

ISBN 3-88314-570-X

Forschungsbericht 130

Bundesanstalt für
Materialprüfung (BAM)
Berlin

Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft

von Dr.-Ing. Werner Struck

November 1986

46 Seiten, 31 Abbildungen, 10 Tabellen

Der Versuch sowie die Aufbereitung und Dokumentation der Meßergebnisse wurden von den nachfolgend genannten Mitarbeitern durchgeführt:

Werner Falkowski
Manfred Kruck
Gerhard Lohmann

Ernst Limberger
Joachim Riedel

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d Telefax (030) 8 112 029

Copyright © 1986 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Zielsetzung	1
2. Bilineares Materialverhalten ohne Verfestigung (linearelastisch-idealplastisch)	1
3. Bilineares Materialverhalten mit Verfestigung	4
3.1 Momenten-Krümmungsbeziehung für den Querschnitt	4
3.2 Krümmungsverteilung am langen Kragträger und Näherungslösung für die Durchbiegung am freien Ende	7
3.3 Vergleich der genähert mit den vollständig berechneten Durchbiegungen	8
3.4 Näherung für die Versagensenergie des langen Kragträgers	13
3.5 Vergleich verschiedener Querschnittsformen	14
4. Beidseitig gelenkig aufgelagerter oder beidseitig eingespannter Träger mit einer Einzellast in der Mitte	16
5. Zusammenstellung für die Abschätzung der Versagensenergie eines Trägers, belastet mit einer Einzelkraft entsprechend Bild 9	17
6. Zur praktischen Anwendung	19
6.1 Beispiel „Pfeiler eines gegen Absturz sichernden Geländers“	19
6.2 Faustformeln für Stahl St 37 und St 52	20
7. Vergleich mit Ergebnissen aus einem Versuch	21
7.1 Probekörper und Versuchsanordnung	21
7.2 Versuchsdurchführung	22
7.3 Versuchsergebnisse	22
7.3.1 Dokumentation der Meßwerte	22
7.3.2 Kontrolle der mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Ergebnisse im elastischen Bereich	24
7.3.3 Vergleich der mit Dehnungsmeßstreifen oder mit Setzdehnungsmesser ermittelten Ergebnisse	25
7.4 Auswertung der Versuchsergebnisse	25
7.4.1 Dehnungsverlauf nahe der Einspannstelle	25
7.4.2 Bestimmung des Momentes und der Dehnung bei Fließbeginn	27
7.4.3 Verformungsbehinderung an der Einspannstelle	28
7.4.4 Rechnerische Durchbiegung und Vergleich mit Versuchswerten	29
7.4.5 Moment-Dehnungsbeziehung für den Querschnitt des Probekörpers	31
7.5 Folgerungen aus dem Vergleich	33
Literatur	35
Anlagen	37

Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit biegebeanspruchter Bauteile werden in der Regel Tragmomente herangezogen, sofern nicht die Durchbiegungen begrenzt sein müssen. Bei stoßartigen Belastungen, insbesondere bei „weichen Stößen“, deren Einwirkungen auch im normalen Hoch- und Industriebau wegen besonderer Baustoffe, Bauweisen und Bauteilarten immer häufiger berücksichtigt werden müssen, ist es dagegen oft sinnvoller, der Beurteilung die bis zum Versagen mögliche Energieaufnahme des betrachteten Bauteils zugrunde zu legen. Die Ermittlung dieser Versagensenergie durch Versuche kann mit verhältnismäßig hohen Kosten und großem Zeitaufwand verbunden sein. Es ist deshalb anzustreben, auch hier den Einzelfall mit Hilfe von Berechnungen zu beurteilen. Für Kragträger und beidseitig gelenkig oder eingespannt aufgelagerte Träger, belastet durch eine Einzelkraft am freien Ende bzw. in der Mitte der Träger, die aus einem Material bestehen, dessen duktiles Verformungsverhalten durch eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung ausreichend beschrieben werden kann, wird ein einfaches Verfahren zur rechnerischen Abschätzung der Energieaufnahme bis zu einem Versagenszustand dargelegt. In Abhängigkeit von einem vorzugebenen Größtwert für die Dehnung am Rand des Trägerquerschnittes kann damit die zugeordnete maximale Durchbiegung und die zugeordnete Energieaufnahme ermittelt werden. Verschiedene Formen von Trägerquerschnitten werden mit Hilfe von Zahlenbeispielen verglichen. Beispielhaft wird die maximale Durchbiegung und die Versagensenergie für einen Pfosten eines gegen Absturz sichernden Geländers berechnet, wobei als Grenzwert für die Randdehnung 2,5 % angesetzt wurde. Außerdem werden „Faustformeln“ angegeben für auf der sicheren Seite liegende obere Grenzwerte für die Durchbiegung und untere Grenzwerte für die Energieaufnahme bei Trägern aus Stahl St 37 und St 52 für eine maximale Randdehnung von 2,5 %.

Abschließend folgt ein Vergleich mit Ergebnissen aus einem Versuch an einem IPB 100-Profil.

Abstract

Ultimate bending moments are generally used for judging on load bearing capacity of bending structures subjected to static loads, if deflection has not to be limited. However in case of soft impact loading (single-pulse loading) it is more convenient to use the energy absorption of a structure for this purpose. Today such impact loading must be considered also for structures in housing and industrial buildings for instance in consequence of using light weight materials and structures. It is often very expensive to get information about energy absorption by testing structural elements. Therefore in all individual cases one should try to estimate the energy absorption by calculation. A simple approximation method is described in order to estimate energy absorption of beams fixed at one end and loaded at the other end and of beams with a concentrated load at the centre fixed or supported at both ends. The stress-strain diagram of the material is assumed to be bilinear. The energy absorption is limited by a given value of maximum strain. Different types of cross sections are compared by numerical examples. Maximum deflection and energy absorption of a railing post which has to prevent falling down due the human impact is estimated as an example with a given value of 2.5 % for maximum strain. There also is pointed out a roughly safe limitation for the expected deflection and energy absorption of beams made of steel St 37 and St 52.

Finally a test with a steel beam (cross section IPB 100) is represented and its results are compared with the results of the described approximation.

Biegeträger — duktiles Material — plastische Durchbiegungen — Energieaufnahme — Baustahl

1. Zielsetzung

Zur Beurteilung der Tragfähigkeit biegebeanspruchter Bauteile werden in der Regel Tragmomente herangezogen, sofern nicht die Durchbiegungen begrenzt sein müssen. Bei stoßartigen Belastungen, insbesondere bei "weichen Stößen", deren Einwirkungen auch im normalen Hoch- und Industriebau wegen besonderer Baustoffe, Bauweisen und Bauteilarten immer häufiger berücksichtigt werden müssen, ist es dagegen oft sinnvoller, der Beurteilung die bis zum Versagen mögliche Energieaufnahme des betrachteten Bauteils zugrunde zu legen, /1/ bis /3/. Die Ermittlung dieser Versagensenergie durch Versuche kann mit verhältnismäßig hohen Kosten und großem Zeitaufwand verbunden sein. Es ist deshalb anzustreben, auch hier den Einzelfall mit Hilfe von Berechnungen zu beurteilen.

Für den entwerfenden und prüfenden Ingenieur ist es vorteilhaft, einfache, schnell ausführbare Rechenverfahren dafür zur Hand zu haben, damit er ohne Aufwand abschätzen kann, inwieweit solcherart Einwirkung für einzelne Bauteile zur Bemessung maßgebend werden kann. Dabei ist es wichtig, daß die rechnerische Abschätzung auf der sicheren Seite liegt. Wie weit darüber hinaus im einzelnen Ausführungsfall eines Bauteils bei der unterstellten Einwirkung noch eine größere Energieaufnahme möglich wäre, ist meist eine Frage zweiter Priorität.

In der Modellvorstellung wird deshalb die Energieaufnahme bei weichen Stößen der bei statischer Beanspruchung bis zur selben maximalen Dehnung gleichgesetzt und für das Verformungsverhalten eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie zugrunde gelegt. Außerdem wird zusätzlich der Krümmungsverlauf in Trägerlängsrichtung bilinear genähert. Der Einfluß dieser Näherung wie auch der Einfluß verschiedener Formen der Trägerquerschnitte auf die mögliche Energieaufnahme und der erforderliche Materialverbrauch waren zu verfolgen.

Das Verfahren wird an einem Beispiel der praktischen Anwendung demonstriert, und für Stahl St 37 und St 52 werden Grenzwerte als Faustformeln angegeben.

Die Beziehung zur Wirklichkeit wird durch einen Vergleich mit Ergebnissen aus einem Versuch an einem Träger mit IPB 100-Profil hergestellt.

2. Bilineares Materialverhalten ohne Verfestigung (linearelastisch-idealplastisch)

Für alle Verformungszustände, also auch für solche, bei denen die Dehnungen ϵ den der Fließgrenze zuzuordnenden Wert ϵ_F überschreiten, wird das Ebenbleiben der Querschnitte vorausgesetzt. Daß dieses auch für größere Verformungen vertretbar ist, wurde von Rühl 1952 /4/ sehr anschaulich unter Hinweis auf die ihm seinerzeit zugänglichen Versuchsergebnisse beschrieben. Mit Dehnungsmessungen über die Höhe von Proben mit Rechteckquerschnitt lieferte Krisch 1968 /5/ eine weitere eindrucksvolle experimentelle Bestätigung dafür, daß für rechnerische Abschätzungen von Verformungen mit Dehnungen im Prozentbereich diese Annahme zugrunde gelegt werden kann.

Bei linearelastischem-idealplastischem Material und eingangs beschriebener Voraussetzung gilt für einen Rechteckquerschnitt als Beziehung zwischen der

Randdehnung ϵ_r und dem zugehörigen Moment M

$$m = \frac{M}{M_F} = m_{VPL} - \frac{m_{VPL} - 1}{\eta^2} \quad (1)$$

$$\text{mit } m_{VPL} = \frac{M_{VPL}}{M_F} \quad (2)$$

$$\text{und } \eta = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_F} \quad (3)$$

$$M_F = \sigma_F \cdot W \quad (4)$$

als Moment, das erforderlich ist, damit am Querschnittsrand die Dehnung $\epsilon_r = \epsilon_F$ erreicht wird

sowie M_{VPL} = Moment bei vollplastiziertem Querschnitt

Auch für andere symmetrische Querschnitte sind Ableitungen dieser sogenannten Fließkurven in /4/ zu finden. Eine Zusammenstellung für zehn technisch interessierende Querschnittsformen ist von Dietmann in /6/ gegeben. Dort sind auch für Beispiele dieser Querschnittsformen die berechneten Fließkurven dargestellt. Vergleicht man diese Kurven mit Werten, die sich ergeben aus

$$m = m_{VPL} - \frac{m_{VPL} - 1}{\eta^n} \quad \text{oder} \quad (5)$$

$$\eta = \left(\frac{m_{VPL} - 1}{m_{VPL} - m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

so erkennt man, daß dieser einfache Ansatz bei entsprechender Wahl von n für die rechnerische Abschätzung von Verformungen im Rahmen technischer Betrachtungen auch für andere Querschnitte ausreichend ist, Beispiele s. Tabelle 1.

Das volle plastische Moment M_{VPL} würde bei diesen Vorstellungen erst bei einer unendlich großen Randdehnung erreicht werden.

Für einen Kragträger mit konstantem Querschnitt über seine Länge l und einer Einzelkraft R am freien Ende ergibt sich mit der Dehnungs-Momentenbeziehung (6) über die Krümmung

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_r}{h_a/2} = \frac{E \cdot \epsilon_F \cdot W}{E \cdot W \cdot h_a/2} \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_F} = \frac{M_F}{EJ} \cdot \eta \quad (7)$$

durch entsprechende Integration die Durchbiegung f_{VPL} am freien Ende bei voller Plastizierung des Einspannquerschnittes ($\epsilon_r \rightarrow \infty$) zu


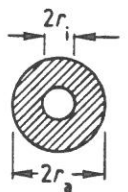


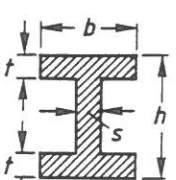
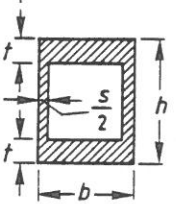
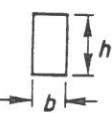
$$\frac{f_{VPL}}{f_F} = \frac{1}{m_{VPL}^2} \left(1 + 3 \frac{m_{VPL} - 1}{1 - \frac{1}{n}} + 3 \frac{(m_{VPL} - 1)^2}{\left(1 - \frac{1}{n}\right)\left(2 - \frac{1}{n}\right)} \right) \quad (8)$$

wobei f_F die Durchbiegung bei Fließbeginn am Querschnittsrand bedeuten soll ($\epsilon_r = \epsilon_F$)

Tabelle 1

Beispiele für die Näherung der Fließkurven von Querschnitten durch

$$m = m_{VPL} - \frac{m_{VPL}^{-1}}{n^n}$$

Querschnittsform	parameter	$m_{VPL} = W_{VPL}/W$	n
	beliebig	$\frac{16}{3\pi} = 1,70$	1,75
	$\frac{r_a}{r_i} = 2$	$\frac{16}{3\pi} \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^3}{1 - \left(\frac{r_i}{r_a}\right)^4} = 1,58$	2
	dünnwandig	$\frac{4}{\pi} = 1,27$	2
	beliebig	1,5	2*)
 	$\frac{s}{b} = 0,5$ $\frac{2t}{h} = 0,5$	$1,5 \cdot \frac{1 - (1 - \frac{s}{b})(1 - \frac{2t}{h})^2}{1 - (1 - \frac{s}{b})(1 - \frac{2t}{h})} = 1,40$	2,5
	dünnwandig	$1,5 \frac{2 + \frac{h}{b}}{3 + \frac{h}{b}}$	2*)

*) exakte Werte

Die Versagensenergie E_{VPL} beträgt dann näherungsweise

$$\frac{E_{VPL}}{E_F} = 1 + \left(\frac{f_{VPL}}{f_F} - 1\right) \left(2 + \frac{4}{3}(m_{VPL} - 1)\right) \quad (9)$$

mit E_F als denjenigen Energieanteil, der in den Träger eingeleitet werden muß, um am Querschnittsrand gerade Fließbeginn ($\epsilon_r = \epsilon_F$) zu erreichen.

Dabei wurde vorausgesetzt, daß die Kraft-Durchbiegungsbeziehung $R(f)$ im Bereich $f_F \leq f \leq f_{VPL}$ durch einen Parabelast ausreichend angenähert werden kann. Mit den Werten für m_{VPL} und n von Tabelle 1 erhält man für den Kreis- und

Rechteck-Vollquerschnitt sowie für den Kreis- und Rechteck-Hohlquerschnitt die in Tabelle 2 zusammengestellten Verhältnisse.

Tabelle 2

Vergleich von Kreis- (1.) und Rechteck- (3.) - Vollquerschnitt sowie dünnwandigem kreisförmigem (2.) und rechteckigem (4.) Hohlquerschnitt bei Annahme von linearelastischem-idealplastischem Materialverhalten (zu Spalte 6 s. Abschn. 3.5)

Querschnitt	m_{VPL}	n	$\frac{f_{VPL}}{f_F}$	$\frac{E_{VPL}}{E_F} = \kappa$	$\frac{\text{erf}A}{\sigma_F^2 \cdot 1} \cdot \frac{\text{erf}E_V \cdot E}{1}$
1.	1,70	1,75	2,87	5,80	0,69
2.	1,27	2	1,80	2,90	0,69
3.	1,5	2	2,22	4,26	0,70
4	1,20 ^{*)}	2	1,64	2,45	0,73

*) $h/b = 2,0$

In Wirklichkeit sind die Verhältnisse oft günstiger. Gehen die Randdehnungen weit in den plastischen Bereich hinein, bewirkt zum einen die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Trägerelemente, die in dieser einfachen Theorie ja nicht berücksichtigt wird, eine scheinbare Verfestigung, zum anderen ist bei Baustählen bei mehr als 2 % Dehnung schon mit Verfestigung zu rechnen.

3. Bilineares Materialverhalten mit Verfestigung

3.1 Momenten-Krümmungsbeziehung für den Querschnitt

Soll das Bauteilverhalten bis zum Versagen betrachtet werden, ist es sinnvoller, die Realität mindestens mit einem bilinearen Materialverhalten entsprechend Bild 1 näherungsweise zu erfassen. Hierbei wird der Versagenszustand des Materials, gegeben durch (ϵ_V, σ_V) , als erreicht betrachtet, wenn der Widerstand gegenüber weiterer Zwangsverformung zurückgeht oder ϵ_V einen vereinbarten Grenzwert erreicht.

Bei dieser Annahme ergibt sich für $\eta \geq 1$ die Momenten-Randdehnungsbeziehung für einen symmetrischen Querschnitt mit den Bezeichnungen nach den Bildern 1 und 2, ausgehend von

$$M = \sigma_F \cdot W_{VPL} - \sigma_F \cdot \bar{W}_{h_F} + \Delta M \quad (10)$$

$$\text{mit } \Delta M = T \cdot (\epsilon_R - \epsilon_F) \cdot 2 \cdot \int_{h_F/2}^{h_a/2} b(y) \cdot \frac{y - \frac{h_f}{2}}{\frac{h_a}{2} - \frac{h_f}{2}} \cdot y \cdot dy$$

$$= T \cdot \epsilon_F \cdot \frac{\eta - 1}{1 - \frac{1}{\eta}} \cdot \left(\frac{2}{h_a}\right) \cdot 2 \cdot \int_{h_F/2}^{h_a/2} b(y) \cdot y^2 \cdot dy - \frac{1}{\eta} \cdot 2 \cdot \int_{h_F/2}^{h_a/2} b(y) \cdot y \cdot dy$$

$$\begin{aligned}
&= \sigma_F \cdot \frac{T}{E} \cdot \eta \left(W - \frac{1}{\eta} W_{h_F} - \frac{1}{\eta} (W_{VPL} - W_{h_F, VPL}) \right) \\
&= M_{VPL} \cdot \frac{T}{E} \left(\eta \cdot \frac{W}{W_{VPL}} - \frac{W_{h_F}}{W_{VPL}} - 1 + \frac{W_{h_F, VPL}}{W_{VPL}} \right)
\end{aligned}$$

zu

$$M = M_{VPL} \left(1 - \left(\frac{W_{h_F, VPL}}{W_{VPL}} - \frac{W_{h_F}}{W_{VPL}} \right) + \frac{T}{E} \left(\eta \cdot \frac{W}{W_{VPL}} - 1 + \frac{W_{h_F, VPL}}{W_{VPL}} - \frac{W_{h_F}}{W_{VPL}} \right) \right) \quad (11)$$

und somit zu

$$m = \frac{M}{M_F} = m_{VPL} + \frac{T}{E} (\eta - m_{VPL}) - m_{VPL} \cdot \frac{W_{h_F, VPL} - W_{h_F}}{W_{VPL}} \cdot \left(1 - \frac{T}{E} \right) \quad (12)$$

Bei einem Querschnitt entsprechend Bild 2 geht mit wachsendem η der Ausdruck

$$m_{VPL} \cdot \frac{W_{h_F, VPL} - W_{h_F}}{W_{VPL}} \Rightarrow \frac{\frac{b_0 h_F^2}{4} - \frac{b_0 h_F^2}{6}}{W} = \frac{b_0 h_F^2}{12} \cdot \frac{1}{\eta^2}, \quad (13)$$

so daß für $\eta \gg \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{b_0 h_a^2}{6W}}$

$$\tilde{m} = m_{VPL} + \frac{T}{E} (\eta - m_{VPL}) \quad (14)$$

eine gute Näherung für $m = m(\eta)$ darstellt, d. h. in diesem Bereich ist in guter Näherung

$$\eta = m_{VPL} + \frac{E}{T} (m - m_{VPL}) \quad (15)$$

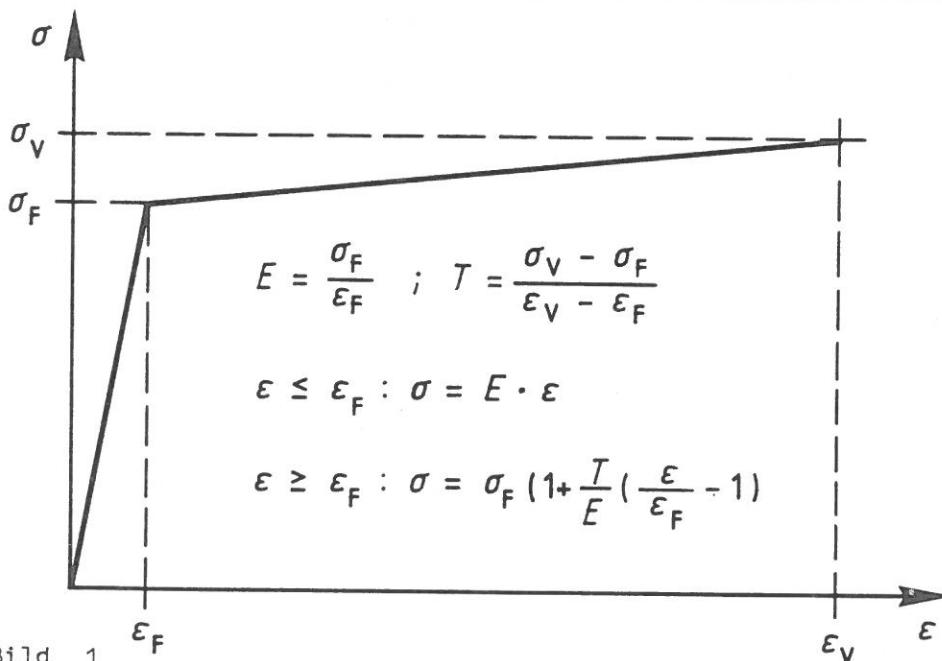
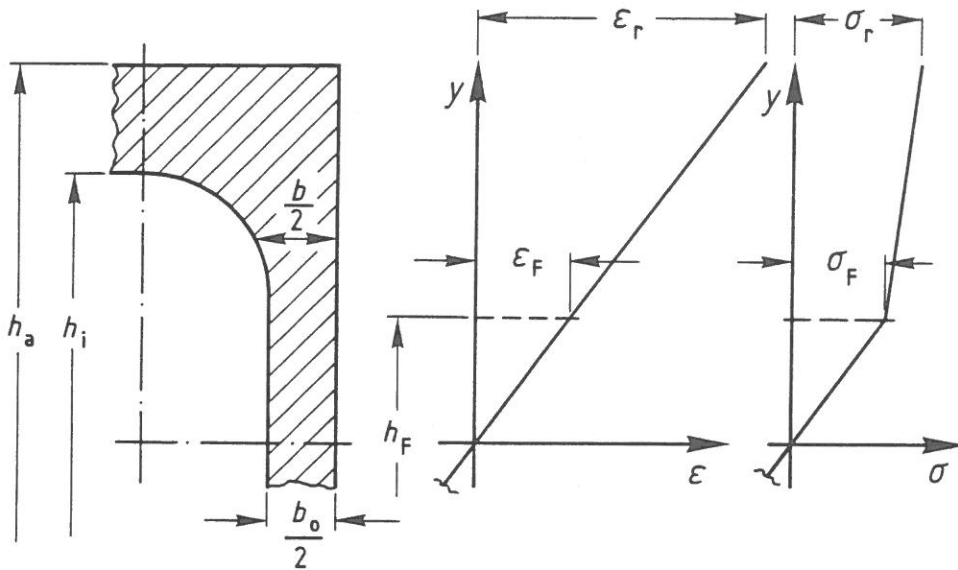


Bild 1

Näherungsweise Beschreibung des Materialverhaltens durch eine bilineare σ - ϵ -Beziehung



$$h_a/h_F = \epsilon_r/\epsilon_F = \eta:$$

$$W = \frac{2}{h_a} \cdot 2 \cdot \int_0^{h_a/2} b(y) \cdot y^2 \cdot dy =$$

$$= \frac{h_F}{h_a} \cdot \frac{2}{h_F} \cdot 2 \cdot \int_0^{h_F/2} b(y) \cdot y^2 \cdot dy + \underbrace{\frac{2}{h_a} \cdot 2 \cdot \int_{h_F/2}^{h_a/2} b(y) \cdot y^2 \cdot dy}_{W - \frac{1}{\eta} \cdot W_{h_F}}$$

$$W_{h_F} = \frac{2}{h_F} \cdot 2 \cdot \int_0^{h_F/2} b(y) \cdot y^2 \cdot dy \text{ also;}$$

$$W_{VPL} = 2 \cdot \int_0^{h_a/2} b(y) \cdot y \cdot dy = 2 \cdot \int_0^{h_F/2} b(y) \cdot y \cdot dy + \underbrace{2 \cdot \int_{h_F/2}^{h_a/2} b(y) \cdot y \cdot dy}_{W_{VPL} - W_{h_F, VPL}}$$

$$W_{h_F, VPL} = 2 \cdot \int_0^{h_F/2} b(y) \cdot y \cdot dy \text{ also;}$$

$$\bar{W}_{h_F} = 2 \cdot \int_0^{h_F/2} b(y) \cdot \frac{h_F/2 - y}{h_F/2} \cdot y \cdot dy = W_{h_F, VPL} - W_{h_F}$$

Bild 2

Gesamt- und Teilwiderstandsmomente eines symmetrischen Querschnittes bei bilinearem Materialverhalten

Die Momenten-Krümmungsbeziehung für solche Art Querschnitte ist somit allgemein gegeben durch

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{M_F}{EJ} \cdot \eta$$

mit $\eta = m$ für $\eta \leq 1$ und

$$\eta = m_{VPL} + \frac{E}{T}(m - m_{VPL}) \text{ für } \eta \geq \eta_G \quad (16)$$

$$\text{wobei } \eta_G \gg \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{b_0 h_a^2}{6W}}$$

Für $1 < \eta < \eta_G$ ist die Abhängigkeit $\eta(m)$ nicht allgemein, sondern nur noch für wenige Querschnittsformen mit großem Aufwand über (12) explizit darstellbar.

