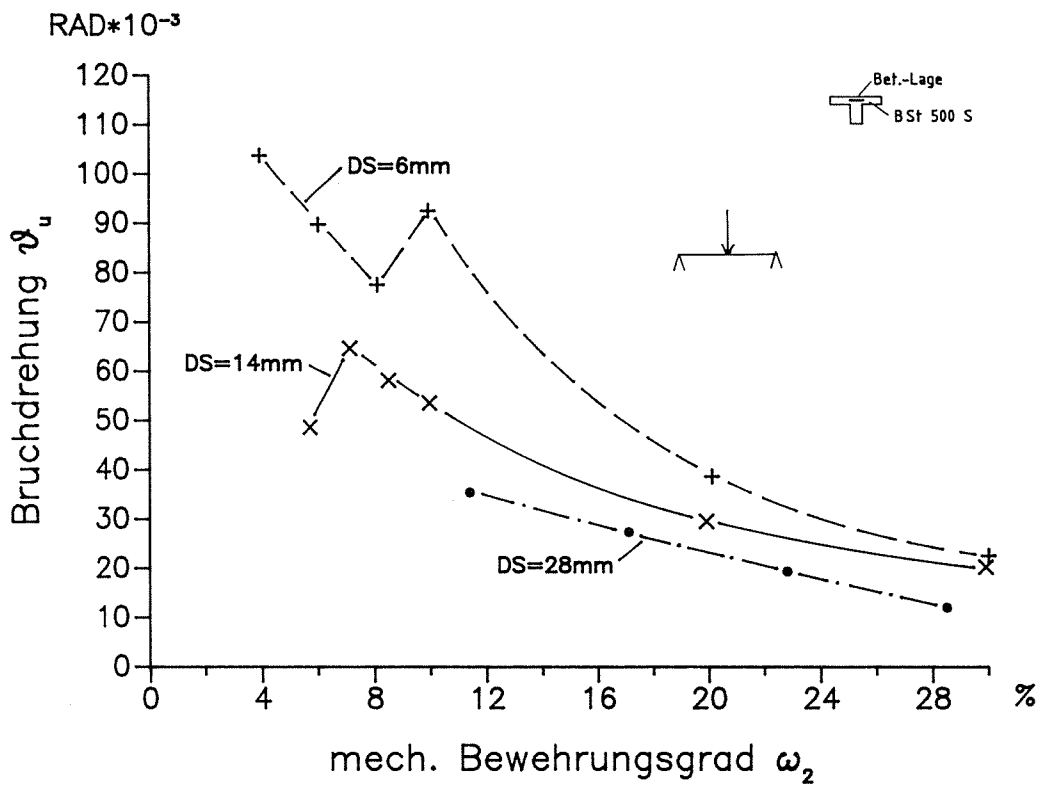
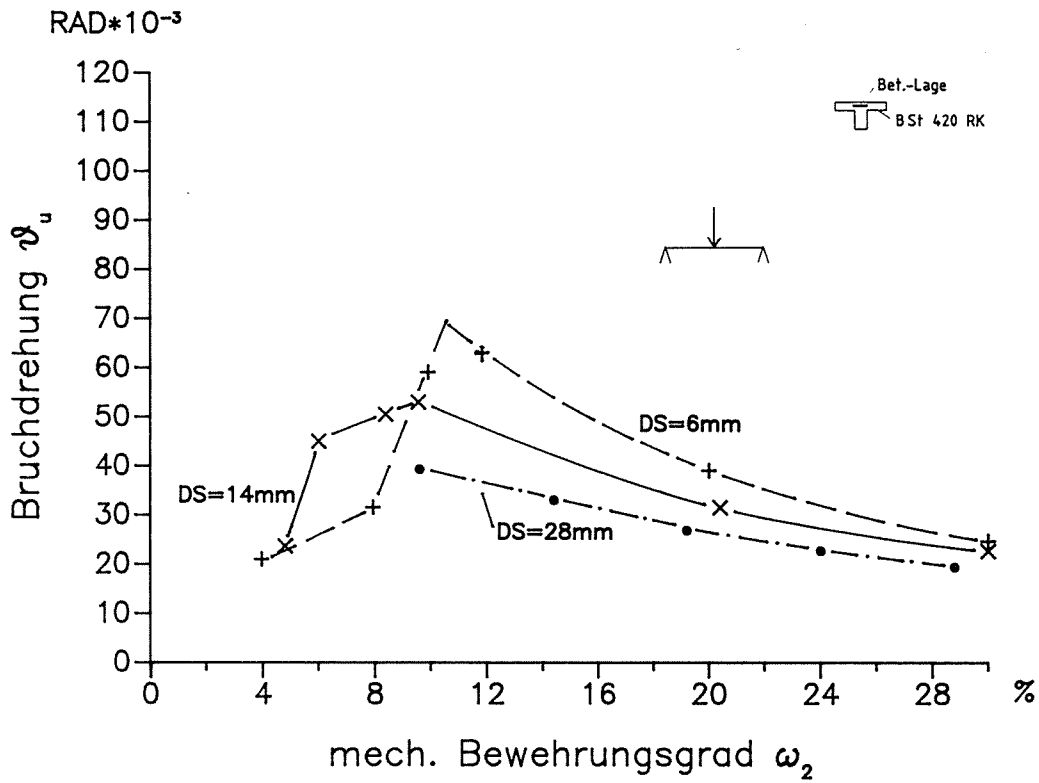