3.2 Krümmungsverteilung am langen Kragträger und Näherungslösung für die Durchbiegung am freien Ende

Es wird ein im Verhältnis zu seiner Höhe schlanker, einseitig eingespannter Träger betrachtet, dessen freies Ende senkrecht zur Trägerachse zwangsverformt wird. Für eine Durchbiegung f am freien Ende, bei der das Biegemoment M_0 an der Einspannstelle größer als $M_G = M_F \cdot m(\eta_G)$ ist, sind Momenten- und Krümmungsverteilung in Bild 3 dargestellt. Da der reale Verlauf der Krümmungen zwischen $s = \lambda_G \cdot l$ und $s = \lambda_F \cdot l$ nicht einfach bestimmbar und stark abhängig von der Querschnittsform ist, wird mit einer Näherung gearbeitet. Das von Burth in /7/ angesprochene Näherungsverfahren nach Lay /8/ zur Bestimmung der Durchbiegung arbeitet mit einem Krümmungssprung an der Stelle $s = \lambda_G \cdot l$ von $k'' = m_G \cdot M_F/EJ$ auf $k' = \eta_G \cdot M_F/EJ$. Nähert man dagegen den realen Krümmungsverlauf durch die beiden sich bei $s = \lambda \cdot l$ schneidenden Geraden an, Bild 3, dann tritt der Zahlenwert von η_G in der weiteren Rechnung nicht mehr in Erscheinung.

Der Näherungswert \tilde{f} für die Durchbiegung f am freien Ende des Trägers ergibt sich dann z. B. mittels des Prinzips der virtuellen Verrückung

$$\tilde{f} = \frac{1}{3} \frac{M_F \cdot l^2}{EJ} \cdot ((1-\lambda)^2 \cdot \eta_\lambda + \frac{1}{2} \lambda (2\eta_0 + \eta_\lambda + (1-\lambda)(\eta_0 + 2\eta_\lambda))) \quad (17)$$

und der Verhältnisswert

$$\tilde{\varphi} = \tilde{f}/f_F \quad (18)$$

zu

$$\tilde{\varphi} = (1-\lambda)^2 \cdot \eta_\lambda + \frac{3}{2} \cdot \lambda (\eta_0 + \eta_\lambda) - \frac{1}{2} \lambda^2 (\eta_0 + 2\eta_\lambda) \quad (19a)$$

oder

$$\tilde{\varphi}/m_{VPL} = (1-\lambda)^2 + \frac{3}{2} \lambda (\eta_0/m_{VPL} + 1) - \frac{1}{2} \lambda^2 (\eta_0/m_{VPL} + 2) \quad (19b)$$

$$\text{mit } \eta_\lambda = m_{VPL} \quad (20)$$

$$\text{und } \lambda = 1 - \frac{m_{VPL}}{m_0} \quad (21)$$

$$\text{wobei } m_0 = m_{VPL} + \frac{T}{E} \cdot (\eta_0 - m_{VPL}) \quad \text{und} \quad (22)$$

$$\frac{E}{T} = \frac{\epsilon_V/\epsilon_F - 1}{\sigma_V/\sigma_F - 1} \quad (23)$$

Diese Beziehungen gelten voraussetzungsgemäß nur, wenn die Randdehnung ϵ_r an der Einspannstelle mindestens $\eta_G \cdot \epsilon_F$ ist.

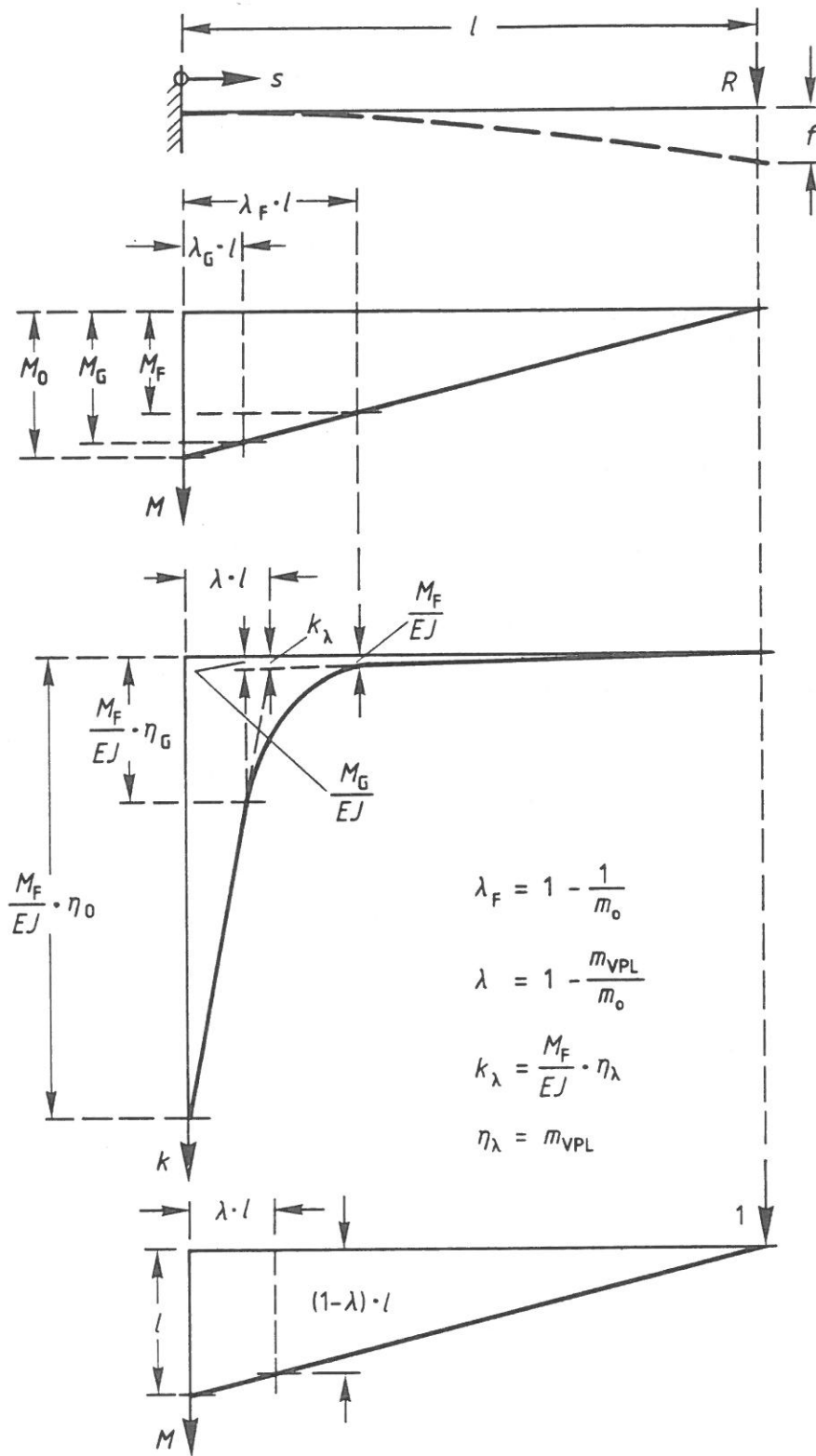


Bild 3
Verteilungen von Momenten
und Krümmungen eines
Kragträgers

3.3 Vergleich der genähert mit den vollständig berechneten Durchbiegungen

Um einen Anhalt zu haben, wie sich die Näherung des Krümmungsverlaufs über die Trägerlänge durch zwei sich bei $s = \lambda \cdot l$ schneidende Geraden, Bild 3, quantitativ auswirkt, wurden für Rechteck- und Kreis-Vollquerschnitt sowie für dünnwandigen quadratischen und kreisförmigen Hohlquerschnitt und auch für einen I-Querschnitt entsprechend IPB 100 die Durchbiegungen aufgrund des vollständigen Krümmungsverlaufes bestimmt. (Dabei ist bilineares Materialverhalten entsprechend Bild 1 sowie unveränderliche Querschnittsform und Ebenbleiben der

Querschnitte nach wie vor vorausgesetzt worden.) Bei den ausgewählten Querschnittsformen ergeben sich für

$$(W_{h_F, VPL} - W_{h_F}) / W_{VPL} \text{ nach Bild 2}$$

die in Tabelle 3 zusammengestellten Formeln.

Tabelle 3

Formeln für den bei der Näherungsrechnung vernachlässigten Ausdruck

$$(W_{h_F, VPL} - W_{h_F}) / W_{VPL}, \text{ siehe (12) und Bild 2}$$

Querschnittsform	$(W_{h_F, VPL} - W_{h_F}) / W_{VPL}$ (nach Bild 2)
kreisförmiger Vollquerschnitt	$1 - (1 - \frac{1}{\eta^2})^{\frac{3}{2}} - \frac{3}{8}(\eta \arcsin \frac{1}{\eta} - (1 - \frac{1}{\eta^2})^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - \frac{2}{\eta^2}))$
dünnwandiger kreisförmiger Hohlquerschnitt	$1 - \frac{1}{2} (\eta \arcsin \frac{1}{\eta} - (1 - \frac{1}{\eta^2})^{\frac{1}{2}})$
rechteckiger Vollquerschnitt	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\eta^2}$
dünnwandiger quadratischer Hohlquerschnitt	$\frac{1}{9} \cdot \frac{1}{\eta^2}$
I-Querschnitt (Bezeichnungen s. Tabelle 1)	$\frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{s}{b}}{1 - (1 - \frac{s}{b})(1 - \frac{2t}{h})^2} \cdot \frac{1}{\eta^2}$ für $\eta \geq \frac{1}{1 - 2 \frac{t}{h}}$

Der Krümmungsverlauf über die Trägerlänge kann damit bestimmt werden, indem man für vorgegebene Werte von η die Werte für m mittels (12) berechnet und den zugehörigen Abstand von der Einspannstelle über $s/l = 1 - m/m_0$ ermittelt. Der Verhältniswert der Durchbiegung bei vorgegebener maximaler Randdehnung zur Durchbiegung bei Fließbeginn

$$\varphi = \frac{f}{f_F} = 3 \cdot \int_0^1 \eta \cdot (1 - \frac{s}{l}) \cdot d(\frac{s}{l}) \quad (24)$$

kann durch numerische Integration gewonnen werden.

Für die Zahlenrechnung wurden Verhältnisse zugrunde gelegt, wie sie bei einem Baustahl St 37 mit $\sigma_F = 240 \text{ N/mm}^2$ und bei St 52 mit $\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$, also $\epsilon_F = 0,114 \%$ bzw. $\epsilon_F = 0,171 \%$, von Interesse sein könnten. Dabei ist mit $T/E = 1/207$ und einer den Versagenszustand definierenden maximalen Dehnung am Querschnittsrand von $\epsilon_V = 2,5 \%$ gerechnet worden, s. auch Abschnitt 3.5. Die Ergebnisse der Rechnung sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4

Einfluß der Näherung zum Krümmungsverlauf $k(s)$ entsprechend Bild 3 auf den Rechenwert φ des Verhältnisses der Durchbiegung bei vorgegebener Randdehnung

$\epsilon_r = \eta \cdot \epsilon_F$ zur Durchbiegung bei Fließbeginn $\epsilon_r = \epsilon_F$

φ : Bei vollständiger Erfassung von $k(s)$

$\tilde{\varphi}$: Bei näherungsweise Erfassung von $k(s)$ nach (19)

Randdehnungsverhältnis	$\eta = 22$			$\eta = 15$		
	φ	$\tilde{\varphi}$	$\varphi/\tilde{\varphi}$	φ	$\tilde{\varphi}$	$\varphi/\tilde{\varphi}$
kreisförmiger Vollquerschnitt	4,00	3,46	1,16	3,25	2,47	1,31
dünnwandiger kreisförmiger Hohlquerschnitt	3,96	3,57	1,11	2,71	2,34	1,16
rechteckiger Vollquerschnitt	4,08	3,45	1,18	3,00	2,39	1,25
dünnwandiger quadratischer Hohlquerschnitt	4,02	3,72	1,08	2,59	2,33	1,11
I-Querschnitt entsprechend IPB 100	3,81	3,69	1,03	2,45	2,33	1,05

Für die beiden Querschnittsformen kreisförmiger Vollquerschnitt und I-Querschnitt, bei denen sich die größte bzw. geringste Abweichung der Näherungsrechnung zur Rechnung mit vollständiger Erfassung des Krümmungsverlaufes ergab, sind diese Abweichungen in Diagrammform in Abhängigkeit der maximalen Randdehnung $\epsilon_{\max} = \eta_0 \cdot \epsilon_F$ in Bild 4 dargestellt. Hinsichtlich des beidseitig gelenkig oder eingespannt aufgelagerten Balkens s. Abschnitt 4.

Außerdem sind für diese beiden Querschnittsformen die Kraft-Durchbiegungsdiagramme in dimensionsloser Form in den Bildern 5 und 6 aufgetragen. Ebenfalls dort sind auch die entsprechenden Werte aus der Näherungsrechnung eingezeichnet.

Die Darstellungen zeigen, daß die Näherung des Krümmungsverlaufes im Rahmen der sonstigen vereinfachenden Annahmen vertretbar ist, besonders auch im Hinblick darauf, daß die Näherung eine untere Grenze für die Durchbiegung darstellt, und somit ihre Verwendung bei der Abschätzung der Energieaufnahme auf der sicheren Seite liegt.

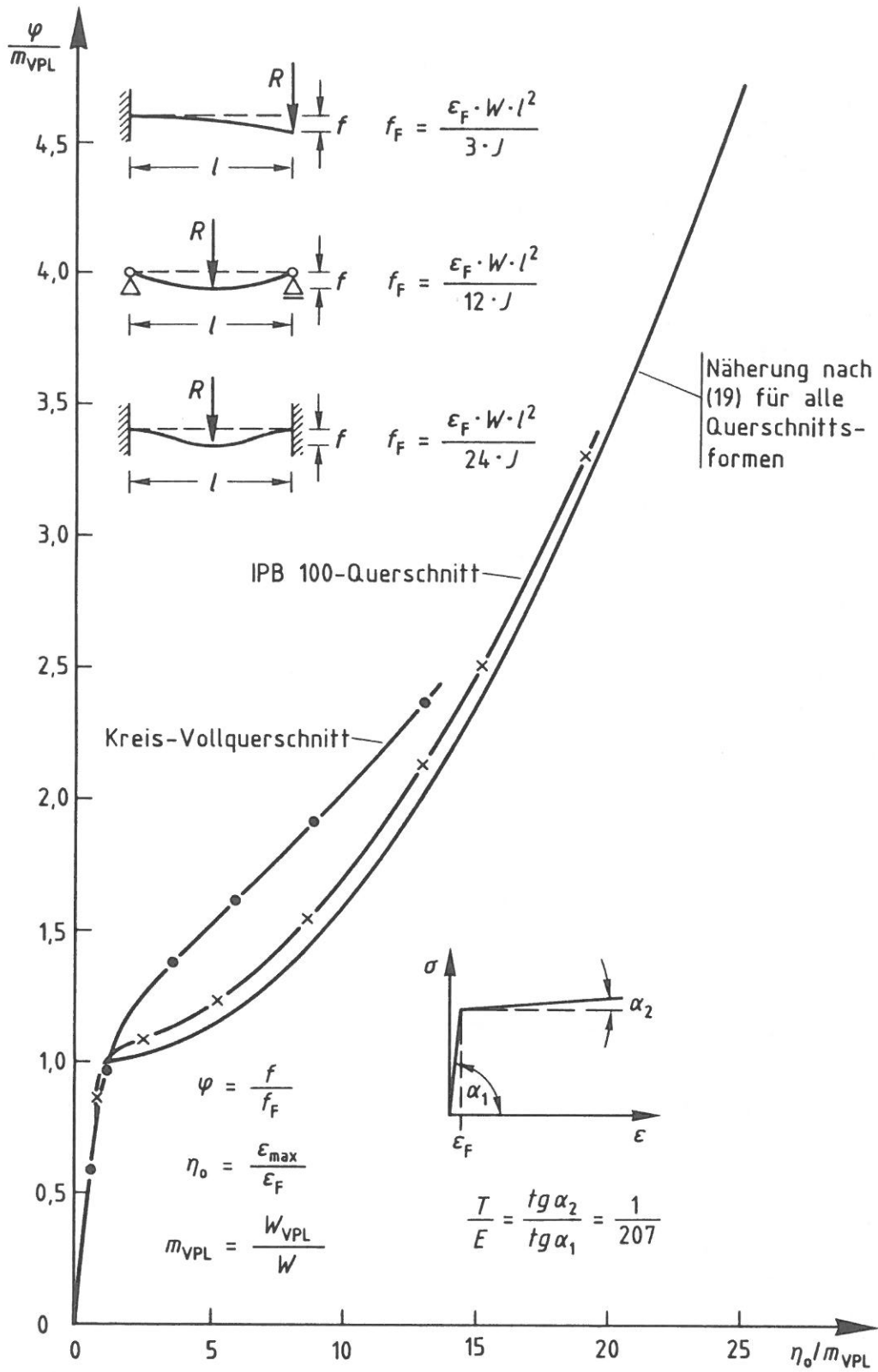


Bild 4
 Durchbiegungs-Dehnungsdiagramm von Trägern aus Material mit bilinearer Spannungs-Dehnungsbeziehung bei Belastung durch eine Einzelkraft R

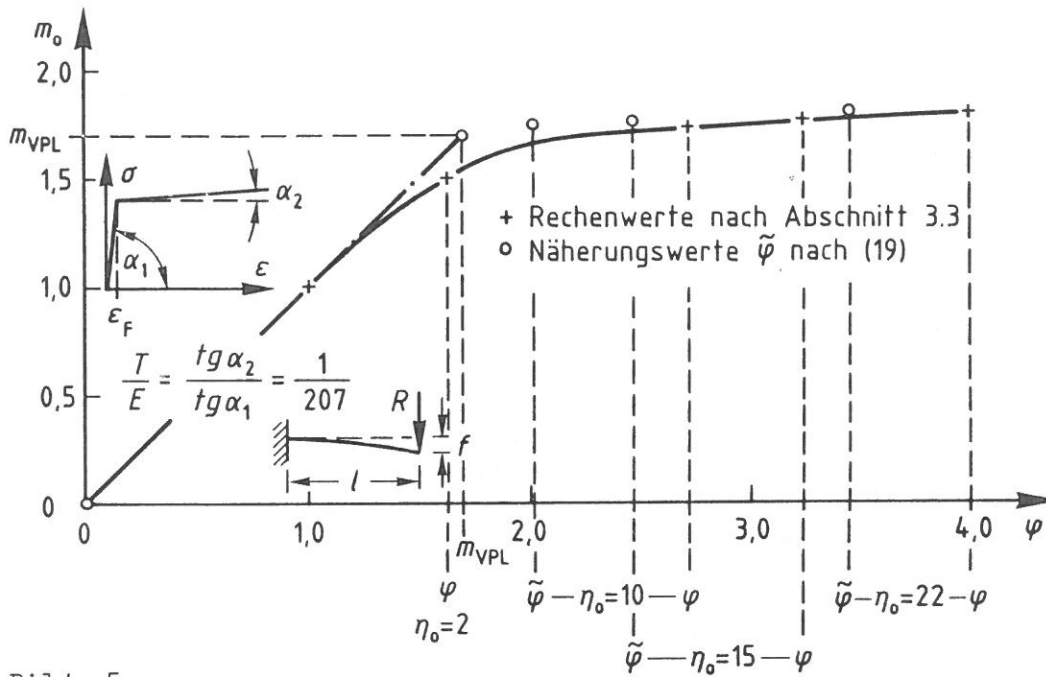


Bild 5

Kraft-Durchbiegungsdiagramm eines am freien Ende mit einer Einzelkraft belasteten Kragträgers mit Kreis-Vollquerschnitt aus einem Material mit bilinearer Spannungs-Dehnungsbeziehung.

$$m_0 = \frac{R \cdot l}{M_F}; \quad \varphi = \frac{f}{f_F}; \quad M_F = E \cdot \epsilon_F \cdot W; \quad f_F = \frac{M_F \cdot l^2}{3EJ}; \quad \eta_0 = \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_F}$$

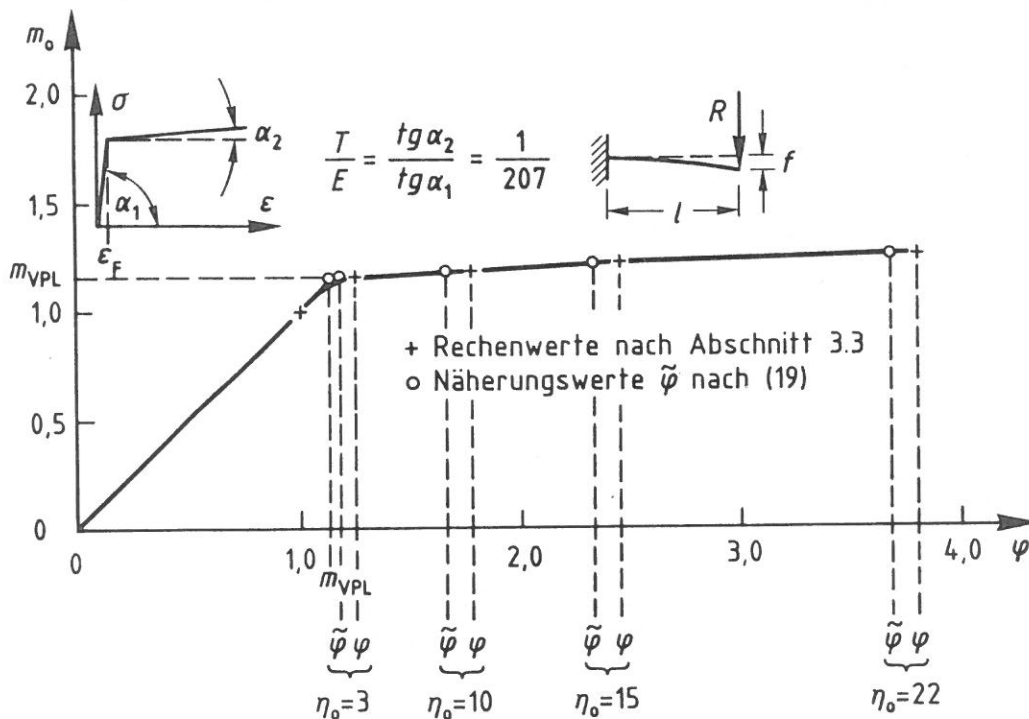


Bild 6

Kraft-Durchbiegungsdiagramm eines am freien Ende mit einer Einzelkraft belasteten Kragträgers mit ITB 100-Querschnitt aus einem Material mit bilinearer Spannungs-Dehnungsbeziehung

$$m_0 = \frac{R \cdot l}{M_F}; \quad \varphi = \frac{f}{f_F}; \quad M_F = E \cdot \epsilon_F \cdot W; \quad f_F = \frac{M_F \cdot l^2}{3EJ}; \quad \eta_0 = \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_F}$$

3.4 Näherung für die Versagensenergie des langen Kragträgers

Die Energie E_V , die der Kragträger bis zum Versagen, d. h. bis zum Erreichen von $\epsilon_{ro} = \epsilon_V = \eta_V \cdot \epsilon_F$, aufnehmen kann, ergibt sich mit den Bezeichnungen von Bild 7 wegen

$$E_V = \int_{f=0}^{f=f_V} R \cdot df \quad (25)$$

bei Anwendung der Näherung \tilde{f} für f zu

$$E_V \approx \frac{1}{2} R_\lambda \cdot f_\lambda + \frac{1}{2} (R_\lambda + R_V)(\tilde{f}_V - f_\lambda) \quad (26)$$

und wegen

$$E_F = \frac{1}{2} R_F \cdot f_F, \quad \frac{R}{R_F} = \frac{M/l}{M_F/l} = m \quad \text{sowie} \quad \frac{f_\lambda}{f_F} = m_{VPL} \quad (27)$$

zu

$$\frac{E_V}{E_F} = (m_{VPL} + m_V) \cdot \tilde{\varphi}_V - m_{VPL} \cdot m_V \quad (28)$$

Der so berechnete Wert E_V ist augenscheinlich kleiner als $E_{V,real}$, s. auch Bilder 5 und 6.

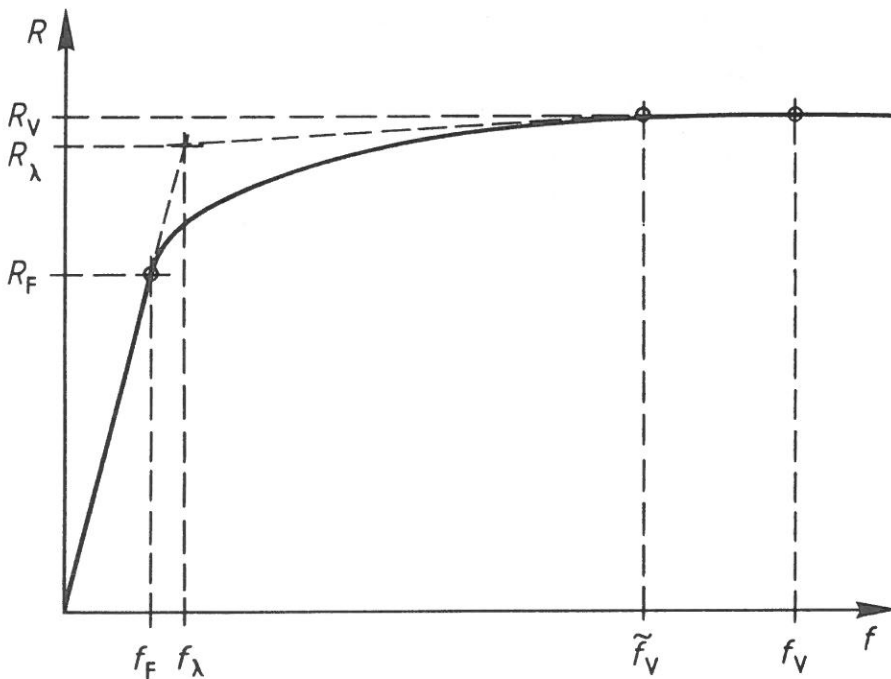


Bild 7

Die Einzelkraft R in Abhängigkeit von der Durchbiegung f an der Kräfteinleitungsstelle

f_F = Durchbiegung bei Fließbeginn am Querschnittsrand

$f_\lambda = m_{VPL} \cdot f_F$ mit m_{VPL} nach (2)

f_V = Durchbiegung bei vereinbartem Versagenszustand

\tilde{f}_V = Näherungswert für f_V nach (19)

3.5 Vergleich verschiedener Querschnittsformen

Es sollen die Querschnittsformen

1. Kreis-Vollquerschnitt
2. dünnwandiger Rohrquerschnitt
3. Rechteck-Vollquerschnitt
4. dünnwandiger Rechteck-Hohlquerschnitt

verglichen werden.

Als bilineares Materialverhalten, gekennzeichnet durch E/T , werden die Verhältnisse von Bild 8 zugrunde gelegt. Unabhängig von der Festigkeit kann danach das Verhältnis E/T , wie es in Bild 1 definiert ist, sowohl für $\epsilon_V = 2,5\%$ als auch für $\epsilon_V \approx$ Gleichmaßdehnung bei Bruch mit

$$E/T \approx 207$$

als konstanter Wert angesetzt werden.

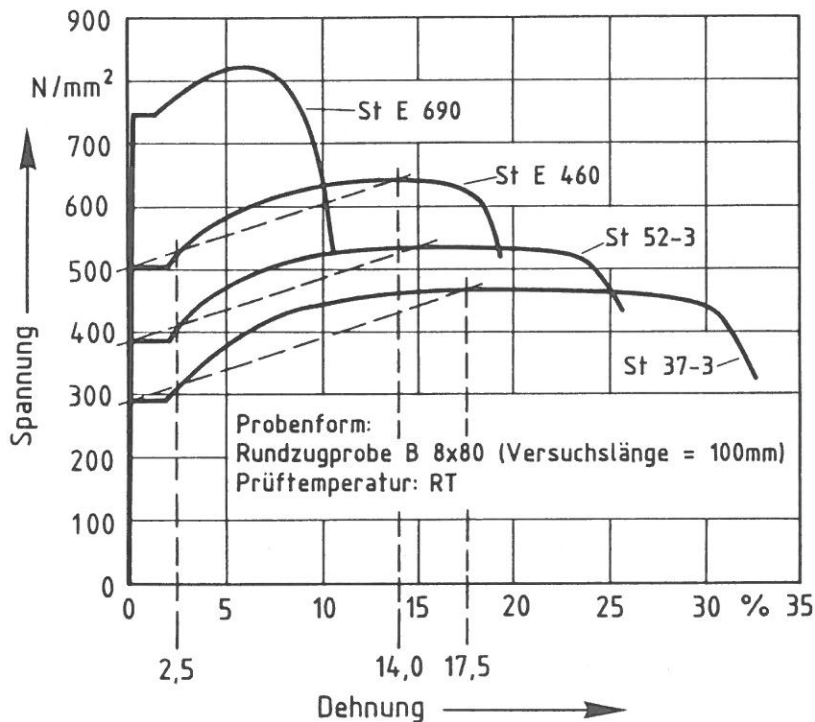


Bild 8

Spannungs-Dehnungskurven von Stählen unterschiedlicher Festigkeit, entnommen Bild 7.4-2 aus /9/ nach (31):

$$\text{für St 37} \quad \frac{E}{T} = \frac{17,5/0,138 - 1}{465/289 - 1} = 206,6$$

$$\text{für St 52} \quad \frac{E}{T} = \frac{15,0/0,183 - 1}{536/385 - 1} = 206,4$$

$$\text{für St E 460} \quad \frac{E}{T} = \frac{14,0/0,239 - 1}{643/503 - 1} = 206,9$$

Als maximale Randdehnung bei Versagen des Trägers wird wahlweise

$$\epsilon_V = 2,5 \% \quad \text{oder} \quad \epsilon_V = 5 \%$$

und als Spannung bei Fließbeginn der für St 37 garantierte Wert

$$\sigma_F = 240 \text{ N/mm}^2$$

zugrunde gelegt, d. h.

$$\epsilon_F = 240/2,1 \cdot 10^5 = 0,114 \%$$

und somit

$$\eta_V = 2,5/0,114 = 21,9 \approx 22 \quad \text{bzw.} \quad 5/0,114 \approx 44$$

Die nach den Abschnitten 3.2 und 3.4 berechneten Werte sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Auch für $\epsilon_V = 5 \%$ wurde mit $E/T = 207$ gerechnet, obwohl für Stahl dieser Wert bei dieser Dehnung zu groß ist, s. Bild 8, und sich damit zu kleine Durchbiegungen errechnen. Die Abschätzung der Energieaufnahme liegt auf der sicheren Seite. Für die Abschätzung der maximalen Durchbiegung müßte mit einem entsprechend kleineren Wert E/T gerechnet werden. Da hier aber der Einfluß der Querschnittsform bei verschiedener maximaler Randdehnung aber sonst gleichem Materialverhalten dargestellt werden soll, mußte mit demselben E/T -Wert gerechnet werden.

Tabelle 5

Vergleich von Kreis- (1.) und Rechteck- (3.) Vollquerschnitt sowie dünnwandigem kreisförmigem (2.) und rechteckigem (4.) Hohlquerschnitt bei Annahme von $\epsilon_V = 2,5 \%$ (obere Werte) oder 5% (untere Werte)

Querschnitt	m_{VPL}	m_V	λ	φ_V	$\frac{E_V}{E_F} = \kappa$
1.	1,70	1,7981 1,9043	0,0545 0,1073	3,421 8,438	8,91 27,2
2.	1,27	1,3701 1,4764	0,0731 0,1398	3,577 9,979	7,70 25,5
3.	1,50	1,5990 1,7053	0,0619 0,1204	3,455 9,037	8,31 26,4
4.	1,20 ^{*)}	1,3005 1,4068	0,0773 0,1470	3,638 10,337	7,54 25,3

*) $h/b = 2,0$

Soll die Versagensenergie $E_V = \kappa \cdot E_F$ mindestens einen erforderlichen Wert $\text{erf } E_V$ erreichen, muß sein

$$E_F \geq \text{erf } E_V / \kappa \quad (29)$$

oder mit (36)

$$\frac{W}{h_a/2} \geq \kappa^{-1} \cdot \text{erf } E_V \cdot \frac{6 \cdot E}{\sigma_F^2 \cdot l} \quad (30)$$

Die Größe $\frac{W}{h_a/2}$ gibt einen Bruchteil des auf die Trägerlänge l bezogenen Materialvolumens an und erlaubt damit einen Vergleich der Querschnittsformen hinsichtlich der erforderlichen Materialmenge, Tabelle 6.

Tabelle 6

Vergleich hinsichtlich Materialverbrauch bei Kreis- (1.) und Rechteck- (3.) Vollquerschnitt sowie dünnwandigem kreisförmigem (2.) und rechteckigem (4.) Hohlquerschnitt bei Annahme von $\epsilon_V = 2,5\%$ (oberer Wert) oder 5% (unterer Wert)

Querschnitt	W	$\frac{h_a}{2}$	$\frac{W}{h_a/2}$	$\text{erf } A / \frac{\text{erf } E_V \cdot 6 \cdot E}{\sigma_F^2 \cdot l}$
1.	$\frac{\pi d^3}{32}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{A}{4}$	0,45 0,147
2.	$\frac{A \cdot d}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{A}{2}$	0,26 0,078
3.	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{A}{3}$	0,36 0,114
4.	$t \cdot h \cdot b \left(\frac{1}{3} \frac{h}{b} + 1 \right)$	$\frac{h}{2}$	$\frac{A^*)}{1,8}$	0,24 0,071

*) $h/b = 2,0$

Kann konstruktiv dafür gesorgt werden, daß die Träger mit Hohlquerschnitten erst bei gleicher Dehnung versagen wie die mit entsprechenden Vollquerschnitten, dann bleibt der Vorteil der Hohlquerschnitte auch hier wie bei Bemessung gegenüber einer statischen Last erhalten. Versagen die Träger mit Hohlquerschnitt jedoch schon bei merklich geringeren Dehnungen als die mit Vollquerschnitt, können sich die Verhältnisse umkehren, wie die Zahlen der letzten Spalte der Tabelle 6 zeigen.

Für linearelastisches-idealplastisches Materialverhalten sind die entsprechenden Zahlenwerte zusätzlich in Tabelle 2, Abschnitt 2, aufgeführt.

Den Vorteil, der sich ergibt, wenn man die das reale Materialverhalten meist besser nähernde bilineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung mit $T > 0$ anwendet, zeigt deutlich der Vergleich der Zahlenwerte der Tabelle 2 mit denen der Tabellen 5 und 6.

4. Beidseitig gelenkig aufgelagerter oder beidseitig eingespannter Träger mit einer Einzellast in der Mitte

Bei beiden Trägerarten entsprechen die Momenten- und Krümmungsverteilungen unter dieser Belastung denen beim Kragträger, wenn man jeweils von den Momentennullpunkten ausgeht. Das Verhältnis ϕ der Gesamtdurchbiegung zur Durchbiegung bis zum Fließbeginn am Trägerrand ist damit das gleiche wie beim Kragträger,

und da auch beim beidseitig eingespannten Träger mit mittiger Einzellast nach Fließbeginn keine Momentenumlagerung stattfindet, besteht auch hier die Beziehung $R/R_F = M/M_F$. Somit berechnet sich E_V/E_F nach (28). Auch die aufzubringende Energie E_F bis zum Fließbeginn am Trägerrand ist sowohl beim beidseitig gelenkig aufgelagerten als auch beim beidseitig eingespannten Träger die gleiche wie beim Kragträger gleicher Trägerlänge. Daher kann auch die Energie bis zum Versagen bei allen drei Trägerarten als gleich angesetzt werden, sofern Versagen bei gleicher Randdehnung auftritt.

5. Zusammenstellung für die Abschätzung der Versagensenergie eines Trägers, belastet mit einer Einzellast entsprechend Bild 9

- Querschnittswerte:

$$\begin{aligned} \text{Widerstandsmoment, elastisch} \quad W &= \\ \text{Widerstandsmoment, vollplastisch} \quad W_{VPL} &= \\ m_{VPL} = W_{VPL}/W &= \end{aligned}$$

- Materialwerte:

bilineare Spannungs-Dehnungsbeziehung

$$\text{Elastizitätsmodul} \quad E =$$

$$\text{Fließspannung (Streckgrenze)} \quad \sigma_F =$$

$$\text{zugehörige Dehnung} \quad \epsilon_F = \sigma_F/E =$$

$$\begin{aligned} \text{maximale Dehnung, bei der} & \\ \text{Versagen eintritt} & \quad \epsilon_V = \end{aligned}$$

(Versagenszustand ist festzulegen)

$$\eta_V = \epsilon_V/\epsilon_F =$$

$$\text{zugehörige Spannung} \quad \sigma_V =$$

Verfestigungsmodul T

$$E/T = \frac{\epsilon_V/\epsilon_F - 1}{\sigma_V/\sigma_F - 1} = \quad (31)$$

- Hilfsgrößen für die Berechnung:

$$\eta_V/m_{VPL} =$$

$$\frac{m_V}{m_{VPL}} = 1 + \frac{\eta_V/m_{VPL} - 1}{E/T} = \quad (32)$$

$$\lambda = 1 - \frac{1}{m_V/m_{VPL}} = \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_V}{m_{VPL}} &= (1 - \lambda)^2 + \\ &+ 1,5 \lambda (\eta_V/m_{VPL} + 1) + \\ &- 0,5 \lambda^2 (\eta_V/m_{VPL} + 2) = \end{aligned} \quad (34)$$

oder φ_V/m_{VPL} aus Bild 4

$$\frac{E_V/E_F}{m_{VPL}^2} = \left(\frac{m_V}{m_{VPL}} + 1 \right) \cdot \frac{\varphi_V}{m_{VPL}} - \frac{m_V}{m_{VPL}} = \quad (35)$$

oder $\frac{E_V/E_F}{m_{VPL}^2}$ aus Bild 9

- Versagensenergie:

$$E_V > \frac{E_V/E_F}{m_{VPL}^2} \cdot m_{VPL}^2 \cdot E_F$$

$$\text{mit } E_F = \frac{(\sigma_F \cdot W)^2 \cdot l}{6 EJ} \quad (36)$$

- Durchbiegung bei Versagen:

$$f_V > \frac{\varphi_V}{m_{VPL}} \cdot m_{VPL} \cdot f_F$$

mit f_F entsprechend Bild 4

Für die Gegebenheiten bei Baustahl entsprechend Bild 8, also mit $E/T = 207$, kann das Verhältnis E_V/E_F in Abhängigkeit von $\eta_V = \epsilon_r/\epsilon_F$ mit Hilfe des Diagramms Bild 9 ermittelt werden, wenn $m_{VPL} = W_{VPL}/W$ für den Querschnitt bekannt ist. So z. B. für den Kreis-Vollquerschnitt und $\eta_V = 22$, d. h. $\eta_V/m_{VPL} = 12,9$, erhält man

$$E_V/E_F = 3,09 (16/3\pi)^2 = 8,9 \text{ (vgl. Tab. 5 Zeile 1)}$$

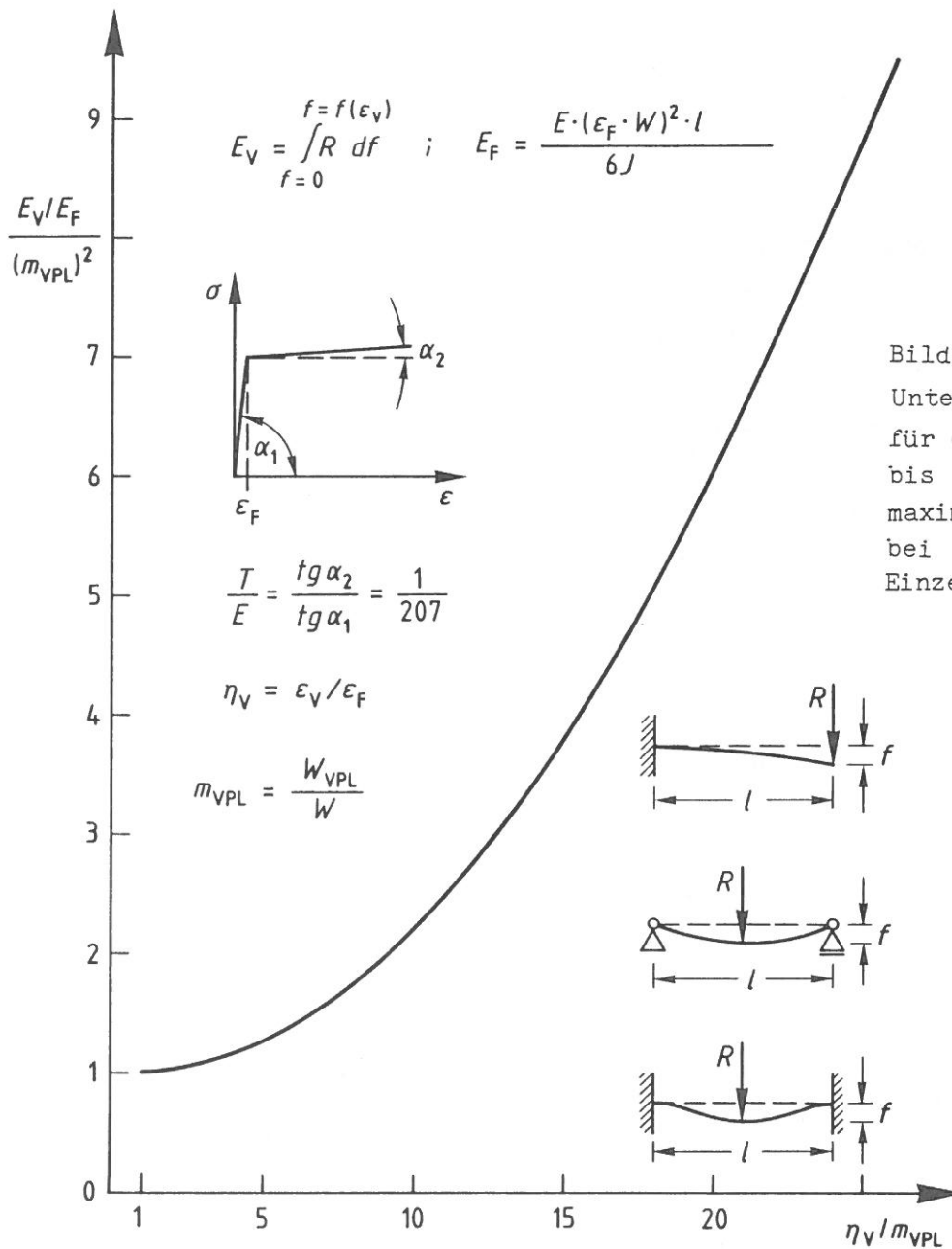


Bild 9
 Unterer Grenzwert nach (35)
 für die Energieaufnahme E_V
 bis zum Erreichen der
 maximalen Randdehnung ϵ_V
 bei Trägern unter
 Einzelkraft-Belastung

6. Zur praktischen Anwendung

6.1 Beispiel "Pfosten eines gegen Absturz sichernden Geländers"

Für den 1 m hohen, einseitig eingespannten Pfosten eines Geländers war ein Rohr 88,9 x 3,2 DIN 2448 - St 35

gewählt worden. Dieser Pfosten soll auch einen "weichen" Stoß mit 100 Nm Aufprallenergie abfangen können /2/. Er darf sich dabei plastisch verformen. Mit den Materialwerten wie im Abschnitt 3.5 und den Querschnittswerten

$$W = 17,8 \text{ cm}^3, J = 79,2 \text{ cm}^4$$

ergeben sich

$$M_F = 240 \cdot 17,8 \cdot 10^3 = 4272 \text{ Nm}$$

$$f_F = \frac{1}{3} \frac{4272 \cdot 10^3 \cdot (10^3)^2}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 79,2 \cdot 10^4} = 8,6 \text{ mm}$$

$$E_F = \frac{1}{6} \frac{(4272 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^3}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 79,2 \cdot 10^4} = 18,3 \text{ Nm}$$

Definiert man "Versagen" als den Zustand, bei dem die Randdehnung

$$\epsilon_V = 2,5 \%$$

erreicht, also

$$\eta_V = 2,5/0,114 = 21,93 = 22$$

und betrachtet das Rohr noch als dünnwandig, also

$$m_{VPL} = 4/\pi = 1,2732 \text{ und } \eta_V/m_{VPL} = 17,3$$

erhält man mit $E/T \approx 207$ (s. Abschnitt 3.5) aus Bild 9

$$\frac{E_V/E_F}{m_{VPL}^2} = 4,76$$

und damit

$$E_V > 4,76 \cdot 1,2732^2 \cdot 18,3 = 141 \text{ Nm} > 100 \text{ Nm}$$

Die mögliche Energieaufnahme bis zum Erreichen des vorstehend definierten Versagenszustands ist also größer als die Aufprallenergie und damit auch größer als die beim Stoß auf den Pfosten übertragene Energie.

Für die Durchbiegung erhält man aus Bild 4

$$\frac{\varphi}{m_{VPL}} = 2,82$$

und somit

$$f \approx 2,82 \cdot 1,2732 \cdot 8,6 = 31 \text{ mm}$$

als einen noch vertretbaren geringen Wert. Das Geländer würde dabei einen Absturz noch verhindern.