Bild 32  
 Wie Bild 31, jetzt aber bei Belastung durch eine Einzellast in Feldmitte

Das Bild 27 zeigt weiterhin deutlich die geringere Drehfähigkeit der plastischen Gelenke der mit Betonstahl BSt 500 S bewehrten Balken im Bereich höherer Bewehrungsgrade. Hier versagt der Beton der Druckzone, bevor die Stahlspannungen den Verfestigungsbereich erreicht haben, in den benachbarten Rissen liegen bei nur wenig kleineren Spannungen die Dehnungen des Stahls noch im elastischen Bereich (s. Abschnitt 4.3.2). Bei den durch eine Einzellast in Feldmitte beanspruchten Balken (s. Bild 28) gibt es diesen Abfall der Drehfähigkeiten bei den mit Betonstahl BSt 500 S bewehrten Balken nicht, da durch den Ansatz eines Versatzmaßes die Biegezugkraft über einen größeren Bereich konstant ist und sich somit in allen Rissen dieses Bereichs auch gleiche plastische Stahldehnwege ergeben.

Die Sprünge der  $\vartheta_u - \omega_2$ -Linie der mit Betonstahl BSt 500 S bewehrten Balken bei  $\omega_2 = 5\%$  bis  $8\%$  (s. Bilder 27 bis 32) sind eine Folge der durch das Rechenmodell sich ergebenden Halbierung des Rißabstandes mit steigendem Bewehrungsgrad.

Die Bilder 29 und 30 zeigen die Drehfähigkeiten plastischer Gelenke in Rechteckbalken bei unterschiedlicher Position der Bewehrung, oben oder unten liegend. Neben dem wieder deutlichen Einfluß der Stahlorte zeigen die Bilder größere Drehfähigkeiten der Balken mit unten liegender Bewehrung im Falle der mit Stählen Durchmesser 20 mm bewehrten Balken. Bei den mit Stählen Durchmesser 10 mm bewehrten Balken ist der Einfluß der Betonierlage gering. Die geringere Verbundgüte oben liegender Stähle wirkt sich auf die Drehfähigkeit durch größeren Rißabstand negativ, durch geringere Dehnungsbehinderung des Stahls jedoch auch positiv aus. Beide Auswirkungen gleichen sich in etwa aus, so daß, je nach Größe anderer Parameter, mal die eine, mal die andere Auswirkung überwiegen kann.

Die letzten beiden Bilder, Bilder 31 und 32, sollen den Einfluß des Stahldurchmessers dokumentieren. Bei den mit dem Betonstahl BSt 500 S bewehrten Plattenbalken fällt stets die Drehfähigkeit mit steigendem Stahldurchmesser. Die mit Betonstahl BSt 420/500 RK bewehrten Balken zeigen die gleiche Tendenz, bis auf die mit extrem dünnen Stählen Durchmesser 6 mm bewehrten Balken bei Bewehrungsgraden unter  $\omega_2 = 10\%$ , bei denen die Drehfähigkeit durch die starke Behinderung der Stahldehnung infolge des guten Verbundes der dünnen Stähle erheblich abfällt.

## 7. Zusammenfassung und gewonnene Erkenntnisse

Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Plattenbalken mit Platte in der Zugzone wurde sowohl in Versuchen als auch rechnerisch ermittelt. Zur experimentellen Bestimmung der Drehfähigkeit sind 5 Plattenbalken mit Platte in der Zugzone und zum Vergleich 2 Balken mit Rechteckquerschnitt geprüft worden (Prüfprogramm s. Abschnitt 2). Die 4 m langen und 0,40 m hohen Balken waren mit je 4 Betonstabstählen mit 10 mm bzw. 16 mm Durchmesser der Stahlsorte BSt 500 S (mikrolegiert) bewehrt. Bei allen Balken wurde die Drehfähigkeit durch das Versagen der Druckzone erreicht, wobei als Merkmal des Versagens eine beginnende Rißbildung in der Druckzone angesehen wurde. Stets waren die Abstände der Biegerisse in den Plattenbalken größer als in den entsprechenden Rechteckbalken. Bei den mit Stählen des Durchmessers 10 mm bewehrten Plattenbalken weitete sich jedoch nur ein Riß an der Bruchstelle der aus einer Betonstahlmatte bestehenden Plattenbewehrung zum plastischen Gelenk. Trotzdem war die erreichte Drehfähigkeit in dem durch eine Streckenlast belasteten Plattenbalken nur rd. 35 % kleiner als die in dem gleichbelasteten und ebenfalls mit Stählen des Durchmessers 10 mm bewehrten Rechteckbalken.

Die beim Betonstahl BSt 500 S möglichen hohen Stahldehnungen führten bei den mit Stählen des Durchmessers 10 mm bewehrten Plattenbalken zu großen Verschiebungen zwischen Beton und Stahl, durch die der Verbund zwischen Beton und Stahl über eine weite Strecke völlig zerstört wurde und so der Stahl sich unbehindert dehnen konnte. Diese sukzessive, völlige Zerstörung des Verbunds wurde bei statischer Belastung beobachtet. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß bei stoßartiger Belastung und ähnlich hohen Stahldehnungen sich der Verbund von Betonstahl BSt 500 S ähnlich verhält wie der eines glatten Betonstahls, der bei statischer Belastung eine sukzessiv auftretende, weit in den Beton reichende Ablösung aufweist, bei stoßartiger Belastung jedoch nur auf eine wesentlich kleinere Länge zerstört wird (s. [13]).