Wird m_{VPL} nach der Formel für ein dickwandiges Rohr entsprechend Tabelle 1 berechnet, ergeben sich mit $m_{VPL} = 1,32$ $\eta_V/m_{VPL} = 16,7$

$$E_V > 4,5 \cdot 1,32^2 \cdot 18,3 = 143 \text{ Nm}$$

$$f \approx 2,69 \cdot 1,32 \cdot 8,6 = 30 \text{ mm}$$

also hier noch keine beachtenswerten Unterschiede.

6.2 Faustformeln für Stahl St 37 und St 52

Für schnelle Entscheidungen ist es sinnvoll, eine noch einfachere, dementsprechend gröbere Näherungsformel als Faustformel zur Hand zu haben.

Deshalb sind für eine maximale Randdehnung von $\epsilon_V = 2,5 \%$ für Stahl St 37, also $\sigma_F = 240 \text{ N/mm}^2$, und für Stahl St 52, also $\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$, die Verhältniswerte $\varphi = f/f_F$ und E_V/E_F bei $E/T = 207$ berechnet worden, Tabelle 7.

Es ergeben sich, bezogen auf die Durchbiegung f_F oder die Energieaufnahme E_F bei bzw. bis zu dem Zustand, bei dem die maximale Randspannung gerade die Streckgrenze erreicht, (s. auch Bilder 4 und 9),

für St 37

$$f < 3,9 \cdot f_F \quad \text{und} \quad E_V > 7,1 \cdot E_F$$





sowie für St 52

$$f < 2,5 \cdot f_F \quad \text{und} \quad E_V > 3,7 E_F$$

Während sich bei Trägern aus St 37 die Durchbiegungen bei $\epsilon_V = 2,5 \%$ um ca. 10 % kleiner oder größer errechnen können als bei solchen aus St 52, werden für die Energieaufnahme bei Trägern aus St 37 um ca. 15 % bis 30 % kleinere Werte berechnet als bei Trägern aus St 52, s. Tabelle 7 vorletzte und letzte Spalte.

Tabelle 7

Näherungswerte für die bezogene Durchbiegung f_V/f_F und die bezogene Energieaufnahme E_V/E_F nach Bild 4 bzw. Bild 9 für eine maximale Randdehnung $\epsilon_V = 2,5 \%$, Vergleich Stahl St 37 mit St 52

Querschnittsform	m_{VPL}	für Stahl St 37 ($\sigma_F = 240 \text{ N/mm}^2$)					für Stahl St 52 ($\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$)					St 37/St 52	
		$\frac{\eta}{m_{VPL}}$	$\frac{\varphi}{m_{VPL}}$	$\frac{f_V}{f_F}$	$\frac{E_V/E_F}{m_{VPL}^2}$	$\frac{E_V}{E_F}$	$\frac{\eta}{m_{VPL}}$	$\frac{Y\varphi}{m_{VPL}}$	$\frac{f_V}{f_F}$	$\frac{E_V/E_F}{m_{VPL}^2}$	$\frac{E_V}{E_F}$	$\frac{f_{St37}}{f_{St52}}$	$\frac{E_{VSt37}}{E_{VSt52}}$
	1,70	12,9	2,01	3,42	3,07	8,9	8,9	1,47	2,50	1,95	5,6	0,91	0,71
	1,27	17,3	2,81	3,57	4,77	7,7	11,5	1,80	2,29	2,63	4,2	1,04	0,81
	1,50	14,7	2,31	3,46	3,71	8,3	9,7	1,56	2,34	2,14	4,8	0,99	0,77
	*) 1,20	18,3	3,03	3,64	5,22	7,5	12,2	1,90	2,28	2,72	3,9	1,06	0,85
IPB 100	1,16	19,0	3,19	3,70	5,55	7,5	12,6	1,96	2,27	2,97	4,0	1,09	0,83
Grenzwert	1	22	3,90	3,90	7,10	7,1	14,6	2,29	2,29	3,67	3,7	1,13	0,85

*) $h/b = 2,0$

7. Vergleich mit Ergebnissen aus einem Versuch

7.1 Probekörper und Versuchsanordnung

Ein warmgewalzter Breitflanschträger IPB 100 DIN 1025 St 37-2 diente als Probekörper. An seinem einen Ende war eine dicke Kopfplatte mit Kehlnähten angeschweißt worden, über die der Träger mit 6 vorgespannten Schrauben M20 gegen ein Widerlager geschraubt war. Im Abstand von ca. 1,5 m von der Stelle des Trägeranschlusses an die Kopfplatte verband eine entsprechende Vorrichtung den Träger gelenkig mit der Kraftmeßdose am Kolben eines servohydraulischen Prüfzylinders, Bild 10. Das freie Ende des ca. 1,7 m langen Trägers wurde über ein angeschweißtes 20 mm dickes, auf beiden Seiten mit je 1 mm dicken Kunststoffplatten belegtes Führungsstück zwischen zwei 40 mm dicken Stangen geführt, die einen lichten Abstand von 22,2 bis 22,3 mm hatten.

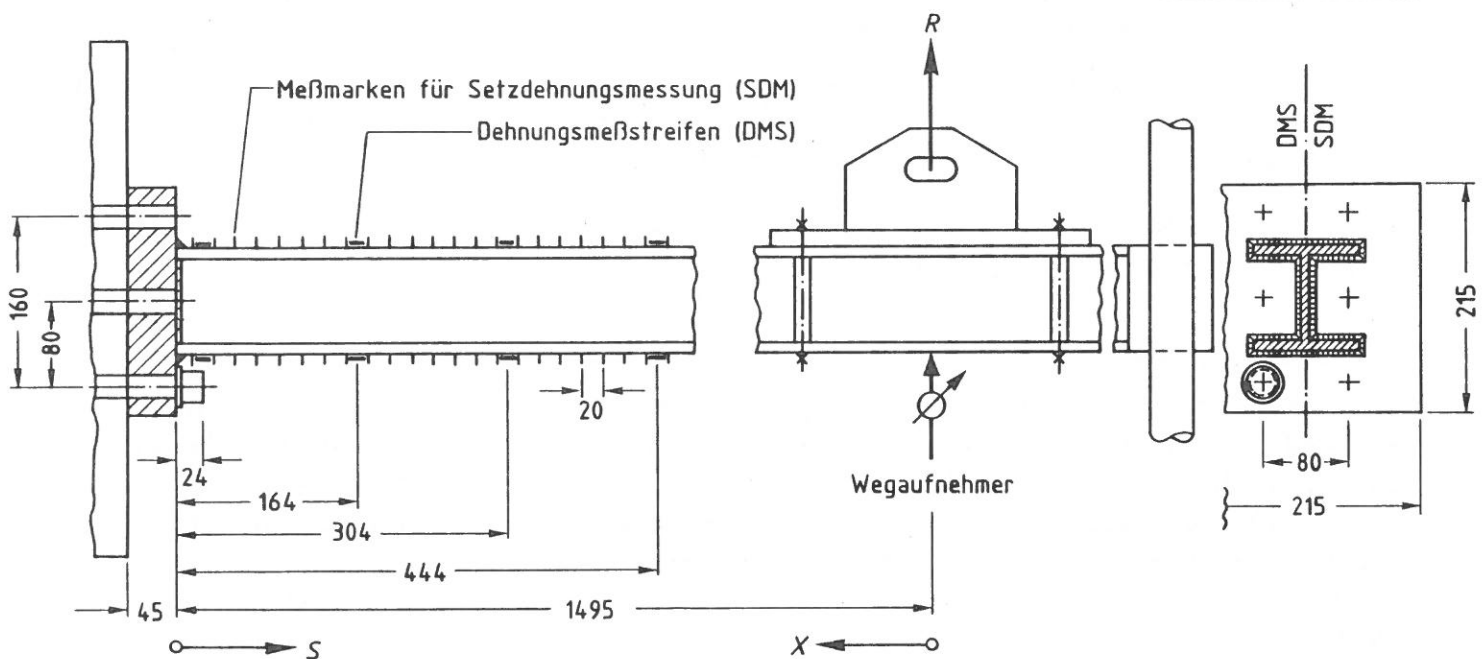


Bild 10

Probekörper (IPB 100) und Versuchsanordnung (Maße in mm)

Zum Messen des Widerstandes R des Trägers gegen eine Zwangsverformung durch den Prüfzylinder diente als Kraftaufnehmer eine 100 kN-Kraftmeßdose. Die zur ursprünglichen Trägerachse senkrechte Komponente des Weges an der Krafteinleitungsstelle wurde mittels eines induktiven Wegaufnehmers ermittelt, der über ein Meßgerüst mit der Anschlußplatte des Widerlagers so verbunden war, daß etwaige Wege und Drehungen dieser Platte kompensiert werden konnten.

In der Stegebene des Trägers waren nahe an der Einspannstelle und in drei weiteren Querschnitten auf den Flanschen Dehnungsmeßstreifen (DMS) geklebt sowie diese übergreifend und zwischen ihnen Meßstrecken für Setzdehnungsmessungen (SDM) mit 20 mm Meßlänge durch eingeschlagene Kügelchen markiert, Bild 10. Zusätzlich dazu waren am Querschnitt nahe der Einspannstelle ($x = 1471$ mm) auch zu den Flanschrändern hin noch vier DMS angebracht, s. auch Bild 12. Mit dem Setzdehnungsmesser Bauart Pfender können unter diesen Bedingungen Dehnungsdifferenzen bis herunter zu $0,5 \text{ } \text{‰}$ differenziert abgelesen werden. Bei den Dehnungsmeßstreifen war mit der angewandten Verstärkungs- und Registriertechnik eine entsprechende Differenzierung bis zu $10^{-3} \text{ } \text{‰}$ möglich.

Aus den Querschnittsabmessungen am Kopfplattenende und in 0,75 m Abstand davon ergaben sich die folgenden mittleren Werte:

Stegdicke	(6 Messungen: 5,1 bis 6,5)	s = 5,9 mm
Flanschdicke	(8 " : 9,6 bis 10,0)	t = 9,8 mm
Flanschbreite	(4 " : 99,4 bis 100,8)	b = 100,1 mm
Trägerhöhe	(6 " : 100,3 bis 101,0)	h = 100,6 mm

Der Tabellenwert aus der Norm für das Widerstandsmoment $W_{N,Tab} = 89,9 \cdot 10^3$ mm wurde den gemessenen mittleren Abmessungen wie folgt angepaßt:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{bh^2}{6} \left(1 - \left(1 - \frac{s}{b}\right) \left(1 - \frac{2t}{h}\right)^3\right) = \\
 &= 86,453 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \text{ mit den Normmaßen bzw.} \\
 &= 86,327 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \text{ mit den mittleren Abmessungen} \\
 W_{Träger} &= 89,9 \cdot 10^3 \cdot 86,327/86,453 = 89,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Das Verhältnis $m_{VPL} = W_{VPL}/W$ (s. Tabelle 1) wurde mit den Abmessungen nach Norm berechnet zu $m_{VPL} = 1,1521$.

7.2 Versuchsdurchführung

Im Versuch wurde das Kragende des Trägers weggeregelt in Stufen zwangsverformt. Die Stufenhöhe betrug von ca. 2,5 mm im elastischen und im anschließenden Übergangsbereich mit örtlichem Fließbeginn über 5, 10, 25 bis zu 50 mm, Bild 11. Die fünfzehn elektrischen Aufnehmer für Wege, Kraft und Dehnungen wurden zwischen den Stufen im Zyklus mit 16 μ s Zeitabstand untereinander alle 5 s abgefragt und registriert. Von der Wegstufe 8,6 mm an war die Abfrage einige Zyklen nach Erreichen der jeweiligen Laststufe gestoppt und erst nach Beendigung der Setzdehnungsmessungen mit einigen Zyklen Vorlauf vor Beginn der weiteren Zwangsverformung wieder gestartet worden. Bis zur Wegstufe 22,6 mm wurden mit dem SDM nur Kontrollmessungen an den Querschnitten $x = 1471$ mm und 1331 mm durchgeführt. Bei den größeren Wegstufen erstreckte sich die Setzdehnungsmessung vom Querschnitt $x = 1471$ mm nahe der Einspannstelle beginnend bis zu den Meßstellen, die gerade noch Dehnungsänderungen auf dem Zugflansch in der Größe von 1 bis 3 ‰ aufwiesen. Nach der Messung bei der Wegstufe 200 mm wurde die Zwangsverformung bis zur Kraftanzeige Null zurückgenommen und erneut gemessen.

Das Führungsstück, s. Absch. 7.1, lag schon bei der ersten Wegstufe 8,6 mm mit zwei seiner diagonal gegenüberliegenden Kanten an den Führungsstangen. Auch bei der Wegstufe 200 mm war dieselbe Art der Anlage festgestellt worden.

7.3 Versuchsergebnisse

7.3.1 Dokumentation der Meßwerte

Der Widerstand R des Trägers ist über der Zwangsverformung f auf Bild 11, die mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Dehnungen sind auf Bild 12 dargestellt. Außerdem sind alle dieser Art gemessenen Dehnungen, bei denen sich auch plastische Anteile ergaben, als Kraft-Dehnungsdiagramme in den Bildern A1 bis A5 aufgezeichnet. Zusätzlich ist eine bestimmte Kombination der Ergeb-

nisse vom Zugflansch im Querschnitt $x = 1,471 \text{ m}$ für die Auswertung (s. dazu Abschn. 7.3.2) auf Bild A6 dargestellt.

Die Ergebnisse der Setzdehnungsmessungen auf den Trägerflanschen sind nach den Stufen der Zwangsverformung f geordnet in der Tabelle A7 zusammengestellt.

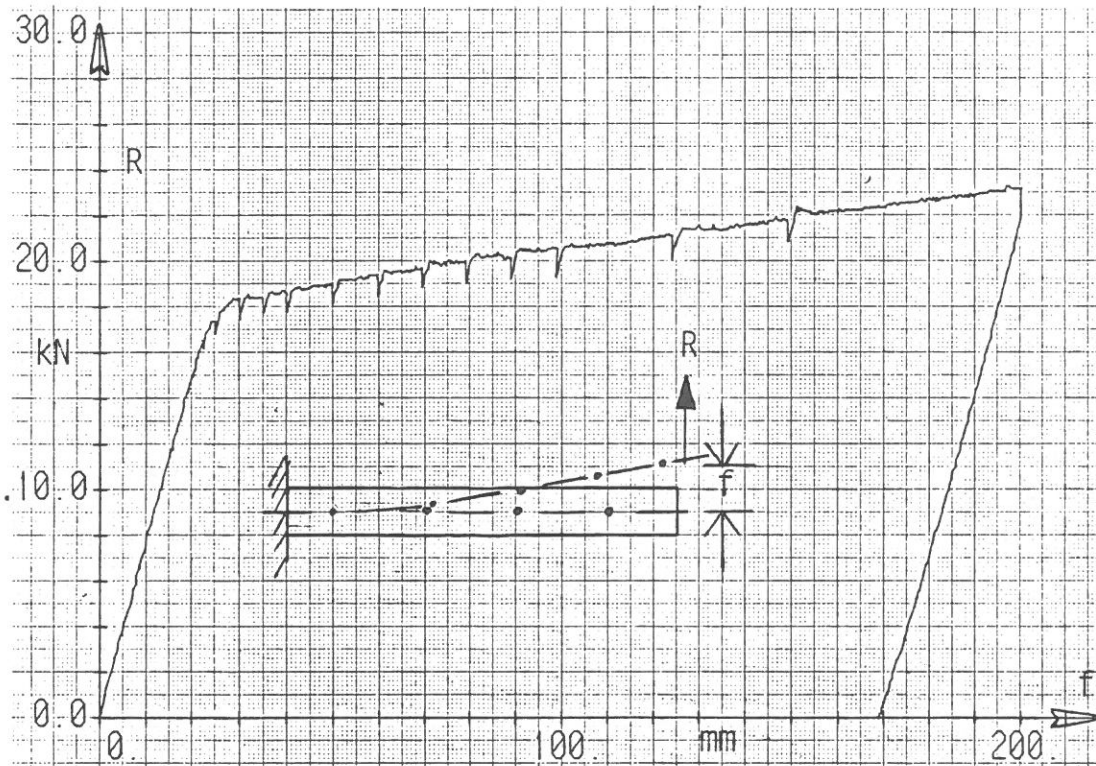


Bild 11

Widerstand R des Kragträgers gegen einen Weg f an der Krafteinleitungsstelle ($x = 0$)

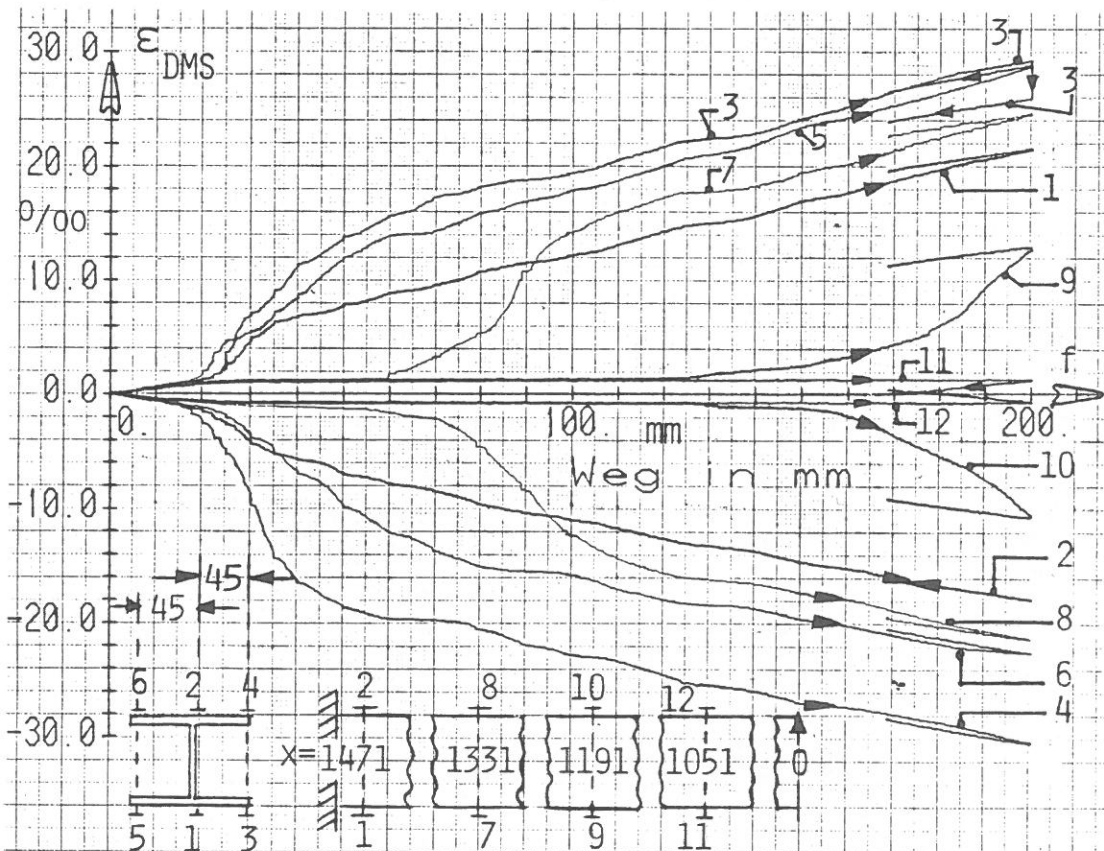


Bild 12

Mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) ermittelte Dehnungen ϵ_{DMS} auf den Flanschen des Trägers in Abhängigkeit vom Weg f an der Krafteinleitungsstelle ($x = 0$)

7.3.2 Kontrolle der mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Ergebnisse im elastischen Bereich

Zur Kontrolle der richtigen Zuordnung der Zahlenwerte für die Querschnittsgrößen des Probekörpers und für den Elastizitätsmodul des Stahles zu den Ergebnissen der Dehnungsmessungen ist in die Kraft-Dehnungsdiagramme die sich rechnerisch ergebende Abhängigkeit bei elastischem Materialverhalten eingezeichnet worden, Bilder A8 bis A13. Diesen Geraden liegt die Beziehung

$$R = (E \cdot W/x) \cdot \epsilon = (18,858(\text{kNm}^\circ/\text{oo})/x(\text{m})) \cdot \epsilon(\text{oo})$$

zugrunde, mit

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \quad W = 89,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \quad (\text{s. Abschn. 7.1})$$

und x nach Bild 12.

In den Querschnitten, die etwas weiter vom Kopfplattenende ("Einspannstelle") entfernt liegen, also $x = 1,051 \text{ m}$ bis $1,331 \text{ m}$ (s. auch Bild 12), bleiben die Dehnungen am Druckflansch ab $R \approx 9 \text{ kN}$ bis 10 kN eindeutig hinter den am Zugflansch gemessenen zurück, und zwar bei den mehr von der Einspannstelle entfernt liegenden Querschnitten, also $x = 1,055 \text{ m}$ und $1,191 \text{ m}$, stärker als bei dem näher gelegenen Querschnitt $x = 1,331 \text{ m}$. Später, bei größeren aufgezwungenen Wegen an der Krafteinleitungsstelle, konnte mit dem Auge ein Ausweichen des oberen Flansches festgestellt werden. Beide Beobachtungen deuten darauf hin, daß dieses Geschehen schon bei einem Weg von ca. 10 mm ($\hat{=} R \text{ ca. } 9 \text{ kN}$ s. Bild 11) beginnt. Die Führung am Kragende des Trägers verhinderte zwar das Biegedrillknicken eines eingespannten Trägers mit einem freien Ende, konnte aber nicht dafür sorgen, daß nur zur Stegebene symmetrische Biegeverformungen auftraten.

Die in diesen drei Querschnitten gemessenen Dehnungen im Zugflansch stimmen jedoch bemerkenswert gut mit den nach Rechnung zu erwartenden elastischen Geraden überein. Für die Auswertung werden deshalb nur die Dehnungen des Zugflansches zugrunde gelegt.

Im Querschnitt nahe der Einspannstelle, also $x = 1,471 \text{ m}$, sind dagegen im Zugflansch und im Druckflansch die Dehnungen an beiden Flanschrändern von Anfang an größer als rechnerisch zu erwarten ist und im Zugflansch zumindest zu Anfang auch größer als die in der Stegebene gemessenen Dehnungen. Die Ursache zu dieser "nicht ebenen" Dehnungsverteilung kann nicht in der (außerplanmäßigen) unsymmetrischen Beanspruchung gesehen werden, sondern wird in unterschiedlicher Verformungsbehinderung von Flanschen und Steg durch den Kopfplattenanschluß vermutet. Diesem an sich interessanten Problem wird hier aber nicht weiter nachgegangen. Vielmehr wurde versucht, durch eine einfache Kombination der Meßwerte an den Rändern und in der Mitte des Zugflansches einen Vergleichswert ϵ_z für eine (fiktive) ebene Dehnungsverteilung auch in diesem Querschnitt zu erhalten. Mit der Kombination

$$\epsilon_z = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \frac{1}{2}(\epsilon_3 + \epsilon_5)) = \epsilon_1/2 + \epsilon_3/4 + \epsilon_5/4$$

gelang dieses in einem zufriedenstellenden Maße, Bild A14. Für diese Auswertung wird daher dieser Vergleichswert verwendet.

7.3.3 Vergleich der mit Dehnungsmeßstreifen oder mit Setzdehnungsmesser ermittelten Ergebnisse

Einen Hinweis auf die Verlässlichkeit der Messungen liefert ein Vergleich der Ergebnisse beider Meßarten, Tabelle A15. Die Zahlenwerte dazu sind der Tabelle A7 und den entsprechenden Kraft-Dehnungsdiagrammen auf den Bildern A1 bis A8 entnommen worden. Es wurde immer der Wert bei Erreichen der Wegstufe, deutlich erkennbar durch den Beginn des Zurückgehens des Trägerwiderstandes R (bei konstant gehaltenem Weg), aus den Diagrammen dazu verwendet. Der Vergleich zeigt, daß mit dem Setzdehnungsmesser überwiegend um (1 bis 5) ‰ größere Werte ermittelt wurden als mit den Dehnungsmeßstreifen.

Für die Vergleichsdehnung ϵ_z (s. Abschn. 7.3.2) sind die entsprechenden Werte für die folgende Auswertung ebenfalls dem Diagramm entnommen und in die Tabelle A15 eingetragen worden.

7.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

7.4.1 Dehnungsverlauf nahe der Einspannstelle

Für sieben Wegstufen, bei denen sich der Bereich plastischer Dehnungen mindestens bis zum Querschnitt $x = 1,331$ m erstreckt und zwischen denen der Trägerwiderstand eine deutliche Differenz (0,4 kN und größer) aufweist, sind die gemessenen Dehnungen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Einspannstelle im Bild 13 dargestellt. Dabei wurden für den Querschnitt $x = 1,471$ m die Vergleichsdehnungen ϵ_z verwendet.

Wie die Darstellungen zeigen, wird der starke Anstieg der Dehnungen im plastischen Bereich zur Einspannstelle bei ca. 50 mm vor dieser abgeflacht und in einen Abfall umgekehrt. Die Dehnungsbehinderung durch die massive Kopfplatte zeigt sich bei den Ergebnissen der Dehnungsmessungen am Querschnitt $x = 1,471$ m ($s = 24$ mm) eindeutig. Beim Rechenansatz wird aber ein monotones Ansteigen der Dehnungen bis zur Einspannstelle zugrunde gelegt. Deswegen werden über eine lineare Regression entsprechende Dehnungswerte ϵ_0 extrapoliert, wobei die Meßwerte aus dem Bereich der Dehnungsbehinderung nicht mit einbezogen werden. Die im Regressionsbereich teilweise stark abweichenden Einzelergebnisse der Setzdehnungsmessungen werden jedoch alle berücksichtigt, da sich der größte Anteil der Abweichung vermutlich aus den Veränderungen der Kugelchen-Lage im Material infolge plastischer Verformungen ergibt. Darauf deutet auch die Abweichung der jeweils folgenden Meßstelle nach der anderen Seite hin.

Die aus der linearen Regression $\epsilon = A \cdot s + B$ extrapolierte Randdehnung $\epsilon_0 = B$, das aus dem Anstieg $d\epsilon/ds = A$ sich ergebende Verhältnis

$$E/T = (-A) \cdot EW/R = 18,858 \text{ (kNm}^0\text{/}00) \cdot (-A)/R$$

und die die "Güte" der Regression ausdrückende Wurzel r des Bestimmtheitsmaßes sind in der Tabelle 8 zusammengestellt.

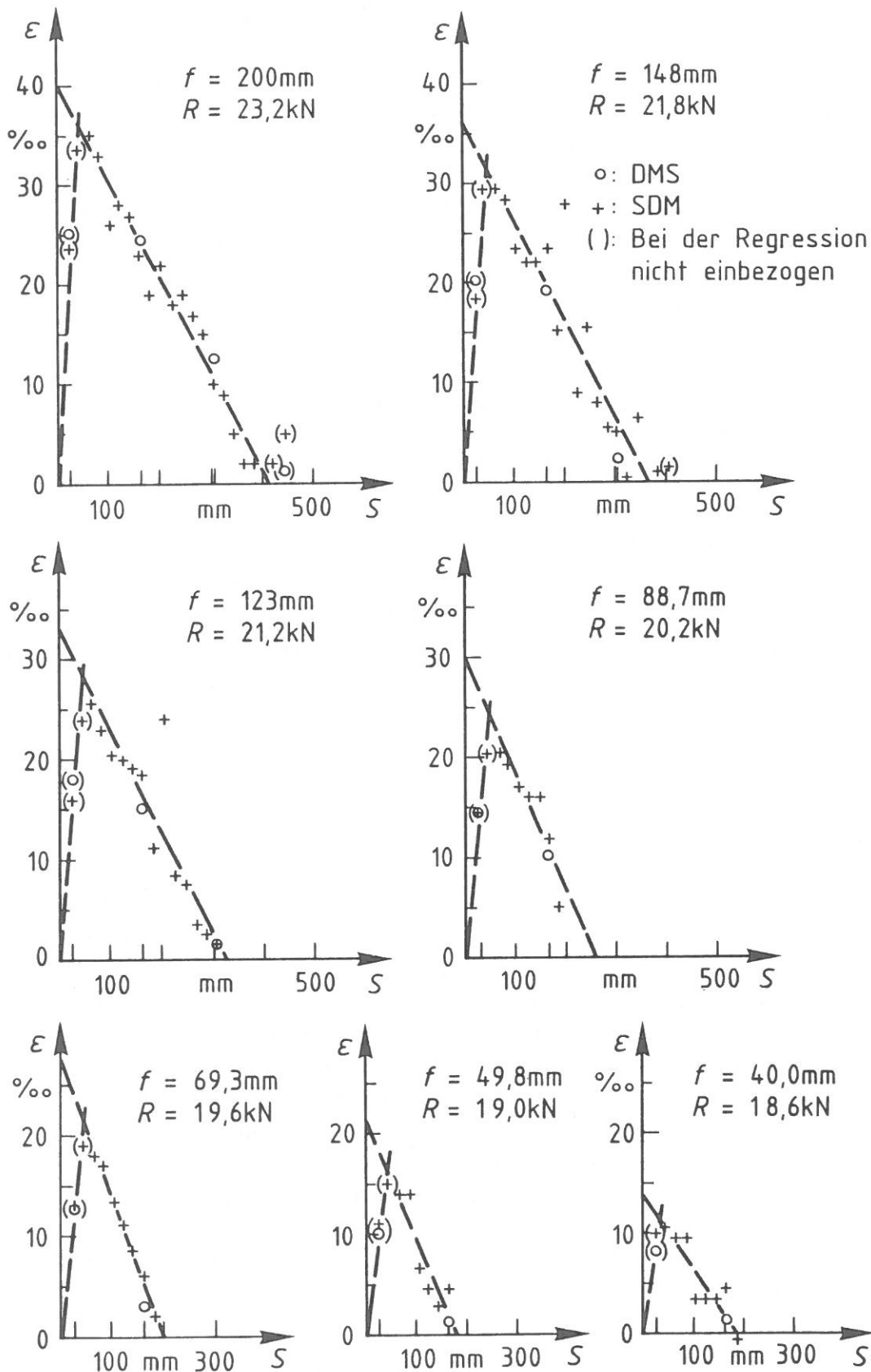


Bild 13

Dehnungen ϵ auf der Zugflanschoberfläche in Stegebene in Abhängigkeit von der Entfernung s der Meßstelle von der Einspannstelle $s = 0$ ($\hat{=} x = 1,495 \text{ m}$) bei verschiedenen Durchbiegungen f an der Einleitungsstelle der Kraft R

Tabelle 8

Vergleich der näherungsweise errechneten Durchbiegung \tilde{f} nach Gl. (19) mit der hinsichtlich Verformungsbehinderung nach Bild 14 korrigierten gemessenen Durchbiegung ($f + \Delta f$)

f	mm	200	148	123	98,6	88,7	79,0	69,3	59,8	49,8	40,0	35,1	30,1	25,3
R	kN	23,2	21,8	21,2	20,6	20,2	20,0	19,6	19,4	19,0	18,6	18,4	18,3	17,4
M_0	kNm	34,68	32,59	31,69	30,80	30,20	29,90	29,30	29,00	28,40	27,81	27,51	27,36	26,01
r	-	0,982	0,925	0,915	0,962	0,916	0,931	0,982	0,951	0,913	0,915	0,864	0,822	0,584
$\epsilon_0 = B$	‰	40,14	35,95	33,11	27,80	29,14	29,50	27,95	24,06	21,42	14,04	9,76	8,59	5,14
-A	(‰)/mm	0,0972	0,0979	0,1023	0,0827	0,1123	0,1327	0,1398	0,1304	0,1205	0,0749	0,0474	0,0403	0,0222
E/T	-	79,01	84,69	91,00	75,71	104,8	125,1	134,5	126,8	119,6	75,94	48,58	41,53	24,06
λ	-	0,2670	0,2366	0,2078	0,2145	0,1656	0,1418	0,1272	0,1164	0,1115	0,1137	0,1196	0,1214	0,1182
1- λ	-	0,7330	0,7634	0,7922	0,7855	0,8344	0,8582	0,8728	0,8836	0,8885	0,8863	0,8804	0,8786	0,8818
M_{VPL}	kNm	25,42	24,88	25,10	24,19	25,20	25,66	25,57	25,62	25,23	24,65	24,22	24,04	22,93
ϵ_λ	‰	1,3481	1,3193	1,3313	1,2830	1,3362	1,3606	1,3560	1,3587	1,3381	1,3070	1,2843	1,2747	1,2162
\tilde{A}	(‰)/mm	0,8668	0,7211	0,6062	0,5457	0,5183	0,4931	0,4689	0,4264	0,3785	0,3792	0,3521	0,2604	0,1152
λ_{St}		0,02785	0,02936	0,03126	0,02959	0,03091	0,03153	0,03071	0,02890	0,02871	0,02068	0,01634	0,01911	0,02503
$\Delta\tilde{\phi}/m_{VPL}$	-	1,2323	1,1883	1,1540	0,9522	1,0007	1,0147	0,9398	0,7603	0,6828	0,3309	0,1852	0,1919	0,1574
$\Delta\tilde{f}$	mm	24,3	23,5	22,8	18,8	19,8	20,0	18,6	15,0	13,5	6,53	3,7	3,8	3,1
$\tilde{\phi}/m_{VPL}$	-	11,7302	9,7898	8,1112	7,3659	6,0353	5,3228	4,7024	3,9137	3,5220	2,7058	2,2492	2,1168	1,6607
\tilde{f}	mm	231,6	193,3	160,2	145,4	119,2	105,1	92,9	77,3	69,5	53,4	44,4	41,8	32,8
$\frac{\tilde{f}}{f + \Delta f}$	-	1,03	1,13	1,10	1,24	1,10	1,06	1,06	1,03	1,10	1,15	1,14	1,23	1,15

7.4.2 Bestimmung des Momentes und der Dehnung bei Fließbeginn

Bestünde der Probekörper aus einem homogenen und eigenspannungsfreien Material mit ausgeprägter Fließgrenze, würde sich das der Berechnung zugrundeliegende Moment M_F bei Beginn des Fließens am Querschnittsrand, hier abgekürzt als Fließmoment bezeichnet, aus der Fließspannung R_{eH} des Zugversuches berechnen lassen. Die Zugversuche an vier aus den Flanschen normgemäß herausgearbeiteten und geprüften Werkstoffproben ergaben

$$\text{mittl. } R_{eH} = 300 \text{ N/mm}^2 \text{ (294 N/mm}^2 \text{ bis 305 N/mm}^2\text{)}$$

(Die Proben waren nicht dem Probekörper, wohl aber dem Profilstab, aus dem der Probekörper geschnitten worden war, entnommen worden.)

Das entspricht einem Widerstand des Kragträgers von $300 \cdot 89,8 \cdot 10^3 / 1,495 = 18,0 \text{ kN}$.

Das Kraft-Durchbiegungsdiagramm, Bild 11, zeigt, daß die Grenze des nur elastischen Verformungsverhaltens des Trägers schon merkbar früher erreicht ist. Deswegen muß das der Vergleichsrechnung zugrunde zu legende Fließmoment M_F über das Moment bei gedachter Vollplastizierung des Querschnittes M_{VPL} aus dem Verlauf der Dehnungen längs des Trägers ermittelt werden. Entsprechend Bild 3 gilt

$$m_{VPL} = m_0(1-\lambda), \quad \text{d. h. } M_{VPL} = M_0(1-\lambda)$$

wobei sich λ aus dem Schnittpunkt der Geraden

$$\epsilon = A \cdot s + B \quad \text{und} \quad \epsilon = \frac{M_0}{EW} \left(1 - \frac{s}{l}\right)$$

unter Beachtung von $B = \epsilon_0$ zu

$$\lambda = \frac{\epsilon_0 - M_0/(EW)}{(-A) \cdot l - M_0/(EW)}$$

ergibt.

Die Zahlenwerte für M_{VPL} , die sich für die einzelnen Wegstufen errechnen, s. Tabelle 8, liegen dicht beieinander, so daß ihr mittlerer Wert als Produkt aus E-Modul, Widerstandsmoment W und dem fiktiven Werkstoffkennwert ϵ_F , d. h. der Dehnung bei Fließbeginn am Querschnittsrand eines eigenspannungsfreien Trägers aus homogenem Material aufgefaßt werden kann. Es ergeben sich

$$\text{mittl. } M_{VPL} = 25,15 \text{ kNm (Variationskoeffizient} = 1,9 \%)$$

$$\epsilon_F = \text{mittl. } M_{VPL} / (m_{VPL} \cdot E \cdot W) = 25,15 / (1,1521 \cdot 18,858)$$

$$= 1,1577 \approx 1,16 \text{ ‰}$$

$$M_F = \text{mittl. } M_{VPL} / m_{VPL} = 25,15 / 1,1521 = 21,8 \text{ kNm}$$

Dem entspricht eine fiktive Fließspannung von

$$\sigma_F = 243 \text{ N/mm}^2.$$

Als Durchbiegung bei Fließbeginn am Querschnittsrand an der Einspannstelle ergibt sich

$$\text{mittl. } f_F = \frac{2}{3} \cdot 1,1577 \cdot 1,495 \cdot 1495/100,6 = 17,14 \text{ mm}$$

Zur Mittelwertbildung sind nur die 10 höheren Wegstufen herangezogen worden, für die $r > 0,9$ ist.

7.4.3 Verformungsbehinderung an der Einspannstelle

Um den Einfluß der in Abschn. 7.4.1 beschriebenen Dehnungsbehinderung auf die Durchbiegung abzuschätzen, wird ein linearer Dehnungsabfall von einer durch die Störung der ungehinderten Dehnung verursachten Dehnung ϵ_{St} bei $s = \lambda_{St} \cdot l$ auf den Wert $\epsilon = 0$ bei $s = 0$ angenommen.

Die Werte für ϵ_{St} und λ_{St} errechnen sich aus dem Schnittpunkt der Geraden $\epsilon = A \cdot s + B$ und derjenigen Regressionsgeraden $\epsilon = \check{A} \cdot s$, die durch den Punkt ($\epsilon = 0$, $s = 0$) geht und die Ergebnisse der Meßpunkte $s = 24 \text{ mm}$ und 44 mm berücksichtigt, s. die im Bild 13 mit () gekennzeichneten Meßwerte im entsprechenden Bereich. (Bei den Wegstufen 40 mm , $35,1 \text{ mm}$ und $30,1 \text{ mm}$ wurden hierzu nur die Ergebnisse des Meßpunktes $s = 24 \text{ mm}$ herangezogen.)

Die über

$$\lambda_{St} = \frac{\epsilon_0}{l(\check{A} + (-A))}$$

berechneten Zahlenwerte sind in Tabelle 8 eingetragen. Damit kann der Anteil $\Delta \tilde{f}$ an Durchbiegung rechnerisch abgeschätzt werden, um den die gemessene Durchbiegung f gegenüber dem nach dem dargestellten Näherungsverfahren ermittelten Wert \tilde{f} nach Gl. (19) kleiner ist, Bild 14.

$$\Delta \tilde{f} = m_{VPL} \cdot f_F \cdot \frac{\Delta \tilde{\varphi}}{m_{VPL}}$$

$$\text{mit } \frac{\Delta \tilde{\varphi}}{m_{VPL}} = \frac{1}{2} \lambda_{St} (3 - \lambda_{St}) \cdot \frac{\epsilon_0}{\epsilon_\lambda}$$

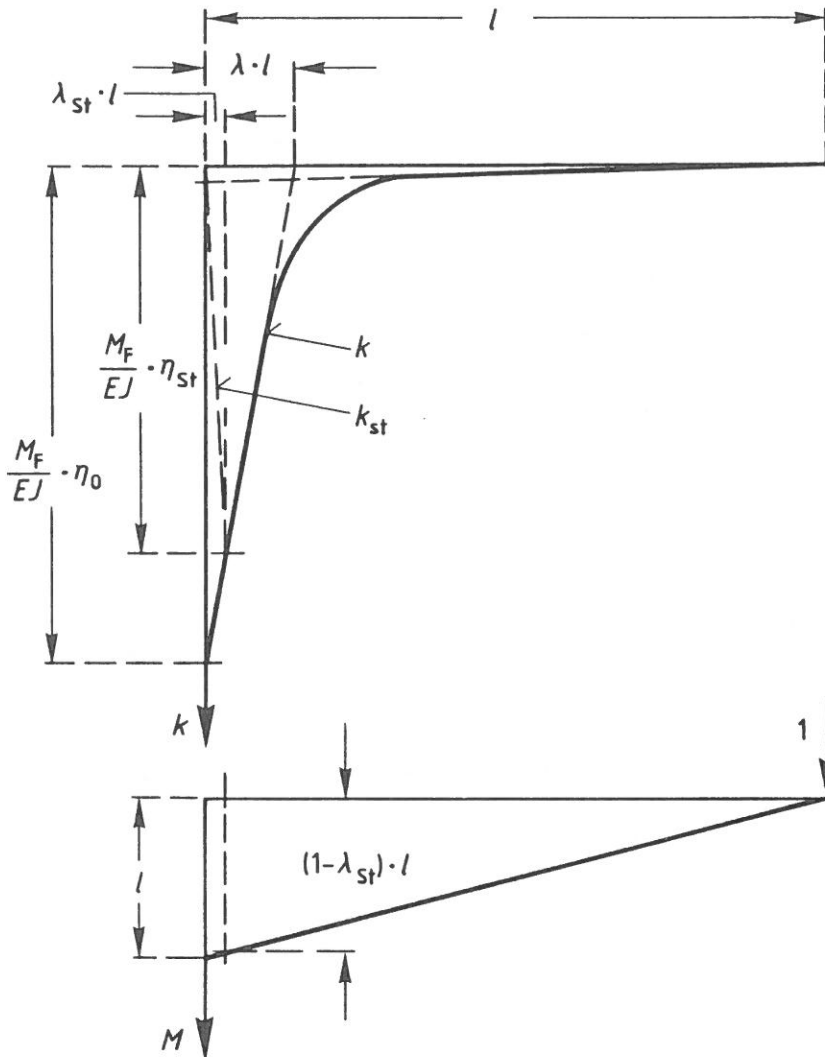


Bild 14

Abschätzung $\Delta \tilde{f}$ der Durchbiegungsminderung infolge Störung k_{St} des Krümmungsverlaufs nahe der Einspannstelle

$$\Delta \tilde{f} = \int_{s=0}^{\lambda_{St} \cdot l} k_{St} \cdot M \cdot ds \quad \text{mit} \quad k_{St} = \frac{M_F}{EJ} \cdot \eta_0 \cdot \left(1 - \frac{s}{\lambda_{St} \cdot l}\right)$$

$$= \frac{M_F \cdot l^2}{3EJ} \cdot \frac{1}{2} \cdot \eta_0 \cdot \lambda_{St} \cdot (3 - \lambda_{St})$$

$$\Delta \tilde{\varphi} = \Delta \tilde{f} / f_F = 0,5 \cdot \lambda_{St} \cdot (3 - \lambda_{St}) \cdot \eta_0$$

7.4.4 Rechnerische Durchbiegung und Vergleich mit Versuchswerten

Die Durchbiegung errechnet sich näherungsweise nach Gl. (19) zu

$$\tilde{f} = m_{VPL} \cdot f_F \cdot \frac{\tilde{\varphi}}{m_{VPL}}$$

$$\text{mit} \quad \frac{\tilde{\varphi}}{m_{VPL}} = (1 - \lambda)^2 + 1,5 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_\lambda} + 1\right) - 0,5 \cdot \lambda^2 \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_\lambda} + 2\right)$$

und zum Vergleich mit gemessenen Werten f dient das Verhältnis $\tilde{f} / (f + \Delta \tilde{f})$.

Es gibt an, um wieviel der näherungsweise errechnete Wert sich von demjenigen unterscheidet, der gemessen worden wäre, wenn keine Verformungsbehinderung an der Einspannstelle auftreten würde.

Die entsprechenden Zahlenwerte sind für die einzelnen Wegstufen ebenfalls in Tabelle 8 eingetragen.

Der Unterschied der näherungsweise errechneten Durchbiegung \tilde{f} zur Durchbiegung ohne Verformungsbehinderung ($f + \Delta\tilde{f}$) beträgt im Bereich größerer Durchbiegungen $f \geq 40$ mm höchstens 15 %. (Eine Ausnahme davon stellt mit 24 % das Ergebnis der Wegstufe 88,7 mm (20,6 kN) dar. Die Ursache für diese Ausnahme konnte nicht festgestellt werden.) Allerdings sind die Rechenwerte größer als die hinsichtlich der Verformungsbehinderung näherungsweise korrigierten gemessenen Durchbiegungen.

Der bei der Näherungsrechnung vernachlässigte Krümmungsanteil, s. Bild 3, würde aber gerade Verhältniswerte kleiner 1 erwarten lassen, s. Bild 6. Bei dem vorliegenden Trägerquerschnitt IPB 100 ist der Einfluß dieser vernachlässigten Krümmungen jedoch nur gering, s. Bild 4.

Da die Verhältniswerte alle größer 1 sind, ist eine systematische Ursache zu vermuten. In die Ermittlung von ϵ_0 gehen hauptsächlich die über Setzdehnungsmessungen ermittelten Werte ein, die um 1 ‰ bis 5 ‰ über den entsprechenden mit Dehnungsmeßstreifen gemessenen liegen, s. Abschn. 7.3.3.

Werden die Setzdehnungsmeßergebnisse um 3 ‰ geringer angesetzt, ergibt sich bei gleichbleibender Neigung A der Regressionsgeraden für $\epsilon = \epsilon(s)$ z. B. für die Wegstufe $f = 148$ mm ($R = 21,8$ kN) die maximale Randdehnung $\epsilon_0 = 33$ ‰ (statt 36 ‰ nach Tab. 8). Damit errechnet sich unter Berücksichtigung der Abschnitte 7.4.2 und 7.4.3 mit

$$\epsilon_0 / \epsilon_\lambda = 24,74 \text{ über } \lambda = 0,21162$$

$$\tilde{\varphi} / m_{VPL} = 8,3379 \text{ und } \tilde{f} = 164,6 \text{ mm}$$

$$\text{sowie mit } \lambda_{St} = 0,02695$$

$$\Delta\tilde{\varphi} / m_{VPL} = 0,9912 \text{ und } \Delta\tilde{f} = 19,6 \text{ mm,}$$

so daß sich ergibt

$$\tilde{f} / (f + \Delta\tilde{f}) = 0,98$$

Die möglicherweise gegenüber der Realität überhöhten Dehnungsmessungen können die Ursache für die systematisch >1 statt <1 sich ergebenden Verhältniswerte $\tilde{f} / (f + \Delta\tilde{f})$ sein.

Durch die Einbeziehung der Ergebnisse aller Dehnungsmessungen und ihren mathematischen Ausgleich durch lineare Regression für ihre Abhängigkeit von der Stelle der Meßstrecke in Trägerlängsrichtung wurde eine etwaige "Willkür" des Auswertenden ausgeschlossen, auch wenn damit möglicherweise nicht die beste Anpassung von Versuch und Rechnung zu erreichen war. In Hinblick auf die Rechenempfindlichkeit der Näherungsformeln für \tilde{f} und $\Delta\tilde{f}$, insbesondere bzgl. der

Größen ϵ_0 und E/T , sind die Abweichungen von der gemessenen Durchbiegung jedoch nur noch von untergeordneter Bedeutung.