Bei den mit Stählen des Durchmessers 16 mm bewehrten Balken war insgesamt die Drehfähigkeit bei fast doppelter Tragfähigkeit nur rd. halb so groß wie bei den schwächer bewehrten Balken und auch hier die des durch eine Streckenlast belasteten Plattenbalkens

ebenfalls kleiner als die Drehfähigkeit des gleichbelasteten Rechteckbalkens. Die durch eine Einzellast in Feldmitte belasteten Plattenbalken wiesen bei beiden Durchmessern gegenüber den entsprechenden, aber durch eine gleichmäßig verteilte Streckenlast belasteten Plattenbalken eine um rd. 33 % größere Drehfähigkeit auf, was aber zum Teil auf die direkte Lasteinleitung im Lastfall "Einzellast" zurückzuführen ist, durch die die Tragfähigkeit der Druckzone erhöht wird (s. Abschnitt 4.3.2).

Die Versuche an 4 m langen Balken wurden ergänzt durch Versuche an 0,7 m langen Kleinbalken, die in einer ersten Serie mit Betonstählen BSt 500 S unterschiedlicher Durchmesser und in einer zweiten Serie teils mit Abschnitten aus kaltverformten Betonstahlmatten-Stäben, teils mit Stababschnitten gleicher Durchmesser und Art, aber in geglähter Form bewehrt waren. Beide Serien dienten der Untersuchung des Einflusses des Stabdurchmessers auf die Dehnungen des einbetonierten Stahls, da von dem Stahldurchmesser das Verhältnis zwischen der vom Stahl übertragbaren Zugkraft zu der am Umfang des Stahls wirkenden Verbundkraft bestimmt wird. Je kleiner der Stahldurchmesser ist, desto stärker wird die Dehnung des Stahls durch den umgebenden Beton behindert. Die an diesen Kleinbalken durchgeführten Versuche erlauben folgende Aussagen:

- Die bei den 4 m langen und mit Stählen (BSt 500 S) des Durchmessers 10 mm beobachtete sukzessive, völlige Zerstörung des Verbunds konnte bei einem Stahldurchmesser 8 mm nur stark eingeschränkt, bei noch kleineren Durchmessern gleicher Stahlart nicht mehr beobachtet werden.
- Die Versuche sprechen nicht dagegen, daß eine Zusatzbewehrung in Form von Betonstahlmatten oder Bügelmatten, wenn aus einem Stahl ähnlicher Duktilität wie die eines BSt 500 S hergestellt, trotz der gegenüber der Hauptzugbewehrung wesentlich kleineren Durchmesser eine ausreichende Verformungsfähigkeit im einbetonierten Zustand besitzen, um ein ausreichendes Öffnen der Risse im plastischen Gelenk zu erlauben, ohne daß durch ihren Bruch eine Unstetigkeit in der Biegesteifigkeit entsteht.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurde rechnerisch die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in rd. 300 unterschiedlich

ausgebildeten oder belasteten Balken ermittelt. Parameter dieser Studie waren Querschnittsform, Lage der Bewehrung, Stahlsorte, Bewehrungsgrad und Lastbild. Wenn diese Rechenwerte auch nicht durch Versuchsergebnisse abgesichert sind, zeigen sie doch qualitativ die möglichen Einflüsse der genannten Parameter auf.

Aufgrund der Versuchsergebnisse und der rechnerisch durchgeführten Parameterstudie sind für die in der Einleitung aufgeworfenen Fragen, Einfluß des größeren Betonquerschnitts in der Zugzone bei einem Plattenbalken im Bereich negativer Momente, Einfluß des schlechteren Verbunds oben liegender Stähle und Einfluß der Belastungsart auf die Drehfähigkeit plastischer Gelenke, folgende Antworten möglich:

In Plattenbalken mit zugebeanspruchter Platte ist die Drehfähigkeit eines plastischen Gelenks nach den Versuchsergebnissen um 20 % bis 50 % kleiner als die eines plastischen Gelenks in einem entsprechenden Rechteckbalken. Die rechnerische Parameterstudie bestätigt diese Tendenz jedoch nur für Bewehrungsgrade unter  $\omega_2 = 17 \% (\mu_2 = 0,74 \%)$  und Stahldurchmesser 10 mm.

Die geringere Verbundgüte oben liegender Stähle wirkt sich auf die Drehfähigkeit durch den sich bei schlechterem Verbund einstellenden größeren Rißabstand negativ, durch geringere Dehnungsbehinderung jedoch auch positiv aus. Beide Einflüsse gleichen sich in etwa aus. Bei größeren Durchmesser der Stähle ist die Drehfähigkeit in Balken mit unten liegender Bewehrung nach der Parameterstudie aber deutlich größer als die Balken mit oben liegender Bewehrung.

Die durch eine Einzellast beanspruchten Balken erreichten im Versuch eine um rd. 30 % größere Drehfähigkeit als die durch eine Streckenlast belasteten Balken, wobei jedoch der stützende Einfluß der direkten Einleitung der Einzellast zu beachten ist. Die Parameterstudie ergab einen erheblichen Einfluß des Bewehrungsgrads. Bei einem Bewehrungsgrad  $\omega_2 = 8 \% (\mu_2 = 0,35 \%)$  ist danach die Drehfähigkeit um 10 % kleiner, bei  $\omega_2 = 20 \% (\mu_2 = 0,87 \%)$  aber um 20 % bis 50 % und bei  $\omega_2 = 29 \% (\mu_2 = 1,26 \%)$  um rd. 70 % größer als bei einem durch eine Streckenlast beanspruchten Balken.