7.4.5 Momenten-Dehnungsbeziehung für den Querschnitt des Probekörpers

Bei jeder Wegstufe sind die Querschnitte des Kragträgers in Abhängigkeit von ihrer Lage x zur Krafteinleitungsstelle bei $x = 0$ mit verschiedenen äußeren Momenten beansprucht. Bei einem Träger aus homogenem Material mit gleichem Eigenspannungszustand an jedem Querschnitt könnte man die Momenten-Dehnungsbeziehung des Trägerquerschnittes aus den Messungen zu jeder Wegstufe deckungsgleich ermitteln. In der Wirklichkeit ist diese Deckungsgleichheit nicht erreichbar. Da das Moment, als Maß für die Beanspruchung, und die Lage des Querschnittes direkt voneinander abhängig sind, ist dieses schon auf Bild 13 erkennbar. Der besseren Anschaulichkeit wegen sind jedoch die $(M-\epsilon)$ -Beziehungen für den Zustand der größten Durchbiegung ($f = 200 \text{ mm}$; $R = 23,2 \text{ kN}$) und für die Zustände mit dem größten ($f = 69,3 \text{ mm}$; $R = 19,6 \text{ kN}$) und dem kleinsten ($f = 40 \text{ mm}$; $R = 18,6 \text{ kN}$) E/T -Wert auf Bild 15 dargestellt.

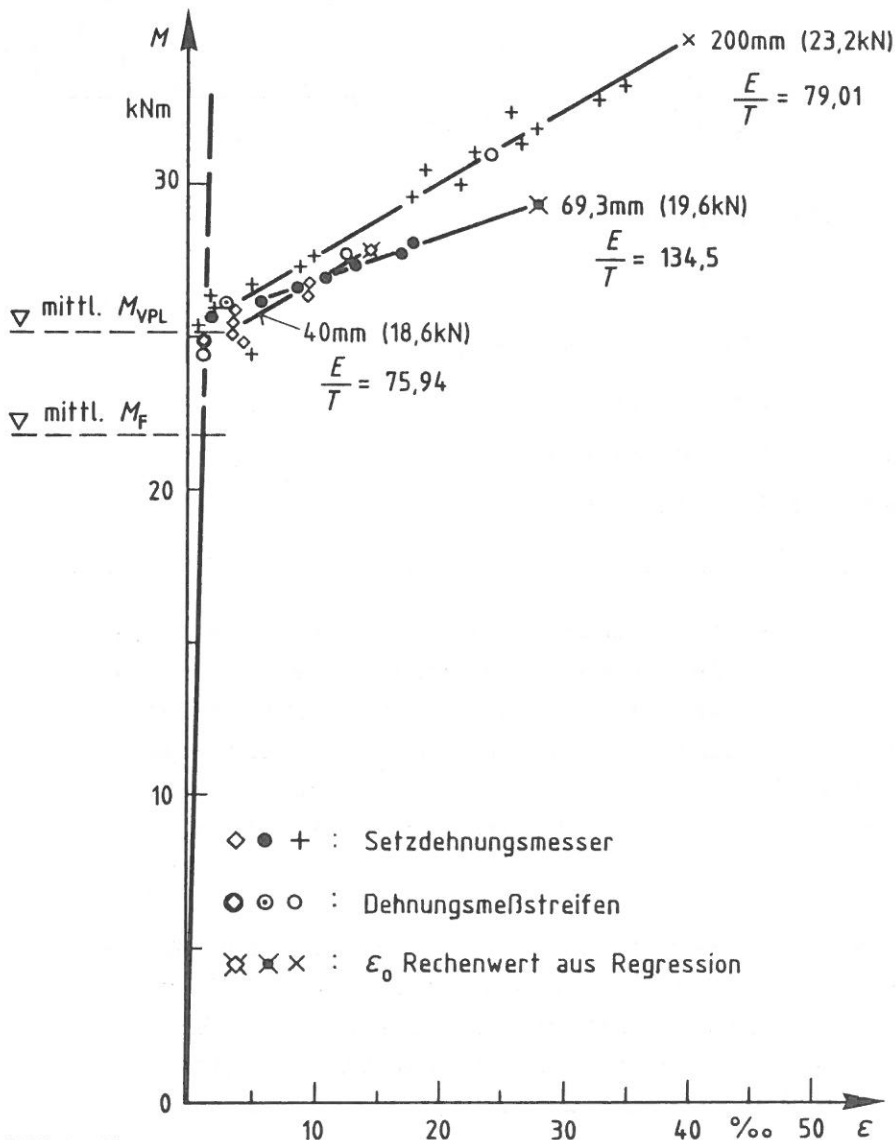


Bild 15

Momenten-Dehnungsbeziehung, ermittelt für jeweils eine Wegstufe f (Widerstand R) aus in Trägerlängsrichtung verteilten Dehnungsmessungen (s. Bilder 10 und 13)

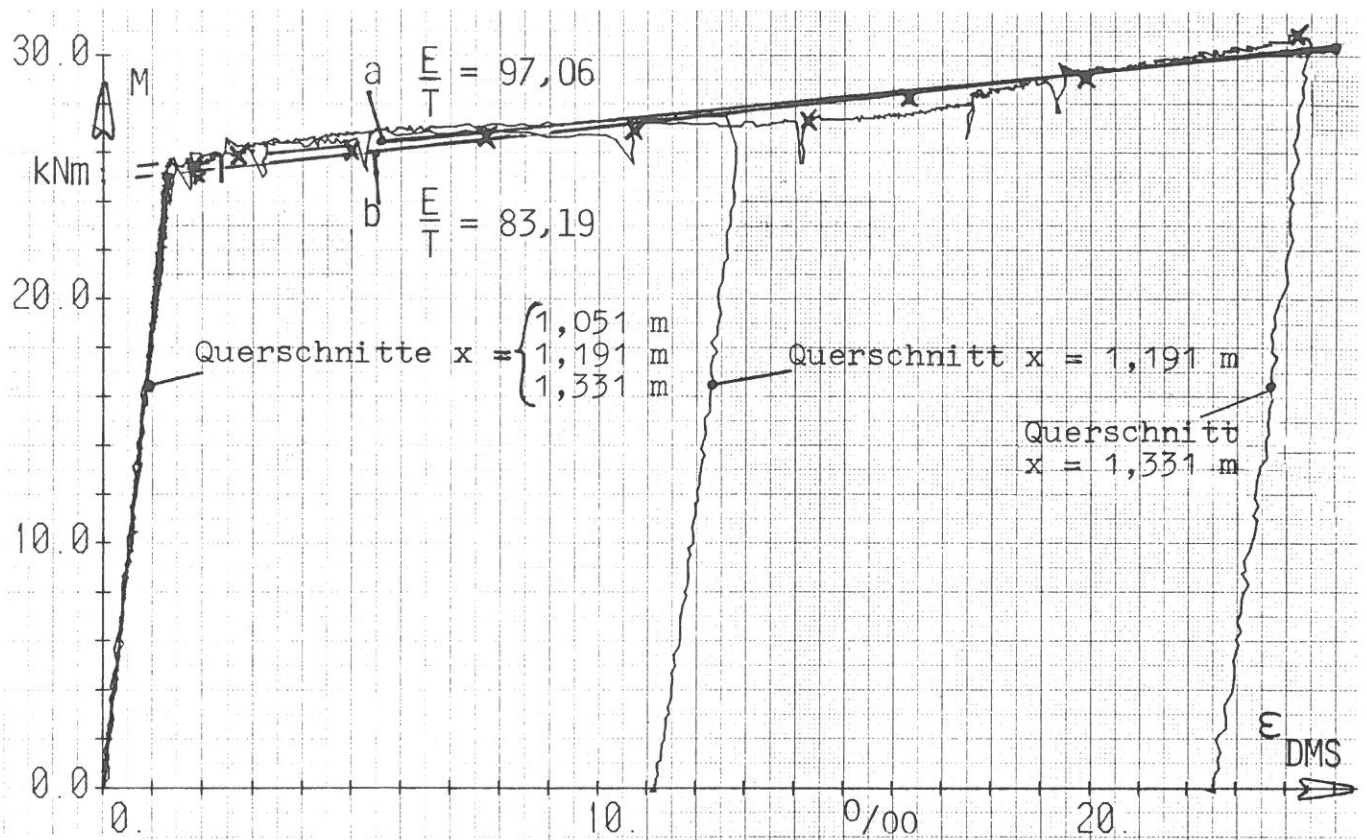


Bild 16

Momenten-Dehnungsbeziehung, ermittelt an jeweils einem Querschnitt.

Bei Querschnitt $x = 1,331$ m

a: Ausgleichende Gerade $M(\text{kNm}) = 0,1943 \cdot \epsilon_a (\text{‰}) + 25,31$

b: Ausgleichende Gerade $M(\text{kNm}) = 0,2267 \cdot \epsilon_b (\text{‰}) + 24,74$

ϵ_a = Mit DMS ermittelte Dehnungen, s. Tabelle A15

ϵ_b = Aus Regression über s ermittelte Dehnungen, s. Bild 13 und Tab. 8 (Zeichen x)

Die Momenten-Dehnungsbeziehung für einzelne Querschnitte, hier für $x = 1,331$ m, $1,191$ m und $1,051$ m, sind aus den mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Ergebnissen auf den Bildern 16 und A16 (vergrößerter Anfangsbereich) zusammengestellt. Das für größere Wegstufen errechnete mittlere "vollplastische Moment" $M_{VPL} = 25,15$ kNm (s. Abschn. 7.4.2) liegt nahe bei dem Niveau, das die an den Querschnitten $x = 1,331$ m, und $x = 1,191$ m mit DMS ermittelten Schriebe aufzeigen, Bild A16.

Zusätzlich sind in Bild 16 die Dehnungswerte eingetragen, die sich aus den Regressionsgeraden $\epsilon = A \cdot s + B$, Tabelle 8, für den Querschnitt $x = 1,331$ m ergeben, einschließlich der dazugehörigen ausgleichenden Geraden. Außerdem ist für diesen Querschnitt auch die Gerade eingetragen, die die mit DMS gemessenen Dehnungen (s. auch Tabelle A15 $s = 164$ mm) ausgleicht. Da im Rahmen des Rechenmodells für $\epsilon \gg \epsilon_F$ gilt, s. Gl. (14)

$$M = \frac{EW}{E/T} \cdot \epsilon + M_{VPL} \frac{E/T-1}{E/T}$$

erhält man über diese Geraden für den Querschnitt $x = 1,331 \text{ m}$ als einen über die Beanspruchung bis $\epsilon = 25 \text{ ‰}$ gemittelten Wert

$$\text{mittl. } E/T = \frac{EW}{dM/d\epsilon} = 97,06 \text{ bzw. } 83,19$$

Beide Zahlen liegen in den Grenzen, die sich aus den Regressionen der in Trägelängsrichtung verteilten, bei den einzelnen Wegstufen gemessenen Dehnungen ergeben, siehe Bilder 13 und 15 sowie Tabelle 8.

7.5 Folgerungen aus dem Vergleich

Das dem Rechenmodell zugrunde gelegte fiktive Trägermaterial, für das entgegen der Realität eine bilineare σ - ϵ -Beziehung und Eigenspannungsfreiheit angenommen wird, hat für jeden Beanspruchungszustand andere Eigenschaften, gekennzeichnet durch E/T zwischen ca. 134 und 80 sowie σ_F zwischen ca. 248 bis 234 N/mm^2 bei Dehnungen zwischen 25 ‰ und 40 ‰ .

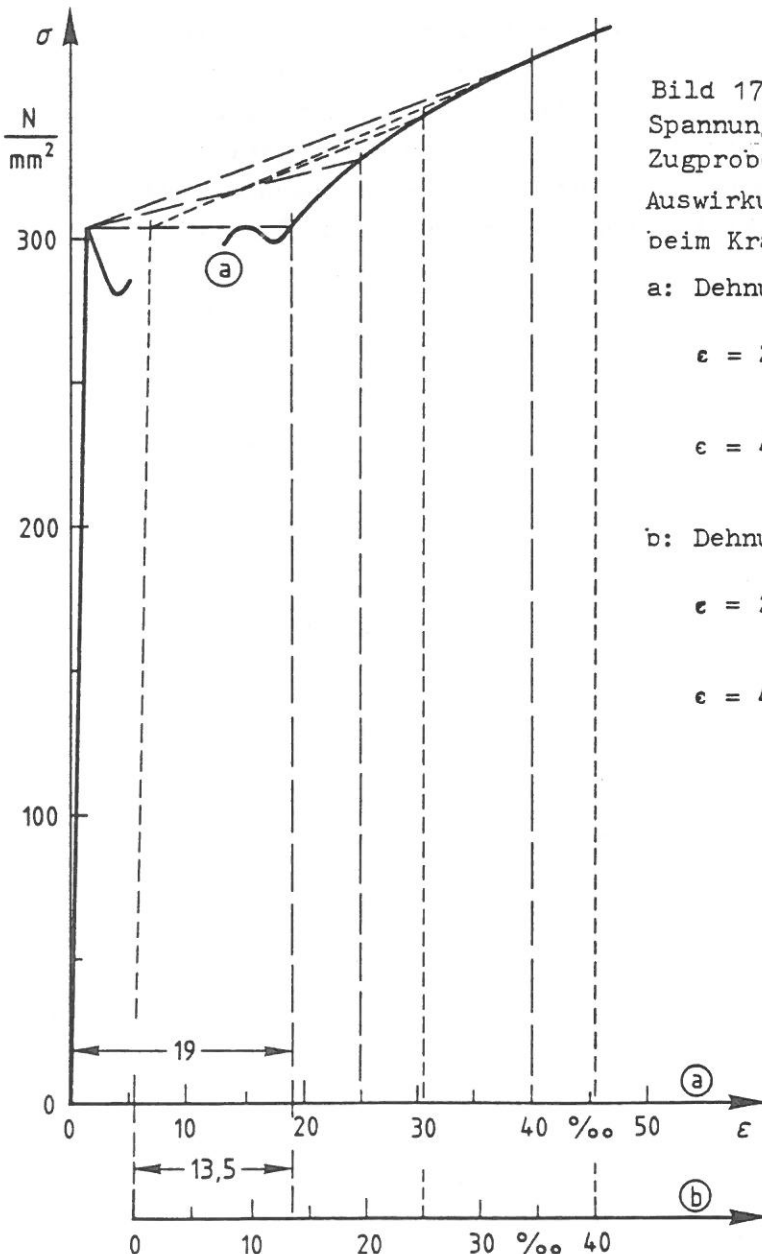


Bild 17

Spannungs-Dehnungsbeziehung an einer Zugprobe nach Norm.

Auswirkung der Fließbereichsverkleinerung beim Kragträger

a: Dehnungen an der genormten Zugprobe

$$\epsilon = 25 \text{ ‰}: T = \frac{327,5 - 304,0}{25,0 - 1,45} = 1,00 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{‰}}$$

$$\epsilon = 40 \text{ ‰}: T = \frac{362,0 - 304,0}{40,0 - 1,45} = 1,50 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{‰}}$$

b: Dehnungen am Kragträger

$$\epsilon = 25 \text{ ‰}: T = \frac{341,5 - 304,00}{25,0 - 1,45} = 1,59 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{‰}}$$

$$\epsilon = 40 \text{ ‰}: T = \frac{371,0 - 304,0}{40,0 - 1,45} = 1,74 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{‰}}$$

Aus der Spannungs-Dehnungslinie, ermittelt im Zugversuch nach Norm, erhält man als entsprechende Werte, s. Bild 17, E/T zwischen ca. 210 und 140. Der Unterschied des Verhaltens der Zugprobe zu dem Globalverhalten des realen Trägermaterials ist auch an dem Bereich der plastischen Verformung ohne Widerstandserhöhung erkennbar, der sich bei den Zugproben bis 19 ‰, bei dem Träger aber nur bis ca. 13,5 ‰ erstreckt, siehe DMS 7 auf Bild A2.

Berücksichtigt man diese Bereichsverkleinerung, erhält man entsprechend Bild 17

$$E/T = 210/1,59 = 132 \text{ für } \epsilon = 25 \text{ ‰}$$

oder

$$E/T = 210/1,74 = 121 \text{ für } \epsilon = 40 \text{ ‰}$$

also Zahlenwerte, die zwischen den im Versuch ermittelten Grenzen liegen.

Die hinsichtlich größerer Durchbiegungen bei gleicher maximaler Randdehnung günstige Verkleinerung des Bereiches plastischer Verformungen ohne Widerstandserhöhung darf im Rahmen von Beurteilungen, bei denen größere Verformungen mehr Sicherheit bedeuten, wie z. B. bei der Energieaufnahme bis zu einer vorgegebenen maximalen Randdehnung, nicht herangezogen werden. Die Festlegung von $E/T = 207$, wie sie im Abschn. 3.5 getroffen wurde, ist deshalb gerechtfertigt, wenn man ein Bauteil aus homogenem, eigenspannungsfreiem Stahl zugrundelegt und aus Sicherheitsgründen keine zu großen Durchbiegungen rechnerisch abschätzen darf.

Literatur

- /1/ Struck, W. und Limberger, E.:
DIN 4103 - Nichttragende Wände, Untersuchungen zur Festlegung des Anforderungsniveaus, statische und stoßartige Belastungen
Die Bautechnik 59 (1982) S. 367-376
- /2/ Eschenfelder, D.:
Zur Beanspruchung von Bauteilen, denen Sicherungsfunktionen gegen Absturz zugewiesen wird.
Mitteilungen Institut für Bautechnik 13 (1982) S. 82-83
- /3/ Struck, W. und Limberger, E.:
Die stoßartige Beanspruchung horizontaler Bauteile durch einen mit den Füßen aufprallenden Menschen
Die Bautechnik 58 (1981) S. 347-351
- /4/ Rühl, K.:
Die Tragfähigkeit metallischer Baukörper
Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1952
- /5/ Krisch, A.:
Plastische Verformungen bei Biegeversuchen an einem unlegierten Stahl
Materialprüfung 10 (1968) S. 187-190
- /6/ Dietmann, H.:
Berechnung der Fließkurven von Biegeträgern
Materialprüfung 9 (1967) S. 50-56
- /7/ Burth, K.:
Tragverhalten von Balken mit Rechteck-Hohlprofil bei verschiedenen Lasteinleitungen
Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 4 Nr. 36, Dez. 1977
- /8/ Lay, M.G.:
A new Approach to Inelastic Structural Design
Proc. Instu. Civ. Engrs. 34 (1966) S. 1-24
- /9/ Stahlbau Handbuch 1
Köln: Stahlbau Verlag 1982

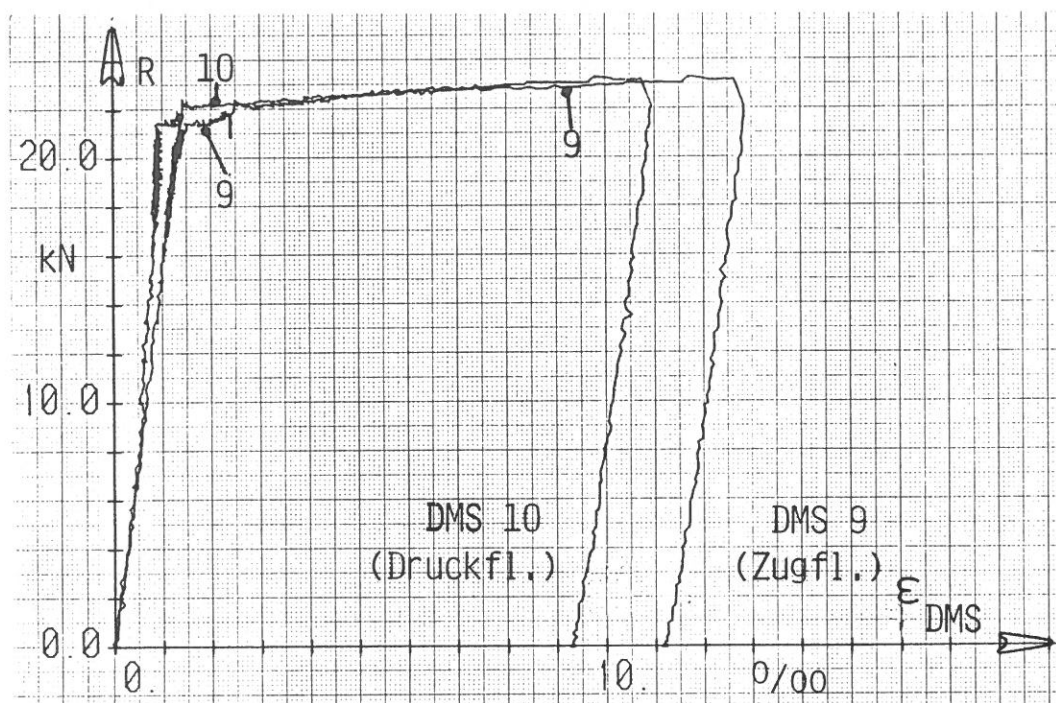


Bild A1
 Darstellung der mit Dehnungsmessstreifen ermittelten Ergebnisse als Kraft-Dehnungsdiagramm
 Querschnitt $x = 1,191 \text{ m}$

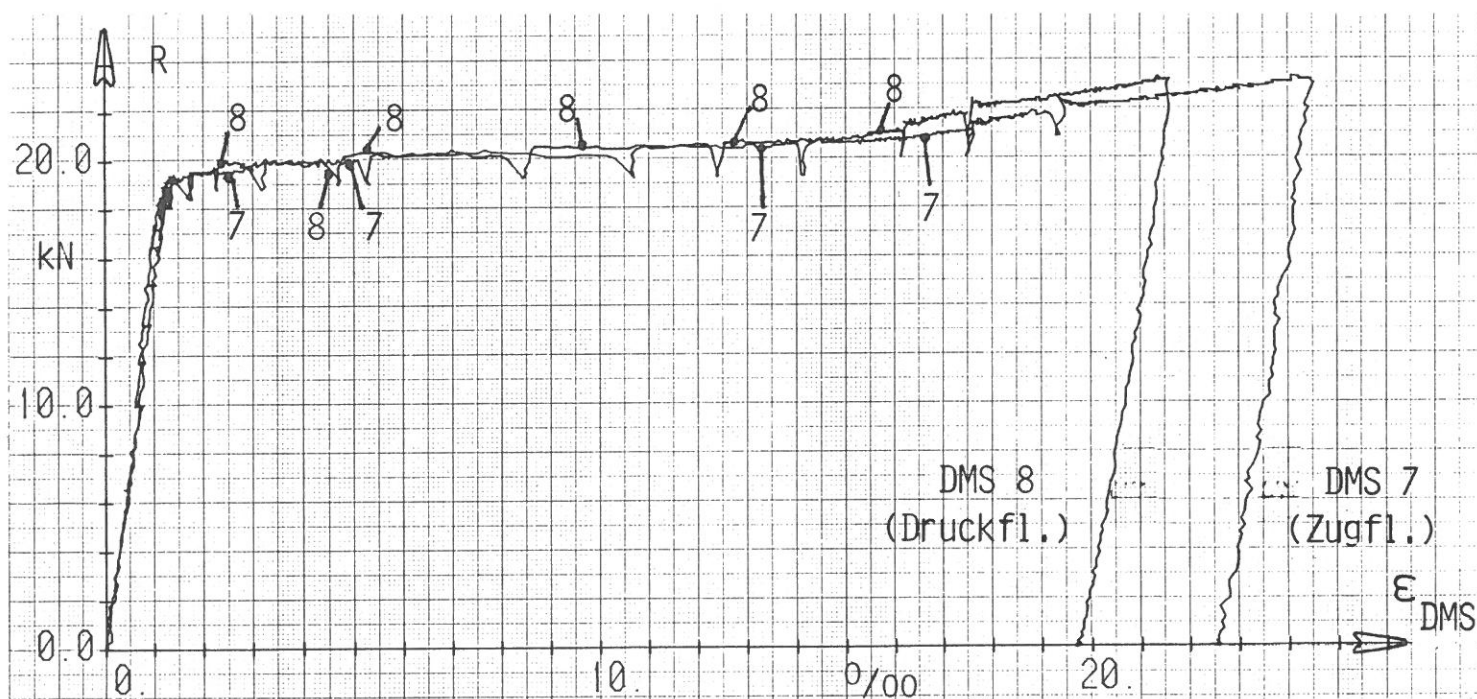


Bild A2
 Darstellung der mit Dehnungsmessstreifen ermittelten Ergebnisse als Kraft-Dehnungsdiagramm
 Querschnitt $x = 1,331 \text{ m}$