## Schrifttum

- [1] DIN 1045, Beton und Stahlbeton  
Ausgabe Juli 1988
- [2] DIN 1048 Teil 1, Prüfverfahren für Beton; Frischbeton,  
Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper  
Ausgabe Dezember 1978
- [3] DIN 488, Betonstahl; Sorten, Eigenschaften, Kennzeichen  
Ausgabe September 1984
- [4] DIN 488, Blatt 1, Betonstahl; Begriffe, Eigenschaften,  
Werkkennzeichen  
Ausgabe April 1972
- [5] Anwendungstechnische Untersuchungen an Betonstahl, Teil 1:  
Ermittlung des Einflusses der Gleichmaßdehnung von Beton-  
stählen auf das Verhalten von Stahlbetonkonstruktionen  
Technische Forschung EGKS Nr. 7210-KD/106 F 4.4/77 Verein  
Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf 1984
- [6] Soretz, S.: Über den Einfluß der Spannungs-Dehnungs-Linie  
des Bewehrungsstahles auf die Verformungsfähigkeit und die  
Tragfähigkeit von Stahlbetonbalken auf Biegung  
Betonstahl in Entwicklung, TOR-ISTEG Steel Corporation  
Luxembourg, Heft 68, 1970
- [7] Langer, P.: Verdrehfähigkeit plastischer Tragwerksbereiche  
im Stahlbetonbau  
Diss. Universität Stuttgart, 1987
- [8] Eifler, H.: Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem  
Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen  
biegebeanspruchter Stahlbetonbalken  
Diss. Technische Universität Berlin, 1983 bzw. BAM-For-  
schungsbericht 96, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM),  
Berlin, 1983
- [9] Eifler, H.; Plauk, G.: Drehfähigkeit plastischer Gelenke in  
biegebeanspruchten Stahlbetonkonstruktionen, Teil A: Expe-  
rimentelle Ermittlung der Drehfähigkeit plastischer Gelenke  
in biegebeanspruchten Stahlbetonbalken  
Bericht zum Forschungsvorhaben BAM Vh 221.2.221, Bundesan-  
stalt für Materialprüfung (BAM), Berlin, 1974
- [10] Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau, 3. Teil  
Springer-Verlag Berlin.Heidelberg.New York, 1974
- [11] Eifler, H.; Struck, W.: Berechnung der Drehfähigkeit plä-  
stischer Gelenke in Stahlbetonrechteck- und Plattenbalken  
mit Berücksichtigung des verschieblichen Verbundes  
Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), Heft 3, S. 53-59
- [12] Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau, 4. Teil  
Springer-Verlag Berlin.Heidelberg.New York, 1976
- [13] Limberger, E.; Brandes, K.; Herter, J.; Berner, K.: Kine-  
tische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahl-  
betonbauteilen  
BAM-Forschungsbericht 127, Bundesanstalt für Materialprü-  
fung (BAM), Berlin, 1986



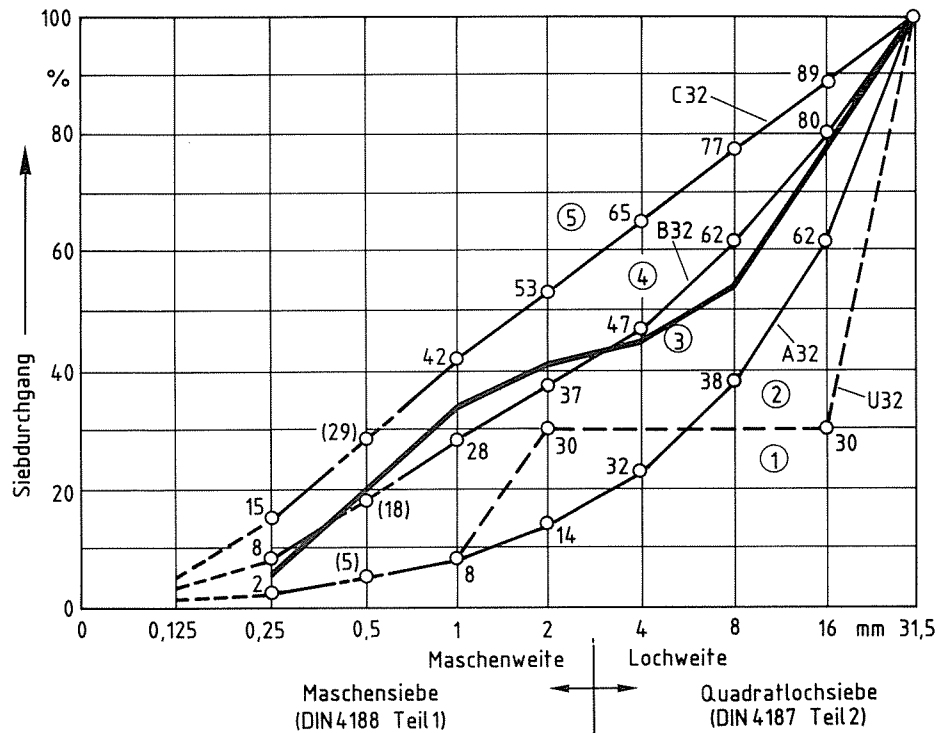


Bild A1  
 Sieblinie (dick ausgezogen) des für die Versuche verwendeten Zuschlaggemisches im Vergleich mit den Sieblinien für Größtkorn 32 mm der DIN 1045, Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Ausgabe Dezember 1978

Tafel A1  
 Frischbetonkennwerte, Würfel- und Bohrkerndruckfestigkeit, Biegezugfestigkeit

Mischung Nr.	Balken bzw. Prisma	Frischbeton			Festbeton							
		Wasserzementwert	Ausbreitmaß	Rohdichten	Würfeldruckfestigkeiten 1)			Bohrkern-2) druckfestigkeit	Biegezug-3) festigkeit			
					Güteprüfung		Rohdichte		Zur Zeit der Balkenprüfung Alter	$\beta_{BZ}$	Rohdichte der Prismen	
			cm	kg/dm <sup>3</sup>	$\beta_{w,14}$	$\beta_{w,28}$	kg/dm <sup>3</sup>	Tage	N/mm <sup>2</sup>		kg/dm <sup>3</sup>	
1	R10	0,624	44/49	2,39	33,5 <sup>5)</sup>	37,2 <sup>5)</sup>	2,35	43	40,0 <sup>4)</sup>	-	4,5	2,34
	76							41,2 <sup>4)</sup>				
2	R16	0,58	47,5/50	2,41	35,3 <sup>4)</sup>	39,2 <sup>6)</sup>	2,40	29	~39,2	-	4,2	2,35
	48							41,8 <sup>5)</sup>				
3	Plz10-F	0,55	48,5/48	2,41	34,7 <sup>4)</sup>	39,5 <sup>6)</sup>	2,37	27	~39,5	35,0	-	-
	43							40,8 <sup>5)</sup>	-	-		
4	Prismen P4 P6 P8 P10	0,58	50/50	2,37	-	40,4 <sup>6)</sup>	2,35	29 und 30	~40,4	-	-	-
5	Plz10-F, oM.	0,60	48/46	2,37	-	38,7 <sup>6)</sup>	2,33	36	39,7 <sup>4)</sup>	-	-	-
	Prismen P4K P4U P6K P6U							29	~38,7			

1) Würfel mit 20 cm Kantenlänge      2) Bohrkerndurchmesser 100 mm, Betonalter der 4 Kerne: 49 Tage  
 3) im Alter von 28 Tagen              4) 1 Würfel      5) 2 Würfel      6) 3 Würfel

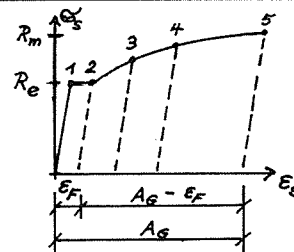
Prisma P.-Nr.	Rohdichte		Prismendruckfestigkeit $\beta_p$		Druckelastizitätsmodul $E_b$	
	Einzelwert	Mittel	Einzelwert	Mittel	Einzelwert	Mittel
-	kg/dm <sup>3</sup>		N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>	
1992	2,29	2,28	31,6	31,4	-	-
1993	2,28		30,6			
1994	2,29		30,2			
1989	2,27	2,28	31,9	31,4	27 400	27 300
1990	2,27		32,6		26 800	
1991	2,27		31,6		27 800	

Tafel A2  
Prismendruckfestigkeit  
und statischer  
Druckelastizitätsmodul

Tafel A3  
Mechanische Kennwerte der Betonstähle

Stahlsorte	Durchmesser $d_s$	Stange	Istquerschnitt $A_{s,ist}$	Mechanische Kennwerte					Hilfswerte zur Beschreibung des Kurvenverlaufs				Eingebaut in Balken	
				Streckgrenze $R_e$	0,2% Dehngrenze $R_{p0,2}$	Zugfestigkeit $R_m$	Gleichmaßdehnung $A_G$	Bruchdehnung $A_{10}$	1) $\epsilon_F$	2) $\sigma_{s,3}$	3) $\sigma_{s,4}$	4) Exponent $m$		
-	mm	-	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>					%	%	N/mm <sup>2</sup>	-	-	
BSt 500 S	6	-	27,9	656	-	724	1,10	10,9	20,0	4,0	701	715	-	P6
	8	-	49,9	634	-	721	1,14	10,7	16,5	2,7	694	714	-	P8
	10	1	81,2	499	-	653	1,31	15,5	22,5	1,5	611	644	-	Plz10-F, oM. (3 Stäbe)
		2	80,3	510	-	670	1,31	11,0	22,5	1,6	611	648	-	R10 (3 Stäbe)
		3	79,5	516	-	664	1,29	12,5	22,5	1,9	602	634	-	R10 (1 Stab) / P10
		4	79,5	505	-	652	1,29	11,0	21,0	1,5	587	628	-	Plz10 (1 Stab) Plz10-F (1 Stab) Plz10-F, oM. ( " )
		5	79,5	510	-	654	1,28	12,5	20,5	1,7	602	637	-	Plz10 (3 Stäbe)
		6	80,3	508	-	650	1,28	12,5	22,5	1,7	596	634	-	Plz10-F (3 Stäbe)
	16	7	194	487	-	619	1,27	11,6	18,9	1,7	572	603	-	R16 (3 Stäbe)
		9	194	515	-	709	1,38	10,9	16,9	0,5	639	691	-	Plz16 (3 Stäbe)
		10	194	474	-	619	1,28	12,2	18,5	1,5	572	606	-	R16 (1 Stab)
		11	195	518	-	708	1,37	10,4	19,0	0,5	640	689	-	Plz-F (3 Stäbe)
	12	195	513	-	712	1,39	10,5	16,5	0,7	577	677	-	Plz16 (1 Stab) Plz16-F (1 Stab)	
BSt 500 M	4	-	13,5	-	699	762	1,09	1,5	- 5)	-	-	-	23,3	in den Platten der Plattenbalken
	6,5	-	31,4	-	631	665	1,05	2,2	- 5)	-	-	-	45,7	in den Platten der Plattenbalken
		-	30,7	-	661	674	1,02	2,5	7,0	-	-	-	130,0	P6K und in den Platten der Plattenbalken
BSt 500 M geblüht	6,5	-	31,0	242	-	355	1,47	22,5	36,5	2,9	317	343	-	P6U
BSt 500/550 RK	4	-	12,7	-	498	541	1,09	5,8	- 5)	-	-	-	40,7	P4
		-	12,7	-	516	557	1,08	3,7	- 5)	-	-	-	38,2	
	-	11,9	-	571	613	1,07	5,0	- 5)	-	-	-	45,4	P4K	
BSt 500/550 RK geblüht	4	-	12,4	177	-	290	1,64	23,0	- 5)	1,5	254	278	-	P4U

- 1)  $\epsilon_F$ : Länge des Lüders-Bereichs mit  $\sigma_s = \text{const.}$
- 2) Spannung bei der Dehnung  $\epsilon_{s,p} = \epsilon_F + \frac{A_G - \epsilon_F}{4}$  s. Skizze, Pkt. 3
- 3) Spannung bei der Dehnung  $\epsilon_{s,p} = \epsilon_F + \frac{A_G - \epsilon_F}{2}$  s. Skizze, Pkt. 4
- 4) Exponent im Ansatz  $\epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + 0,002 \left( \frac{\sigma_s}{R_{p0,2}} \right)^m$
- 5) nicht gemessen



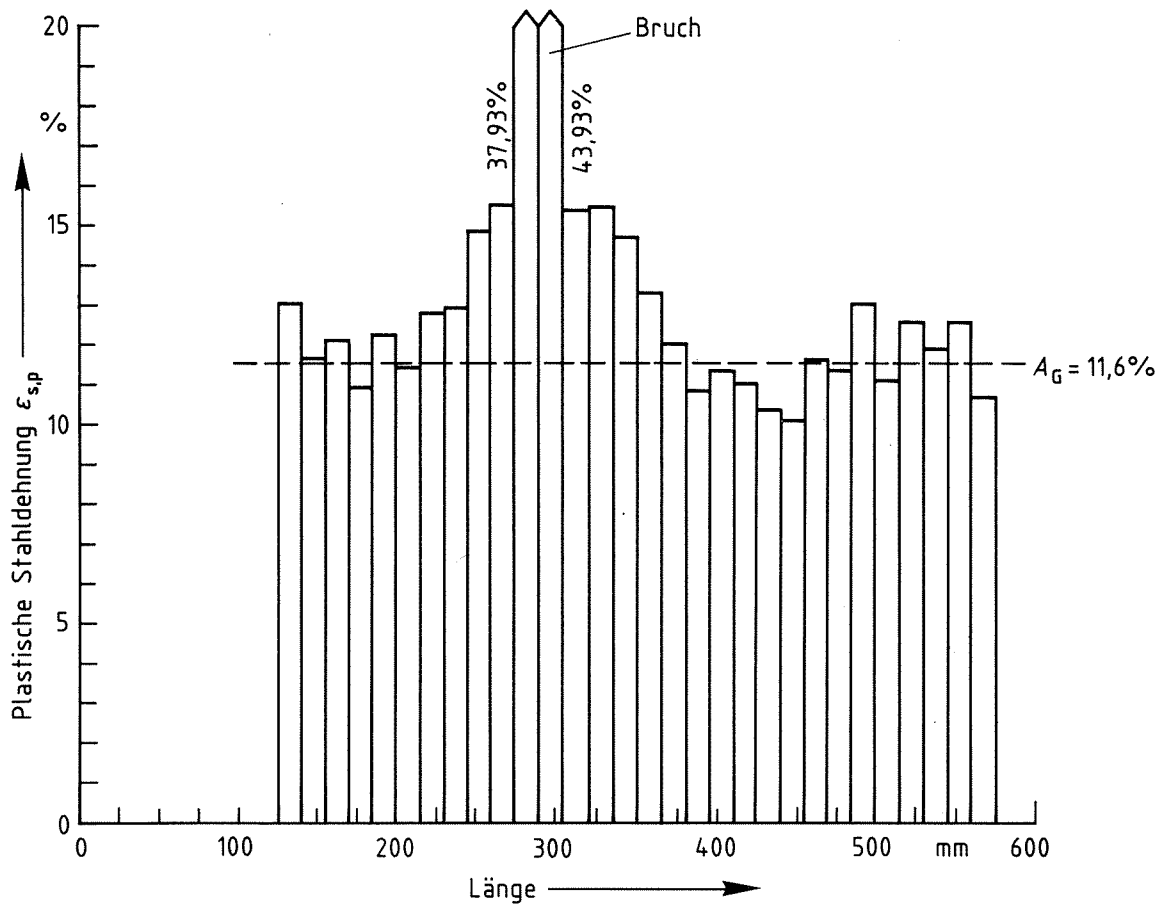


Bild A2

Verteilung der nach dem Zugversuch gemessenen plastischen Stahldehnungen über die Stablänge. Probe aus Stange 7,  $d_s = 16$  mm, BSt 500 S (s. Tafel A3)

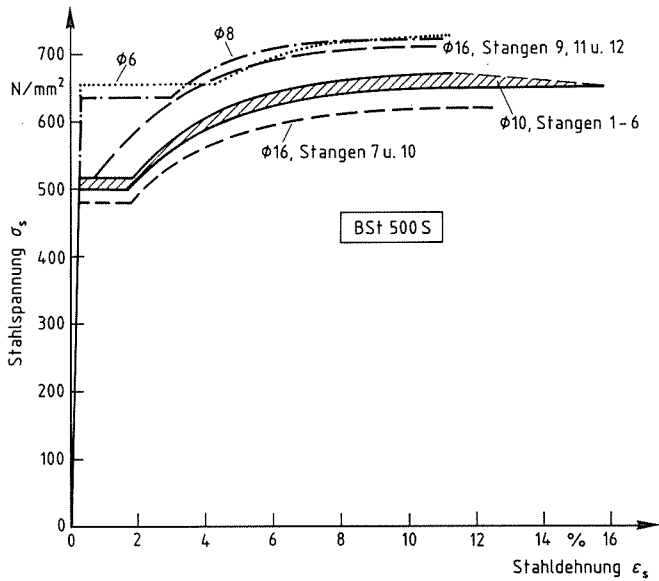


Bild A3  
Spannungs-Dehnungs-Linien  
der Betonstähle der Sorte  
BSSt 500 S

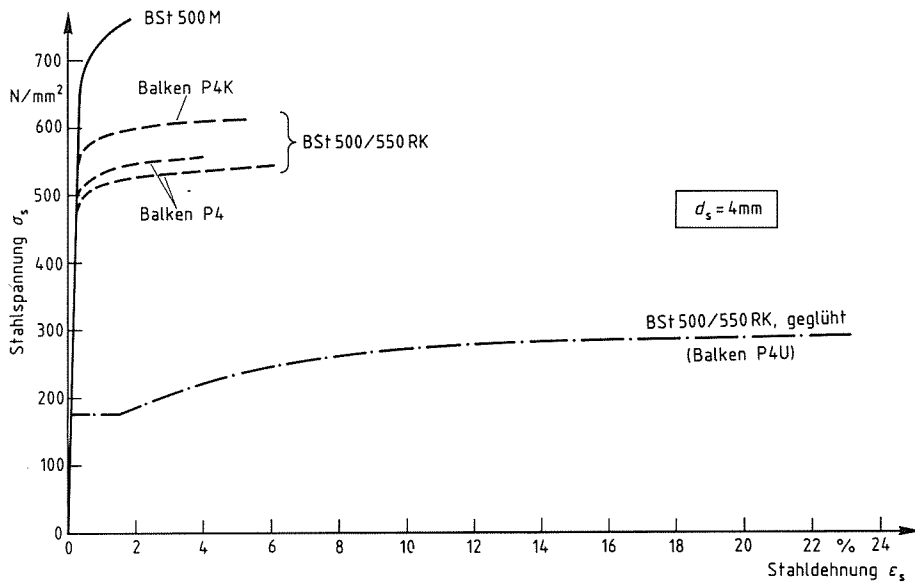


Bild A4  
Spannungs-Dehnungs-Linien von Betonstählen  $d_s = 4$  mm aus unter-  
schiedlichen Stahlorten

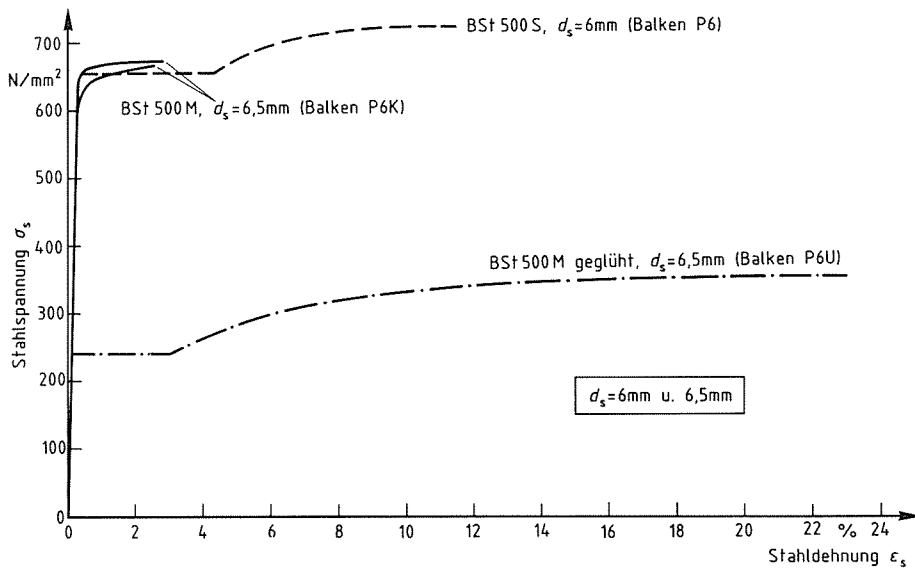


Bild A5  
Spannungs-Dehnungs-Linien von Betonstählen  $d_s = 6$  mm bzw.  
 $d_s = 6,5$  mm aus unterschiedlichen Stahlorten

## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968  
**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)  
G. Andrae  
**Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebnen**

Nr. 3/1970  
J. Ziebs  
**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)  
A. Burmester  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971  
N. Steiner  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971  
P. Schneider  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971  
H.-J. Petrowitz  
**Chromatographie und chemische Konstitution – Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971  
H. Veith  
**Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971  
K.-H. Möller  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972  
D. Aurich, E. Martin  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972  
H.-J. Krause  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972  
H. Feuerberg  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972  
K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörperlgleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972  
E. Fischer  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972  
H. Pohl  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972  
E. Knublauch  
**Über Ausführung und Assagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**

Nr. 17/1972  
P. Reimers  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973  
W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973  
K. Kaffanke; H. Czichos

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973  
R. Rudolphi  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973  
D. Klaffke, W. Maennig  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Nr. 22/1973  
R. Rudolphi, E. Knublauch  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973  
W. Ruske  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973  
J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973  
E. Knublauch  
**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974  
P. Jost, P. Reimers, P. Weise  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM – Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974  
H. Wüstenberg  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974  
H. Heinrich  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974  
P. Schneider  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schallfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)  
H. Czichos, G. Salomon  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975  
G. Fuhrmann  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechsellastbeanspruchung**

Nr. 32/1975  
R. Rudolphi, B. Böttcher  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975  
A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)  
H.-J. Deppe  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff Nr. 35/1976**

E. Limberger  
**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**

Nr. 36/1976 (vergriffen)  
J. Hundt  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976  
W. Struck  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**

Nr. 38/1976  
K.-H. Habig  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976  
K. Kirschke, G. Kempf  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**

Nr. 40/1976  
H. Hantsche  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976  
B. Böttcher  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976  
S. Diellen  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976  
W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976  
W. Matthees  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**

Nr. 45/1976  
W. Paatsch  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**

Nr. 46/1977 (vergriffen)  
G. Schickert, H. Winkler  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**

Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**

Nr. 48/1977  
U. Holzlöhner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**

Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**

Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andrae, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**

Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**

Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperlgleitreibung**

Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**

Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**

Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**

Nr. 56/1979  
W. Brünnen, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**

Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**

- Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing  
 Nr. 58/1979  
 W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**
- Nr. 59/1979  
 G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**
- Nr. 60/1979  
 H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**
- Nr. 61/1979  
 K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmatrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**
- Nr. 62/1979  
 W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**
- Nr. 63/1979  
 E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**
- Nr. 64/1980  
 W. Rücker  
**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**
- Nr. 65/1980  
 P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**
- Nr. 66/1980  
 M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**
- Nr. 67/1980  
 W. Matthees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**
- Nr. 68/1980  
 D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines vollzentrischen Präzisions-Goniometers**
- Nr. 69/1980  
 F. Buchardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
 G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**
- Nr. 71/1980  
 W. Matthees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**
- Nr. 72/1980  
 R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**
- Nr. 73/1980  
 P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**
- Nr. 74/1980  
 R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**
- Nr. 75/1980  
 H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**
- Nr. 76/1980  
 D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**
- Nr. 77/1981  
 M. Gierloff, M. Maulzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**
- Nr. 78/1981  
 W. Rücker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**
- Nr. 79/1981  
 V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrübneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**
- Nr. 80/1981  
 A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**
- Nr. 81/1981  
 J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**
- Nr. 82/1982  
 R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches**  
**Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test**
- Nr. 83/1982  
 H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen**  
**- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -**
- Nr. 84/1982  
 R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982  
 H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung - Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ - Materials Research and Testing**  
**- Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme "Basic Technological Research" -**
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
 K. Niesel, P. Schimelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
 B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
 A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
 D. Conrad, S. Dietlen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
 K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
 M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
 L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
 P. Studt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
 Xian-Quan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
 M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
 H. Eifler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
 G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
 E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren**  
**- Stretch- und Erholungsvermögen -**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
 K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von Stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
 G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
 P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
 G. Magiera  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
 D. Schnitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
 M. Gierloff  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
 B. Schulz-Förberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
 J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
 W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
 L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
 M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulverschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
 H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
 K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Anfox-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
 W. Lützwow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
 R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**

- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementaruntton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development  
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung. Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagungskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K.E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolation von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehgeschwindigkeit  
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load  
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II  
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreae, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau**
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogunke, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung  
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987  
W. Schön, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzöhner  
**Bestimmung baugruddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D Zeichenprogramm für Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breittkreutz, R. Utteck, K. Haeddecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitstzug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung – Literaturübersicht –**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**

- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei  
Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln  
und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-  
Emission.**  
**Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitzkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rücker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum  
bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wär-  
mebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hoch-  
auflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der  
Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rücker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programm-  
system MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity  
Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung  
wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel  
der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung  
der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgen-  
der Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dy-  
namischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-  
Wechselwirkung**
- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequen-  
zen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer  
Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-pla-  
stischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvulation der seismischen Basiser-  
regung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, H. Krause, H. Wiggenhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfver-  
fahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven  
Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatz-  
temperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-  
Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl  
BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungser-  
gebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine  
mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies: Research and  
Development Trends and Needs**