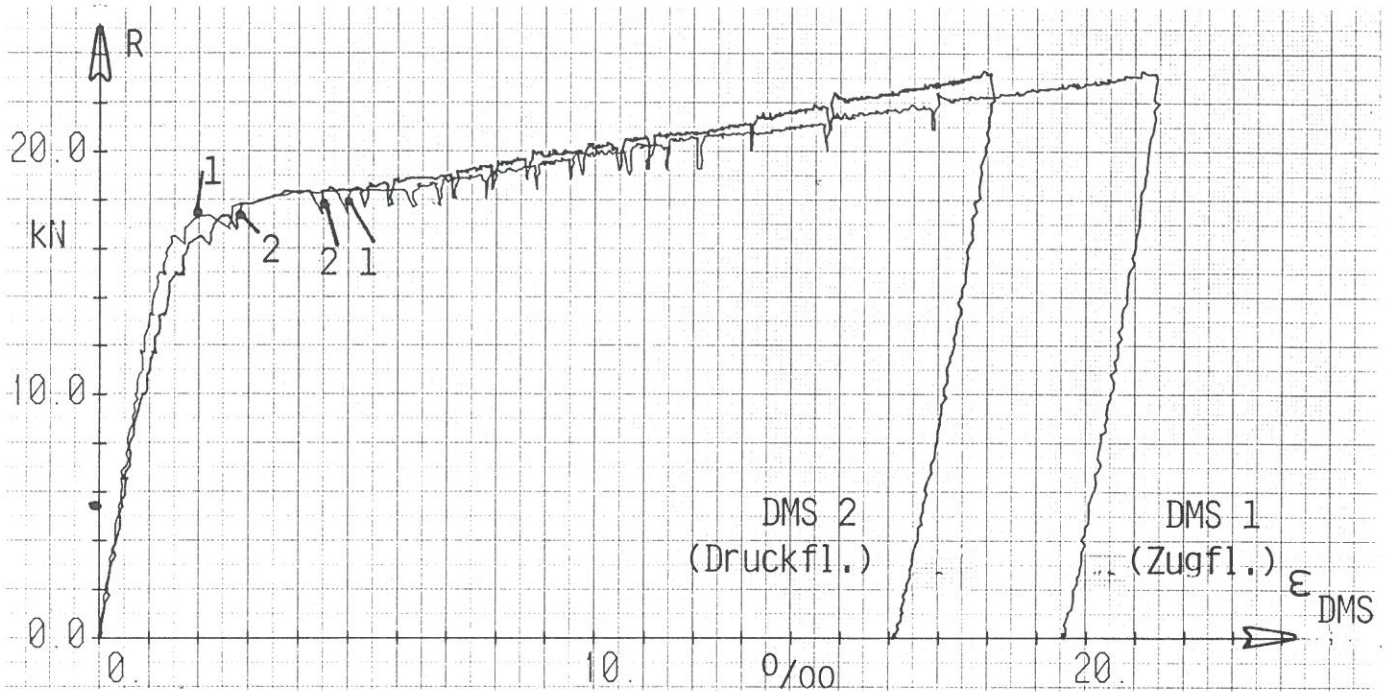


Bild A3

Darstellung der mit Dehnungsmessstreifen ermittelten Ergebnisse als Kraft-Dehnungsdiagramm

Querschnitt $x = 1,471$ m (Stegebene, s. Bild 12)

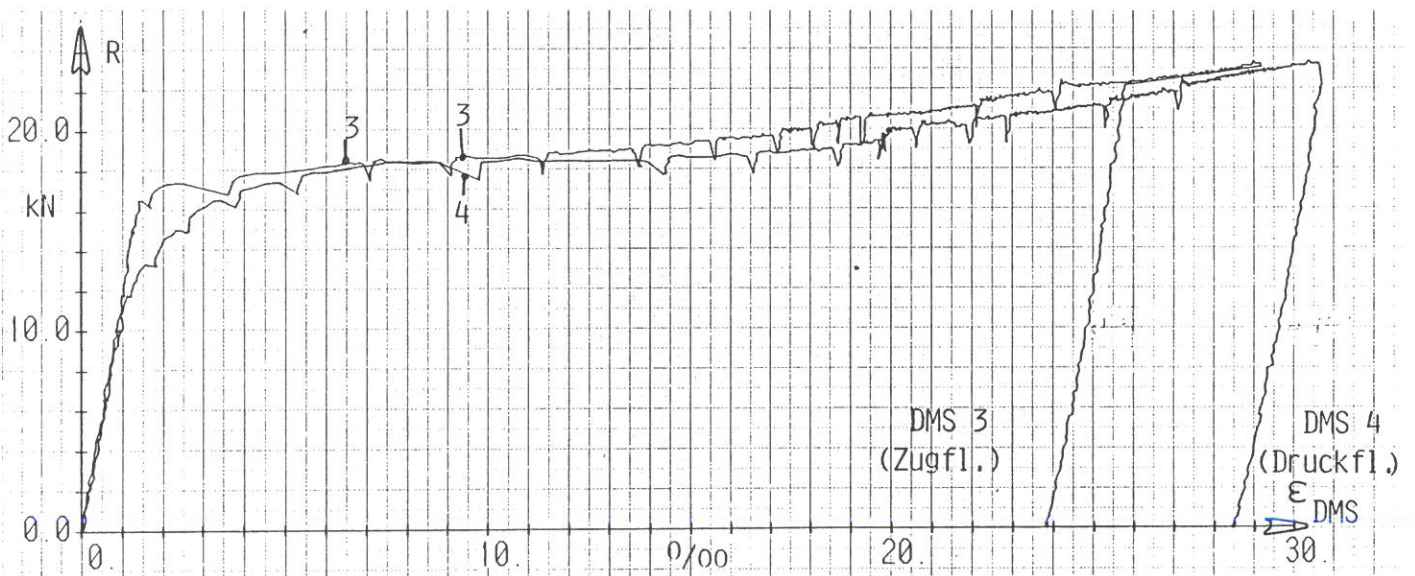


Bild A4

Darstellung der mit Dehnungsmessstreifen ermittelten Ergebnisse als Kraft-Dehnungsdiagramm

Querschnitt $x = 1,471$ m (Flanschränder, s. Bild 12)

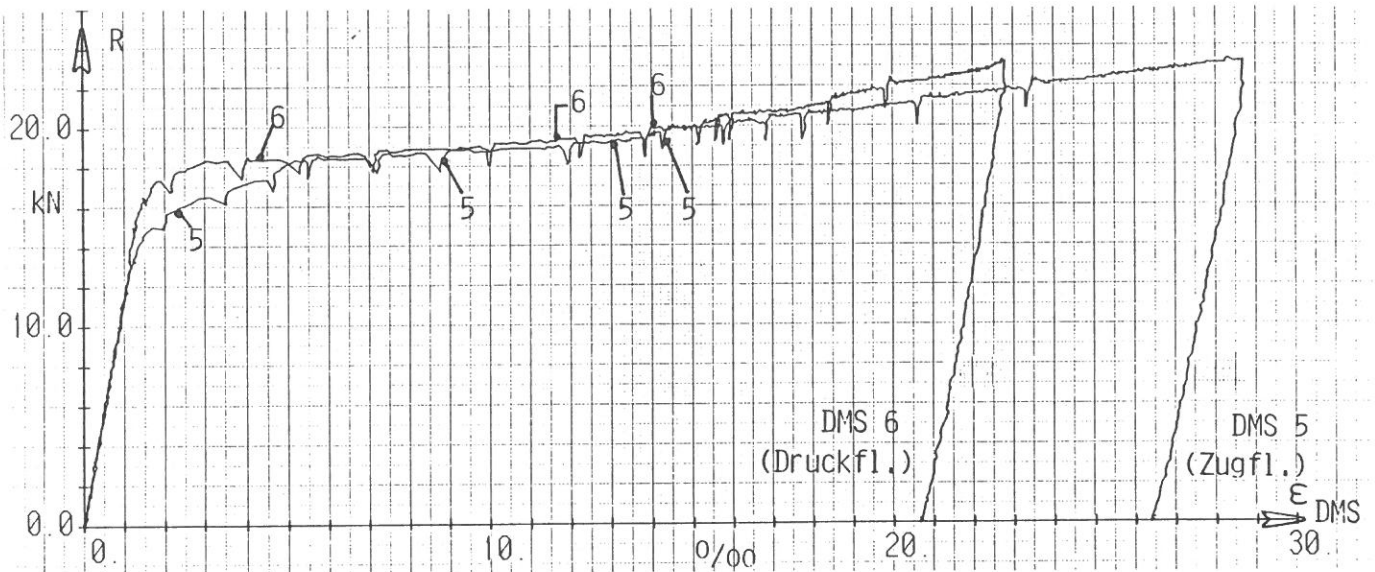


Bild A5

Darstellung der mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Ergebnisse als Kraft-Dehnungsdiagramm

Querschnitt $x = 1,741$ m (Flanschränder, s. Bild 12)

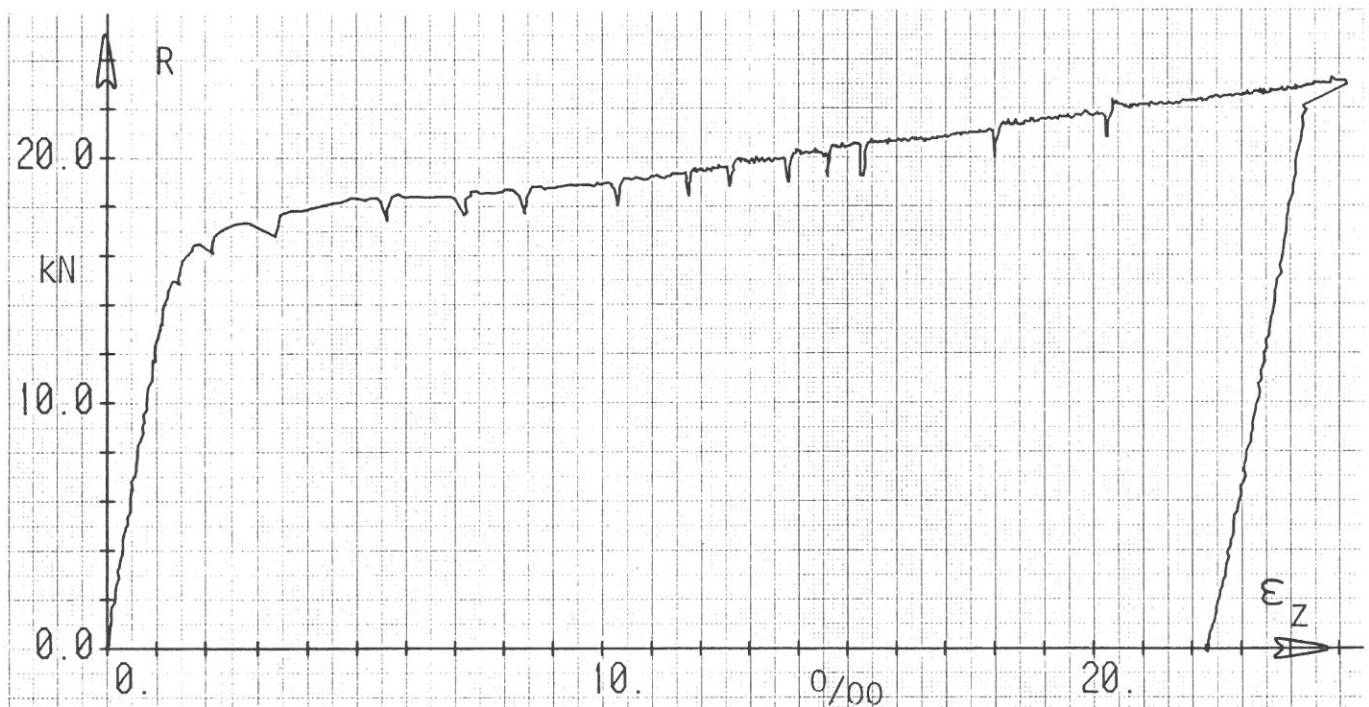


Bild A6

Darstellung der mit Dehnungsmeßstreifen ermittelten Ergebnisse als Kraft-Dehnungsdiagramm

Querschnitt $x = 1,471$ m,
 $\epsilon_z = \epsilon_1/2 + \epsilon_3/4 + \epsilon_5/4$ (Zugflansch, s. Bild 12)

Tabelle A7

Mit Setzdehnungsmesser (SDM) ermittelte Dehnungen ϵ_{SDM} auf den Flanschen des Trägers in der Stegebene in Abhängigkeit vom Weg f an der Einleitungsstelle der Kraft R

f (mm):	25,3	30,1	35,1	40,0	49,8	59,8	69,3	79,0	88,7	98,6	123	148	200
R (kN):	17,4	18,3	18,4	18,6	19,0	19,4	19,6	20,0	20,2	20,6	21,2	21,8	23,2
s ¹⁾ mm	ϵ_{SDM} in ‰ obere Zeile: Zugflansch untere Zeile: Druckflansch												
24	5,5 4	7 5,5	10 6,5	10 7	11 8	12 9	13 10	14 11,5	14,5 11,5	15,5 12	16 14	18,5 16	24 19
44	3,5 3	7,5 5	8,5 8,5	11 10	15 12,5	17 15	19 16,5	19,5 17,5	20,5 19	21,5 19,5	24 22,5	29,5 25	34 29
64	5 3	6 4	7 5,5	9,5 8	14 12	16 15	18 16,5	19,5 17,5	20,5 19	21,5 19	25,5 23	29,5 26	35 31
84	3 2,5	5,5 3	6 4	9,5 6	14 6	15,5 15	17 16,5	18,5 17,5	19,5 18,5	20,5 18,5	23 19,5	28,5 23,5	33 28
104	1 2	2,5 2	2,5 2	3,5 2,5	6,5 4,5	8,5 6,5	13,5 9	15,5 12	17 14	17,5 14	20,5 18	23,5 19,5	26 24
124	3 -	4,5 1,5	4 2	3,5 2	4,5 2,5	5,5 5	11 11,5	14 14,5	16,5 15	17,5 15	20 17	22 18,5	28 22
144	1 -	1,5 2	2,5 2,5	3,5 2,5	3 3	5,5 4,5	8,5 7,5	13,5 10,5	16,5 13,5	16,5 14,5	19 16	22 17	27 21
164	3 1	4 1,5	4 1	4,5 1	4,5 1,5	5 2,5	6,5 3,5	10,5 6	12 9	17 12,5	18,5 15,5	23,5 16,5	23 19
184							2 3,5	2,5 5	5 6,5	11 10	11 14,5	15 16	19 19
204										15 6,5	24 13,5	28 16	22 18
224										- 3,5	8,5 8,5	9 14	18 17
244										- 2,5	7,5 4,5	15,5 12	19 16
264										- 2,5	3,5 3,5	8 7,5	17 16
284										- 2	2,5 2,5	5,5 4	15 13
304										1,5 2	1,5 2	5 3	10 12
324												0,5 3,5	9 8
344												6,5 1,5	5 4
364												0 1,5	2 4
384												1 3	2 3
404												1,5 2	1 3
424												2 2,5	2 3
444												1 2	5 2

1) s = Abstand der Meßstelle von der Einspannstelle des Kragträgers

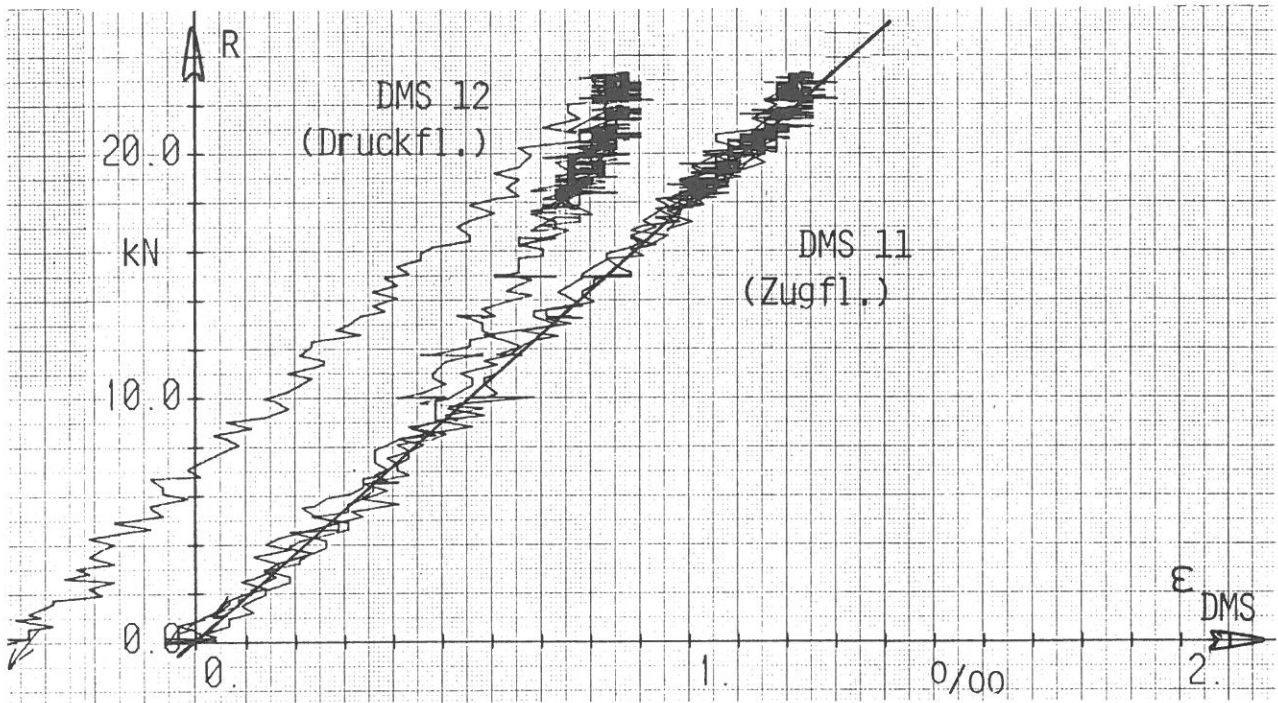


Bild A8

Mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte Dehnungen im elastischen Bereich

Querschnitt $x = 1,051 \text{ m}$, $R_{\text{elastisch}} = 17,9(\text{kN}/\text{‰}) \cdot \epsilon$

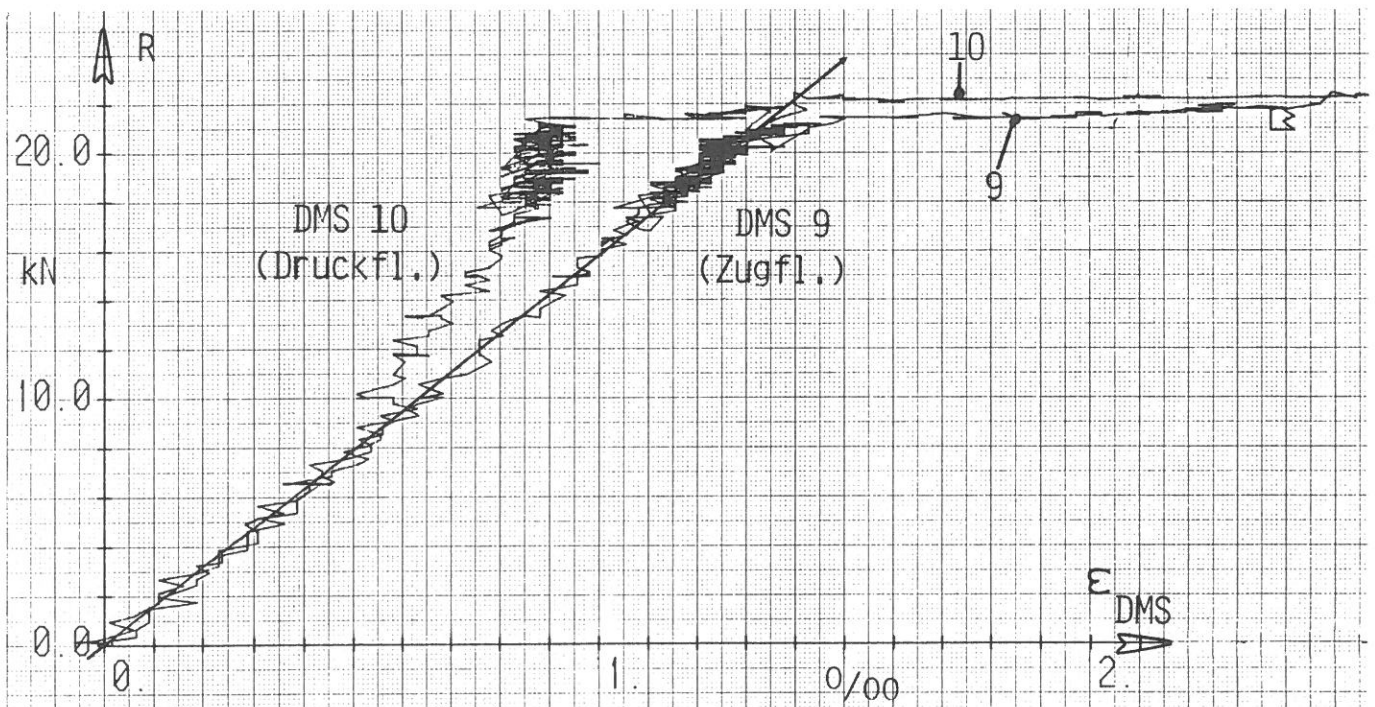


Bild A9

Mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte Dehnungen im elastischen Bereich

Querschnitt $x = 1,191 \text{ m}$, $R_{\text{elastisch}} = 15,8(\text{kN}/\text{‰}) \cdot \epsilon$

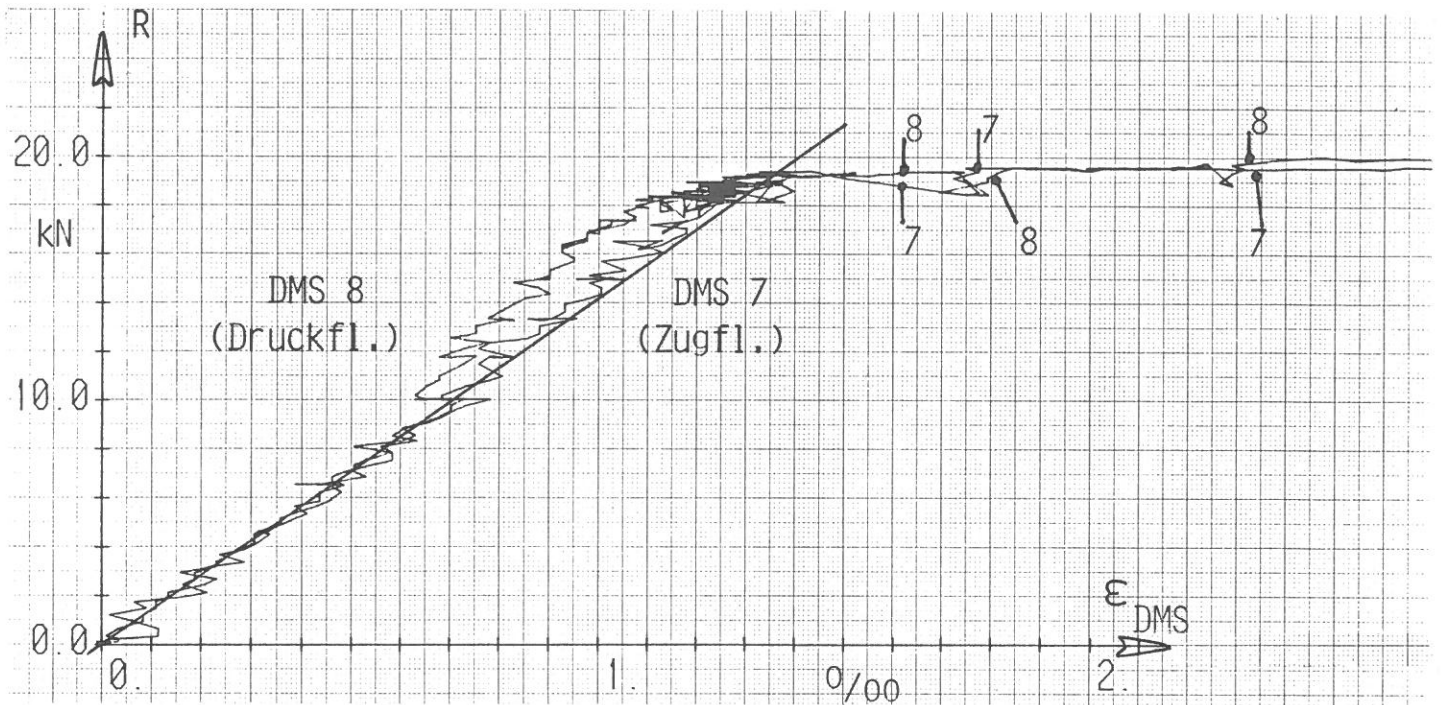


Bild A10

Mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte Dehnungen im elastischen Bereich

Querschnitt $x = 1,331 \text{ m}$, $R_{\text{elastisch}} = 14,2(\text{kN}/\text{‰}) \cdot \epsilon$

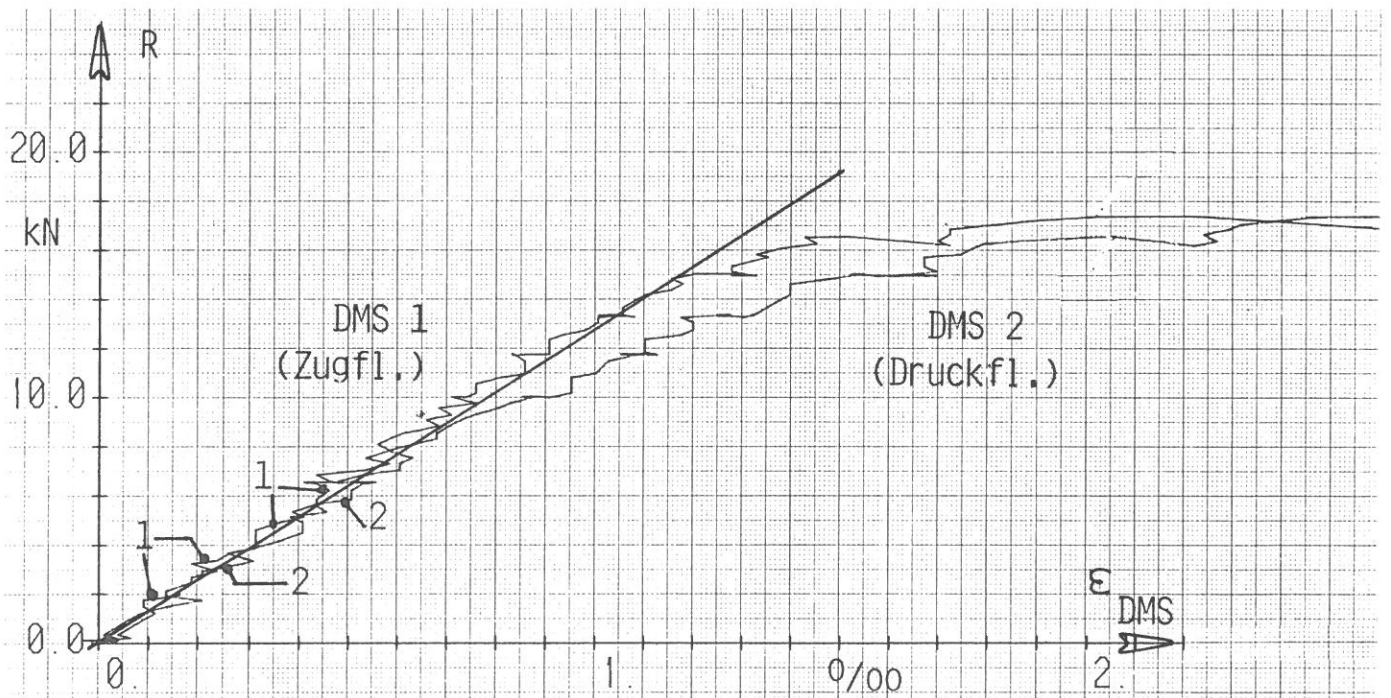


Bild A11

Mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte Dehnungen im elastischen Bereich

Querschnitt $x = 1,471 \text{ m}$, $R_{\text{elastisch}} = 12,8(\text{kN}/\text{‰}) \cdot \epsilon$

(Stegebene s. Bild 12)

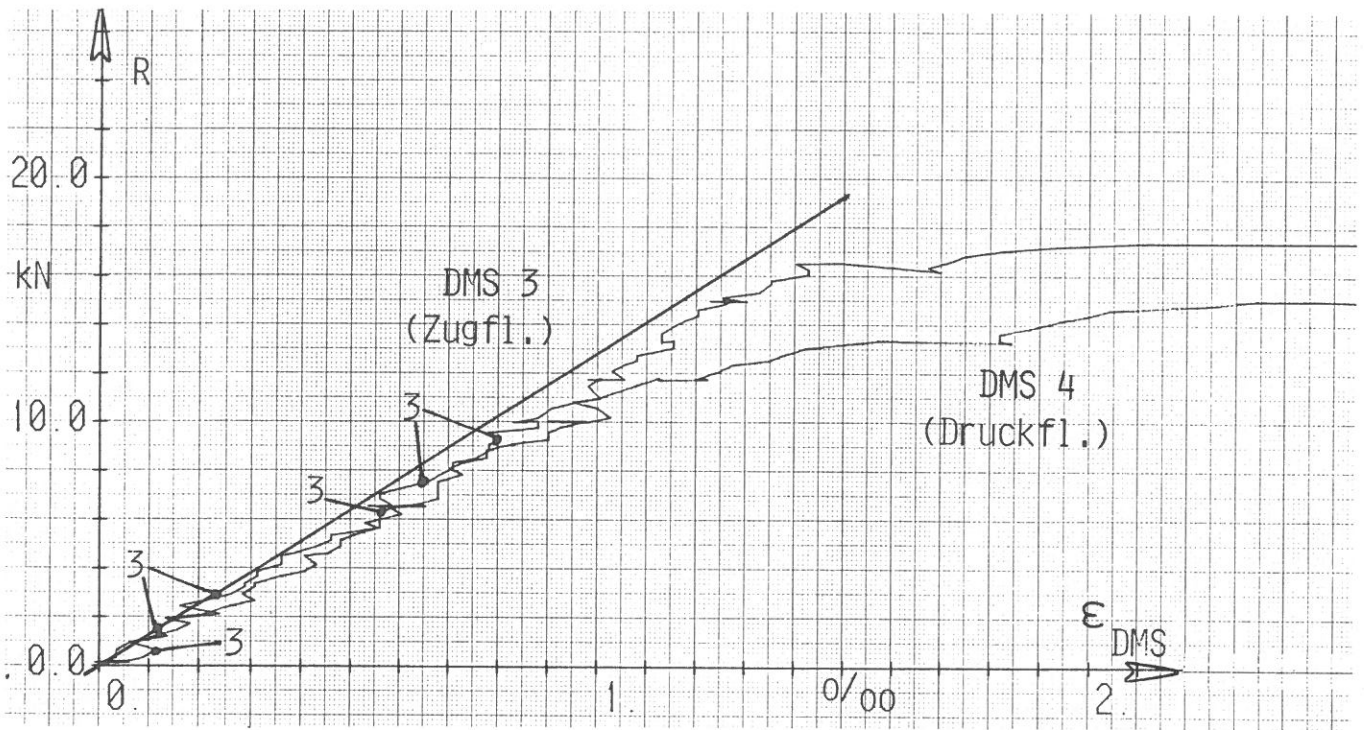


Bild A12

Mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte Dehnungen im elastischen Bereich

Querschnitt $x = 1,471 \text{ m}$, $R_{\text{elastisch}} = 12,8(\text{kN}/\text{‰}) \cdot \epsilon$
 (Flanschränder, s. Bild 12)

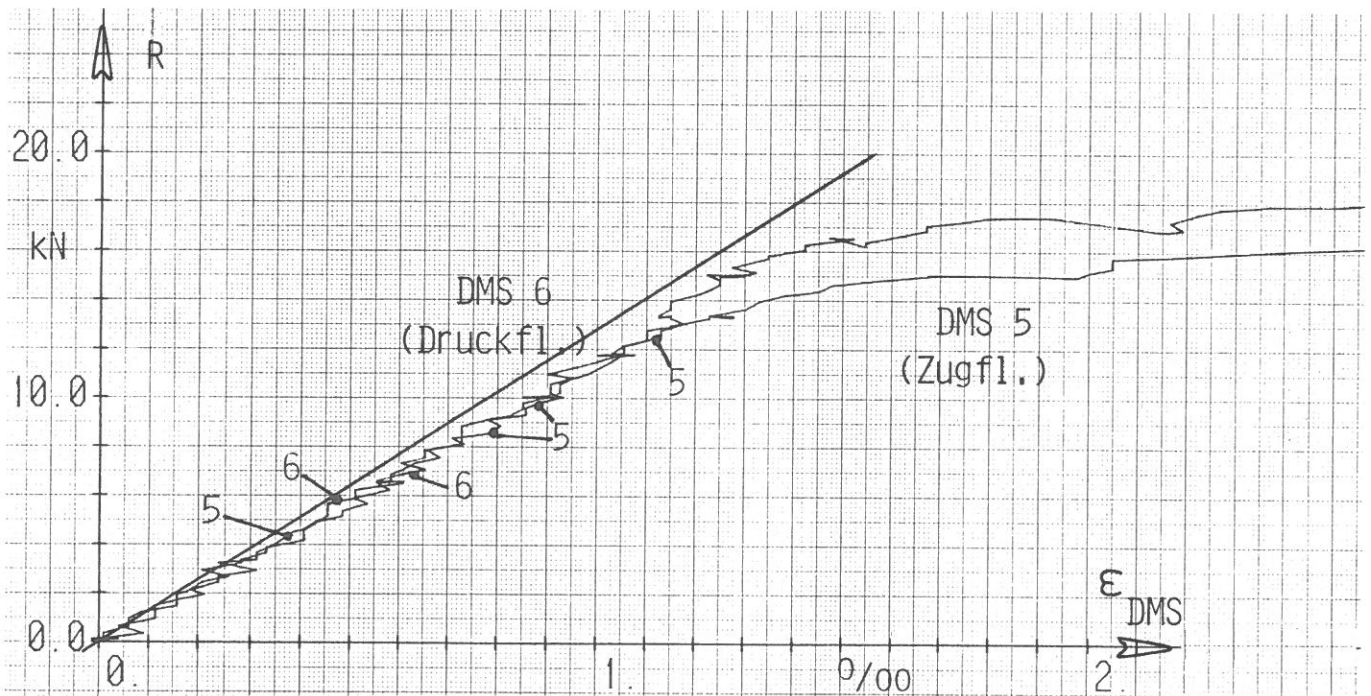


Bild A13

Mit Dehnungsmeßstreifen ermittelte Dehnungen im elastischen Bereich

Querschnitt $x = 1,471 \text{ m}$, $R_{\text{elastisch}} = 12,8(\text{kN}/\text{‰}) \cdot \epsilon$
 (Flanschränder, s. Bild 12)

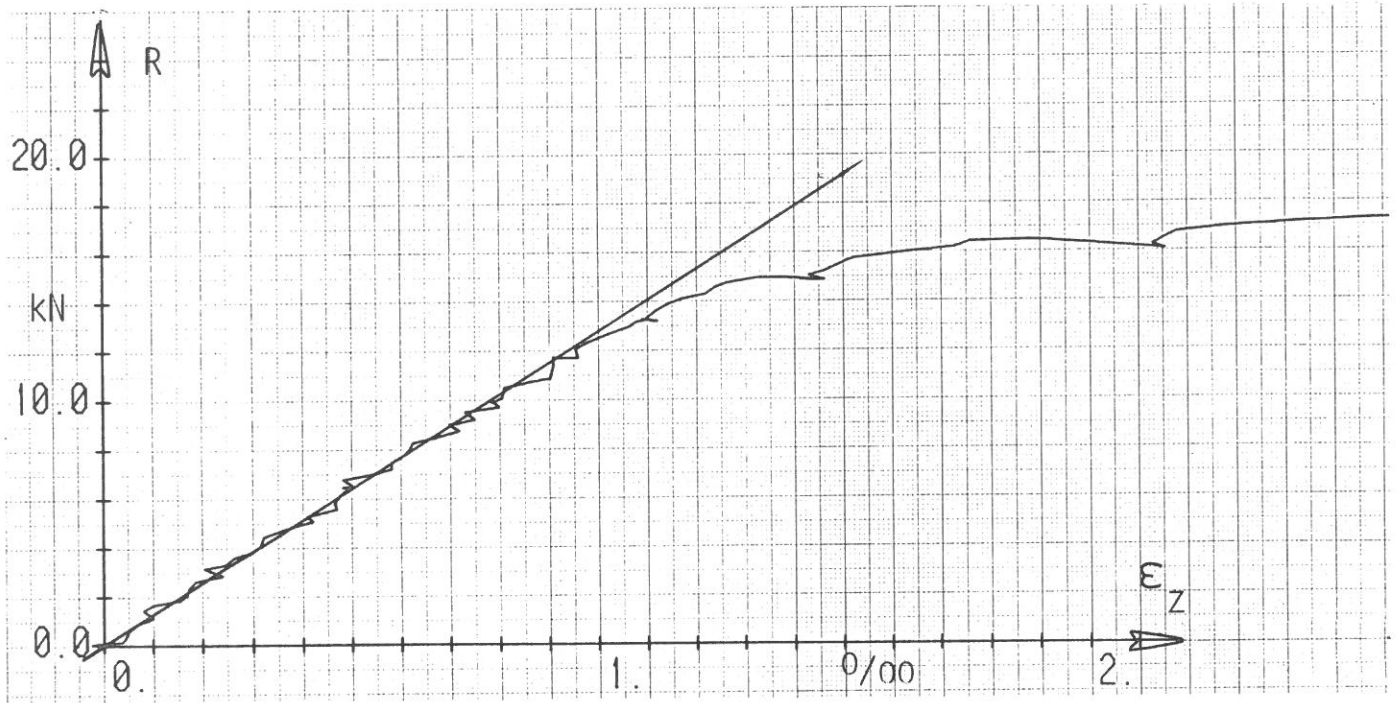


Bild A14

Vergleichsdehnung ϵ_z für die mit Dehnungsmeßstreifen erhaltenen Ergebnisse im elastischen Bereich

Querschnitt $x = 1,471 \text{ m}$, $R_{\text{elastisch}} = 12,8(\text{kN}/\text{‰}) \cdot \epsilon$

$\epsilon_z = \epsilon_1/2 + \epsilon_3/4 + \epsilon_5/4$ (Zugflansch, s. Bild 12)

f (mm): R (kN):	25,3	30,1	35,1	40,0	49,8	59,8	69,3	79,0	88,7	98,6	123	148	200	Meß- stelle Nr.														
	17,4	18,3	18,4	18,6	19,0	19,4	19,6	20,0	20,2	20,6	21,2	21,8	23,2															
s mm	ε in ‰														s. Bild 12													
	obere							untere																				
	SDM	DMS	SDM	DMS	SDM	DMS	SDM	DMS	SDM	DMS	SDM	DMS	SDM	DMS														
24	5,5	2,2	7	4,7	10	6,1	10	6,8	11	7,7	12	8,8	13	9,5	14	10,6	14,5	11,5	15,5	12,1	16	14,7	18,5	16,8	24	21,4		
	4	2,6	5,5	4,2	6,5	5,4	7	5,8	8	7,1	9	7,9	10	8,6	11,5	9,7	11,5	10,4	12	11,0	14	13,2	16	14,7	19	18,1		
164	3	1,2	4	1,3	4	1,3	4,5	1,3	5	1,4	6,5	2,9	10,5	5,1	12	10,3	17	14,0	18,5	17,6	23,5	19,2	23	24,5	24,5			
	1	1,1	1,5	1,2	1	1,3	1	1,4	1,5	1,4	2,5	1,8	3,5	2,2	6	4,3	9	8,1	12,5	12,2	15,5	16,2	16,5	17,5	19	21,6		
304																												
444																												
Vergleichsdehnung $\epsilon_z = \epsilon_1/2 + \epsilon_3/4 + \epsilon_5/4$ in ‰ (s. a. Bild 12)																												
24	2,9	5,5	6,9	8,2	10,2	11,7	12,5	13,7	14,6	15,3	18,0	20,2	25,2	Z														

Tabelle A15

Vergleich der mit Setzdehnungsmesser (SDM) oder Dehnungsmessstreifen (DMS) ermittelten Ergebnisse sowie Vergleichsdehnung ϵ_z für den Querschnitt $x = 1,471$ m entspr. Abschnitt 7.3.2

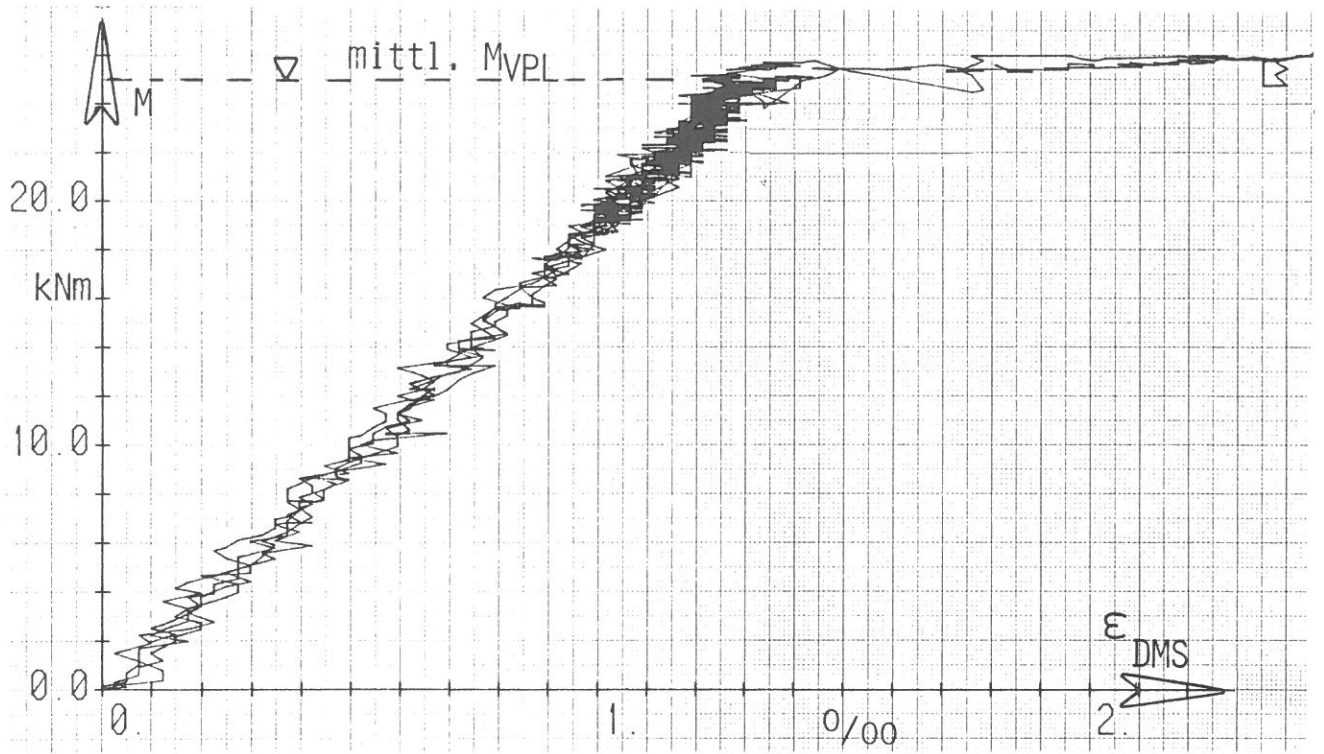


Bild A16

Momenten-Dehnungsbeziehung, mit Dehnungsmeßstreifen ermittelt an jeweils einem der Querschnitte $x = 1,331 \text{ m}$, $1,191 \text{ m}$ oder $1,051 \text{ m}$ (Ausschnittsvergrößerung von Bild 16)

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenstandsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972 (vergriffen)

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten

Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner

Nr. 49/Dezember 1977

Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54/Okttober 1978

Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/November 1978

Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 % Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/Januar 1979

Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie

Nr. 57/März 1979

Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

Nr. 58/März 1979

Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 59/Juli 1979

Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk

Nr. 60/August 1979

Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs

Nr. 61/Dezember 1979

Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter

Nr. 62/Dezember 1979

Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker

Nr. 63/Dezember 1979

Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig

Nr. 64/Februar 1980

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
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 65/Februar 1980

Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 66/Mai 1980

Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig

Nr. 67/Mai 1980

Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 68/Mai 1980

Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn

Nr. 69/Juni 1980

Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl

Nr. 70/August 1980 (vergriffen)

Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert

Nr. 71/August 1980

Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera

Nr. 72/September 1980

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 73/November 1980

Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfverfahren und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener

Nr. 74/November 1980

ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller

Nr. 75/November 1980

Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 76/November 1980

Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig

Nr. 77/April 1981

Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 78/September 1981

Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 79/Dezember 1981

Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltbrüchigkeit höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann

Nr. 80/Dezember 1981

Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch

Nr. 81/Dezember 1981

Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt

Nr. 82/April 1982

Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski

Nr. 83/Juli 1982

Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle

Nr. 84/Juli 1982

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Oktober 1982

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“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982

Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982

Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983

Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard

Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983

Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Konzeption für geregelte Versuche
Versuchseinrichtung

Vorversuche an Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983

Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983

Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983

Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983

Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong

Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983

Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer

Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983

Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler

Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983

Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselseitiger mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz

Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983

Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel

Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984

Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny

Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984

Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding

Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984

Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera

Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984

Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger

Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984

Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff

Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984

Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Förberg

Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Oktober 1984

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Oktober 1984

Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke

Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Oktober 1984

Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985

Zur Wirkung der Schrupfbehinderung auf den Schweißeigenspannungszustand und das Sprühdurchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar

Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985

Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp

Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985

Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler

Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985

Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützw

Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985

Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungsrißkorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)

Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985

Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit

Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985

Farbempfindungsmerkmal Elementaruntun und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter

Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Okttober 1985

Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner

Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Okttober 1985

Materials Technologies and Techno-Economic Development A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn

Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Okttober 1985

Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler

Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985

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
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986

Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht

Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986

Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986

Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
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 3-88 314-531-9/Juli 1986

Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch

Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986

Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas

Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986

Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Berhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst

Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986

Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/November 1986

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
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner

Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/November 1986

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
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner

Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/November 1986

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner

Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X /November 1986

Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 131/ISBN 3-88-314-585-8/November 1986

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
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter