

Ausarbeitung eines Berechnungs-
verfahrens für GFK - Profilplatten
auf Grund der Auswertung von
Traglastversuchen

T 2675

T 2675

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

KUNSTSTOFFPRÜFSTELLE FRANKEN

M. 17

Dipl. - Ing. Helmuth W. Franken Beratender Ingenieur BYIK, VBI
KUNSTSTOFFPRÜFUNG-BAUTEILPRÜFUNG-GUTACHTEN-BERATUNG-BAUSTATIK

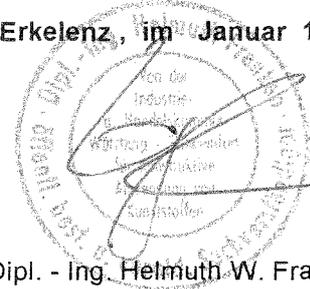
Auftrag - Nr.: F12/93

Forschungsbericht

**Ausarbeitung eines Berechnungsverfahrens
für GFK - Profilplatten
auf Grund der Auswertung von Traglastversuchen**

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Erkelenz, im Januar 1995



Dipl. - Ing. Helmuth W. Franken

Postfach 1202, 41802 Erkelenz
Gewerbestr. Süd 24, 41812 Erkelenz
Telefon: (02431) 73651 Fax: (02431) 73652
Kreissparkasse Heinsberg (BLZ 312 512 20) 700 492

Röckertstr. 19, 97271 Kleinrinderfeld
Telefon: (09366) 8312

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Bezeichnungen	II
1 Theorie zur Ermittlung der Tragfähigkeitswerte	1
1.1 Dehnungsbezogene Herleitung der wirksamen Breite	2
1.1.1 Kritische Stauchung	2
1.1.2 Wirksame Breite	8
1.1.2.1 Lösung ohne Imperfektionen	11
1.1.2.2 Berücksichtigung von Imperfektionen	12
1.2 Werkstoffverhalten	16
1.2.1 Kurzzeitiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten	19
1.2.1.1 Grenzdehnung	23
1.2.1.2 Bruchdehnung	23
1.2.2 Zeitabhängiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten	26
1.3 Ohne Querkraft aufnehmbares Biegemoment	35
1.3.1 Rechnungsschritte	37
1.3.2 Kurzzeitige Belastung	37
1.3.3 Konstante Dauerbelastung	38
2 Versuche	42
2.1 Werkstoffe der Bauteile	42
2.1.1 Baustoffkomponenten	42
2.1.1.1 Reaktionsharz (RH)	42
2.1.1.2 Verstärkungswerkstoffe	42
2.2 Statistische Auswertung	46
2.3 Werkstoffverhalten bei Zugbeanspruchung	46
2.3.1 Versuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit	47
2.3.2 Versuche mit Dauerlast	57
2.3.2.1 Linear viskoelastisches Verhalten	60
2.3.2.2 Zeitstanddehnverhalten	60
2.3.2.3 Zeitstandbruchverhalten	76
2.4 Traglastversuche	84
2.4.1 Beulmuster	84
2.4.2 Theoretische Querschnittswerte	99
2.4.3 Stufenförmige Laststeigerung bis Bruch	103
2.4.3.1 Dehnung an der Unterseite	103
2.4.3.2 Dehnung an der Oberseite	114
2.4.3.3 Durchbiegung in Feldmitte	114
2.4.4 Dauerlast	130
2.4.4.1 Zeitdurchbiegungsverhalten	130
2.4.4.2 Zeitstandbruchverhalten	131
3 Zusammenfassung	140
3.1 Wirksame Breite	140
3.2 Werkstoffverhalten	142
3.2.1 Grenzdehnung	143
3.2.2 Bruchdehnung	144
3.2.3 Zeitabhängiges Spannungs - Dehnungsverhalten	144
3.2.4 Rißfaktor	146
3.2.6 Wechselnde Lasten	148
3.3 Berechnung von Profilplatten	149
3.3.1 Rechnungsschritte	150
3.3.2 Ohne Querkraft aufnehmbares Biegemoment	151
3.3.3 Durchbiegung	153
3.4 Bemessung	154
3.5 Schadensakkumulation	154
Literaturnachweis	155

Bezeichnungen

a	: Werkstoffkoeffizient	e_{co}	: Schwerpunktabstand, Druckgurt Verformungsmodul über Querschnitt konstant
A	: Querschnittsfläche, Abminderungsfaktor	e_{cu}	: Schwerpunktabstand, Zuggurt Verformungsmodul über Querschnitt konstant
A_{Bi}	: Abminderungsfaktoren, Bruchversagen	e_o	: Schwerpunktabstand, Druckgurt
A_{Ii}	: Abminderungsfaktoren, Stabilitäts - oder Verformungsnachweis	e_u	: Schwerpunktabstand, Zuggurt
A_{wo}	: wirksame Querschnittsfläche im Druckgurt	e_{vo}	: Schwerpunktabstand, Druckgurt, Verformungsmodul über Querschnitt dehnungsabhängig
A_{ws}	: wirksame Querschnittsfläche im Steg	e_{vu}	: Schwerpunktabstand, Zuggurt Verformungsmodul über Querschnitt dehnungsabhängig
A_p	: Querschnittsfläche der Platte	E	: Elastizitätsmodul
A_1	: Abminderungsfaktor, Lastdauer	E_v	: Verformungsmodul
A_2	: Abminderungsfaktor, Umgebungseinfluß	E_{vB}	: Verformungsmodul bei Bruch
A_3	: Abminderungsfaktor, Temperatureinfluß	E_{vc}	: zeitabhängiger Verformungsmodul
b_{ef}	: wirksame Breite	E_{vt}	: Tangentenmodul
b_p	: Plattenbreite, Gurtbreite	E_{v0}	: Verformungsmodul, Tangente bei Dehnung 0
b_o	: Gurtbreite, oben	E_0	: Elastizitätsmodul
b_u	: Gurtbreite, unten	h	: Profilhöhe
b_v	: Prüfkörperbreite	f	: Durchbiegung
b_w	: wirksame Breite, Gurt	f_B	: Durchbiegung bei Bruch
B	: Biegesteifigkeit	f_{tB}	: zeitabhängige Durchbiegung bei Bruch
B_v	: Biegesteifigkeit	f_k	: Vergleichsdurchbiegung
C_i	: Abminderungs - oder Vergrößerungsfaktoren, Stabilitäts - oder Verformungsnachweis	f_l	: vertikale Verschiebung, Längsrichtung
C_k	: Zeitfaktor ab Bezugzeit t_k	f_q	: vertikale Verschiebung, Querrichtung
C_r	: rechnerischer Zeitfaktor ab Bezugszeit	f_r	: Reißfaktor
C_{rt}	: Rückkriechfaktor	f_R	: Bruchdehnungsfaktor
C_t	: Kriechfaktor	f_v	: Durchbiegung, Versuchswert
D	: Dehnsteifigkeit	F	: Last
D_v	: Dehnsteifigkeit	F_B	: Versagenslast, Bruchlast
		I	: Trägheitsmoment

I_A	: wirksames Trägheitsmoment am Auflager	M_{max}	: größtes Biegemoment
I_{cw}	: wirksames Trägheitsmoment Verformungsmodul über Querschnitt konstant	M_s	: Biegemoment
I_p	: Trägheitsmoment	n	: Werkstoffkoeffizient
I_{wvm}	: wirksames Trägheitsmoment, Verformungsmodul über Querschnitt, dehnungsabhängig	P	: Last
I_w	: wirksames Trägheitsmoment	P_{ki}	: kritische Last
I_{wmin}	: kleinstes wirksames Trägheitsmoment	P_s	: Last
k	: Beulwert	s_p	: Stegbreite
k_e	: Kernweite	s_{ef}	: wirksame Breite im Steg
k_s	: Beulwert	S_B	: globaler Sicherheitsfaktor, Festigkeitsnachweis
k_t	: Zeitexponent	S_I	: globaler Sicherheitsfaktor, Stabilitätsnachweis
k_ε	: Beulwert, dehnungsabhängig	S_ε	: globaler Sicherheitsfaktor, Dehnungsnachweis
k_σ	: Beulwert, spannungsabhängig	t	: Belastungszeit
K_i	: Abminderungsfaktoren, Bruchversagen	t_a	: Dicke, Zugprüfkörper
K_{vt}	: Zeit - Bruchfaktor	t_b	: Bemessungszeit
l_w	: wirksame Breite, Steg	t_B	: Belastungszeit bei Bruch
l_F	: Stützweite	t_k	: Bezugszeit
l_l	: Gurtlänge, - mitte	t_o	: Gurt Dicke, oben
l_q	: Gurtbreite	t_p	: Plattendicke
m_G	: Glasmasse je Flächeneinheit	t_r	: rechnerische Belastungszeit
M	: Biegemoment	t_{re}	: Entlastungszeit
M_B	: Bruchmoment	t_s	: Stegdicke
M_d	: ohne Querkraft aufnehmbares Moment	t_u	: Gurt Dicke, unten
M_{do}	: rechnerisches Bruchmoment, Elastizitätsmodul E_0	t_0	: Bezugszeit für Belastungsbeginn
M_{ds}	: rechnerisches Bruchmoment, Sekantenmodul bei Bruch	$t_{1,2}$: Bezugszeiten
M_{dt}	: zeitabhängig aufnehmbares	T_0	: Tangente bei Dehnung 0
M_F	: Biegemoment in Feldmitte	u	: Koordinate
M_{Fc}	: Biegemoment	u_T	: Länge der Beulwelle (Hochpunkt - Tiefpunkt)
		v	: Koordinate
		v_{cr}	: Verhältnis gemessene / gerechnete Zeitfaktoren
		v_E	: Verformungsmodulverhältnis
		V_G	: Glas - Volumenanteil
		V_ε	: Gesamtverformung

w	:	Ausbiegung	w_0	:	Vorverformung
W	:	Widerstandsmoment	x	:	Koordinate
W_p	:	Widerstandsmoment	y	:	Koordinate
W_w	:	wirksames Widerstandsmoment	z	:	Koordinate, Stützlänge

Griechische Bezeichnungen

β	:	Bruchspannung	ϵ_{ki}	:	"kritische Stauchung"
β_c	:	Zeitstand - Bruchspannung	ϵ_0	:	Dehnung, Druckgurtrand, Profiloberseite
$\beta_{c(t)}$:	rechnerische Zeitstandbruchlinie	ϵ_{0B}	:	Dehnung bei Bruch am Druckgurtrand
β_k	:	Bruchspannung, korrigierter Meßwert	ϵ_r	:	Rißanteil der Dehnung
β_s	:	Streckspannung	ϵ_{ru}	:	Dehnungen im gezogenen Gurt
β_t	:	Zeitstand - Bruchspannung	ϵ_R	:	Rissanteil der Bruchdehnung
β_v	:	Zeitstand - Bruchspannung, lineare Regression	ϵ_{tB}	:	zeitabhängige Bruchdehnung
ϵ	:	Dehnung	ϵ_u	:	Dehnung, Zuggurt, Profilunterseite
$\dot{\epsilon}$:	Verformungsgeschwindigkeit	ϵ_{uB}	:	Dehnung bei Bruch im Zuggurt
ϵ_b	:	Biegedehnung	ϵ_v	:	Dehnung, Versuchswert
ϵ_B	:	Bruchdehnung	ϵ_{vB}	:	Zeitstand - Bruchdehnung, lineare Regression
ϵ_{Bc}	:	zeitabhängige Bruchdehnung	ϵ_{vu}	:	Dehnung, Profilunterseite, Verformungsmodul über Querschnitt dehnungsabhängig
ϵ_c	:	zeitabhängige Dehnung	ϵ_0	:	theoretische Dehnung ohne Rißanteil
ϵ_d	:	Randstauchung	ϵ_{0B}	:	theoretische Dehnung bei Bruch ohne Rißanteil
ϵ_{db}	:	Bemessungsdehnung zum Zeitpunkt t_b	$\epsilon_{1,2}$:	Dehnungen bei Bezugszeiten $t_{1,2}$
ϵ_{d0}	:	Randdehnung zum Bezugszeitpunkt t_0	η	:	Funktion
ϵ_D	:	Stauchung	γ_f	:	Teilsicherheitsbeiwert, Einwirkungen
ϵ_G	:	Grenzdehnung	γ_m	:	Teilsicherheitsbeiwert, Baustoff
ϵ_i	:	Dehnung aus Abnahme der wirksamen Breite	γ_{sys}	:	Teilsicherheitsbeiwert, Modellbildung
ϵ_k	:	kritische Stauchung			
ϵ_{kb}	:	"Biegebeulstauchung"			

λ	:	Schlankheitsgrad	ρ_G	:	Dichte, Glas
λ_{er}	:	Ersatz - Schlankheitsgrad	ρ_{RH}	:	Dichte, Reaktionsharzmatrix
λ_{kb}	:	Beulbiege - Schlankheitsgrad	σ	:	Spannung
λ_p	:	Schlankheitsgrad	σ_c	:	Zeitstand - Spannung
$\bar{\lambda}_p$:	bezogener Schlankheitsgrad	σ_d	:	Randspannung
λ_{ser}	:	Ersatz - Schlankheitsgrad	σ_e	:	Spannung, Einzelwert
λ_v	:	Schlankheitsgrad	σ_k	:	Spannung, korrigierter Meßwert
λ_{vp}	:	Schlankheitsgrad	σ_{ki}	:	kritische Spannung
μ	:	Querkontraktionszahl	σ_t	:	Zeitstand - Spannung
φ_t	:	Kriechfaktor	σ_v	:	Spannung, Meßwert
ψ	:	Glas - Massenanteil	ϑ	:	Temperatur

Indizes

c	:	Kriechwert, Langzeitwert, konstant
d	:	Einzelwerte
i	:	Einzelwerte
j	:	Einzelwerte
k	:	Einzelwerte
m	:	Mittelwert
o	:	95 % - Quantile (Fraktile)
r	:	Einzelwerte, rechnerisch
s	:	Einzelwerte
t	:	Zeit
u	:	5 % - Quantile (Fraktile)
U	:	Umgebungseinfluß
v	:	Versuchswert
ϑ	:	Temperatureinfluß

1 Theorie zur Ermittlung der Tragfähigkeitswerte

Profilplatten aus Kunststoffen unterscheiden sich von solchen aus Metall (z. B. Stahl und Aluminium) in erster Linie in ihrem Werkstoffverhalten.

Bei Stahl ist unter üblichen, atmosphärischen Witterungsbedingungen eine lineare Abhängigkeit zwischen Spannung und Dehnung bis zur Streckgrenze gegeben, Einflüsse aus Lastdauer und Temperatur sind praktisch nicht vorhanden. Gegen Korrosion werden Stahlteile mit der Gefährdung angepaßten Maßnahmen geschützt.

Aluminium zeigt kein lineares Verhalten, es sind auch Kriecheinflüsse aus der Lastdauer vorhanden. Indem man Ersatzstreckgrenzen definiert und das Kriechverhalten durch Faktoren erfaßt, werden Werkstoffkennwerte festgelegt, mit denen Bauteile unter Annahme eines dem Stahl analogen Verhaltens berechnet werden können.

Das Spannungs - Dehnungs - Verhalten von Kunststoffen ist nicht im gesamten Bereich linear und wird durch Lastdauer, Temperatur sowie Witterung beeinflusst. Bei faserverstärkten Kunststoffen kann auch keine Isotropie der Eigenschaften mehr vorausgesetzt werden. Die nachstehenden Untersuchungen befassen sich mit Profilplatten aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyesterharzen (GF - UP) . Besteht die Verstärkung aus geschnittenen Fasern ohne bevorzugte Richtung, kann der Werkstoff als in der Ebene isotrop angesehen werden.

Die Dimensionierung dünnwandiger Profilplatten ist dadurch gekennzeichnet, daß ein "überkritisches" Tragverhalten zugelassen wird, bei dem die gedrückten Querschnittsteile ausgebeult sind. Für entsprechende Bauteile aus Stahl wurde durch theoretische und experimentelle Untersuchungen ein umfangreiches Regelwerk aufgestellt. Darauf aufbauend wird nachstehend ein Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung der kunststoff - spezifischen Eigenschaften vorgeschlagen und durch Traglastversuche an einem Trapezprofil kontrolliert.

Da bei üblichen Witterungsbedingungen, entsprechende Auswahl der Reaktionsharze vorausgesetzt, der Einfluß der Temperatur vernachlässigt werden kann und gleichwertige Schutzmaßnahmen gegen Witterungseinflüsse wie bei Stahl ("Korrosionsschutz") möglich sind, wird nur das zeitabhängige Spannungs - Dehnungs - Verhalten für konstante Lasten berücksichtigt.

1.1 Dehnungsbezogene Herleitung der wirksamen Breite

Das Beulverhalten der gedrückten Querschnittsteile ist maßgeblich für die Tragfähigkeit. Bei ausgebeulten Teilflächen entsteht im sogenannten Nachbeulbereich ein nichtlinearer Verlauf der Druckstauchungen, die durch die angreifende linear verteilte Last erzeugt werden (Bilder 1 und 2). Die Druckstauchung erreicht ihren Höchstwert an den Längsrändern.

Von *Menges* u. a. wurde eine dehnungsbezogene Vorgehensweise vorgeschlagen, um das instabile Ausweichen von Kunststoffbauteilen zu beurteilen.

1.1.1 Kritische Stauchung

Die klassischen Lösungen der linearen Beultheorie können dargestellt werden in der Form

$$\varepsilon_{ki} = \frac{\pi^2}{\lambda_v^2} \quad \{1\}$$

Bei Erreichen der "kritischen Stauchung" ε_{ki} setzt instabiles Ausweichen eines Bauteils ein. Diese kritische Stauchung ist nur abhängig von der Geometrie und Einspannung des Bauteils sowie der Art der Krafteinleitung. Sie ist unabhängig vom Werkstoff, vorausgesetzt er ist isotrop oder quasiisotrop [1 bis 6].

Im Schlankheitsgrad λ_v sind alle geometrischen Größen und Einspannbedingungen zusammengefaßt. Für die Reckplatte ist [7]

$$\lambda_v = \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k_\varepsilon}} \cdot \frac{b_p}{t_p} \quad \{2\}$$

Mit der Querkontraktionszahl μ wird der Steifigkeitszuwachs aus der behinderten Querverformung erfaßt, der Beulwert k_ε ist abhängig von den Einspann- und Lagerbedingungen sowie vom Dehnungsverlauf über der Plattenbreite b_p , das Verhältnis der Plattenbreite zur Plattendicke b_p/t_p hat die Bedeutung eines Schlankheitsmaßes der Platte.

Das Verformungsverhalten in der Mitte eines Plattenstreifens mit der Vorverformung w_0 , der an den Längsrändern nicht gehalten ist, entspricht dem Verhalten eines Knickstabes nach Eulerfall II (Bild 2)

Die Gesamtverformung

$$V_\varepsilon = \int_0^{t_p} |\varepsilon| dz \quad \{3\}$$

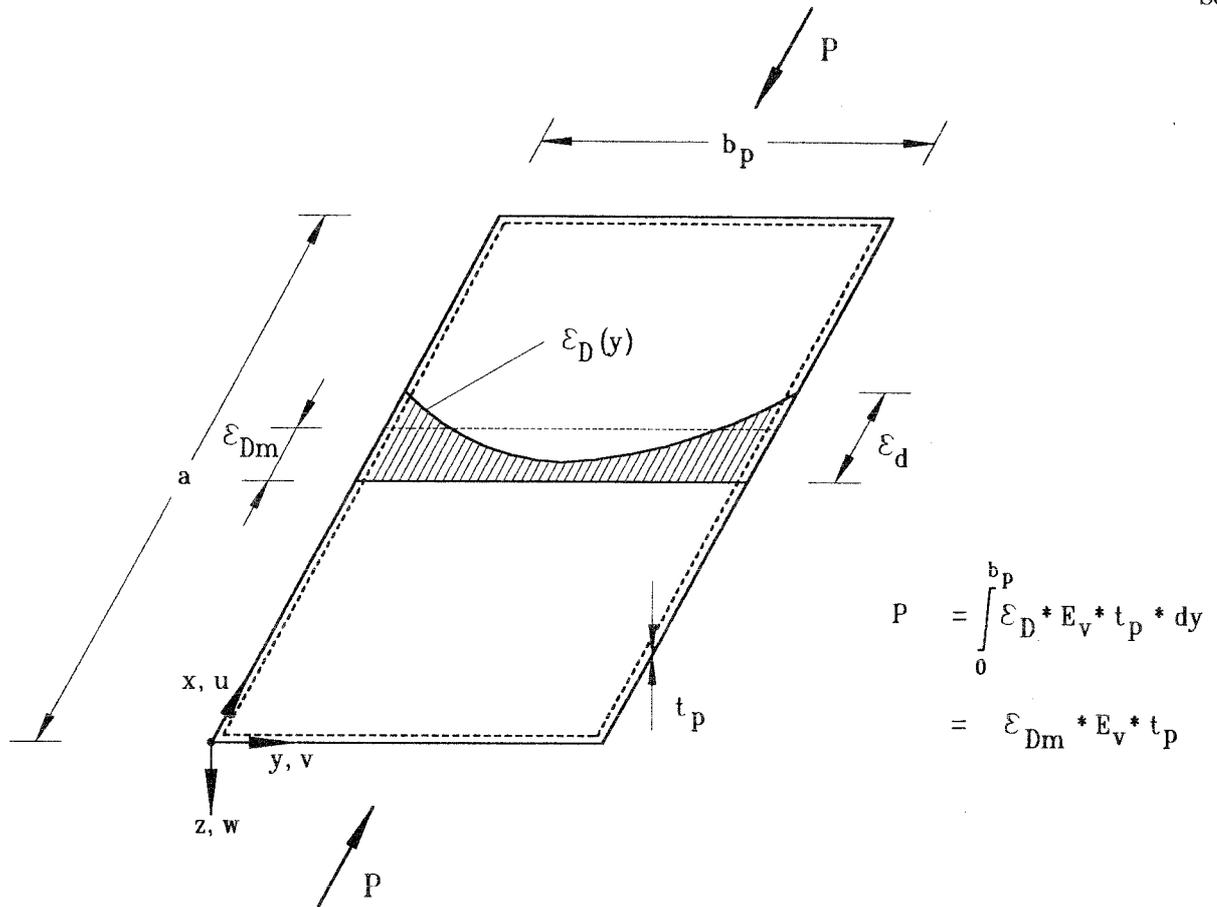


Bild 1.1 : Verteilung der Druckstauchung

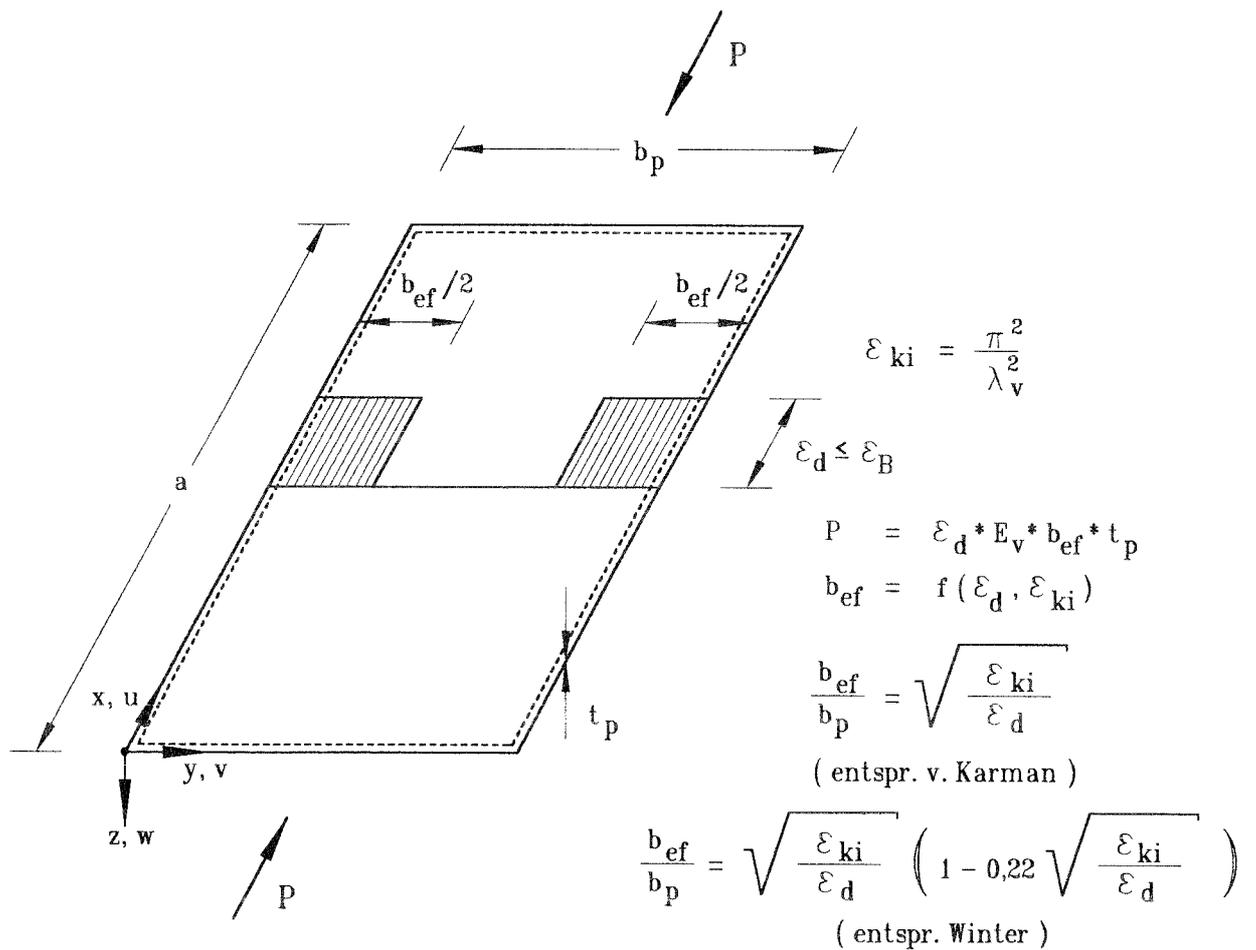


Bild 1.2 : Berechnungsmodell der wirksamen Breite

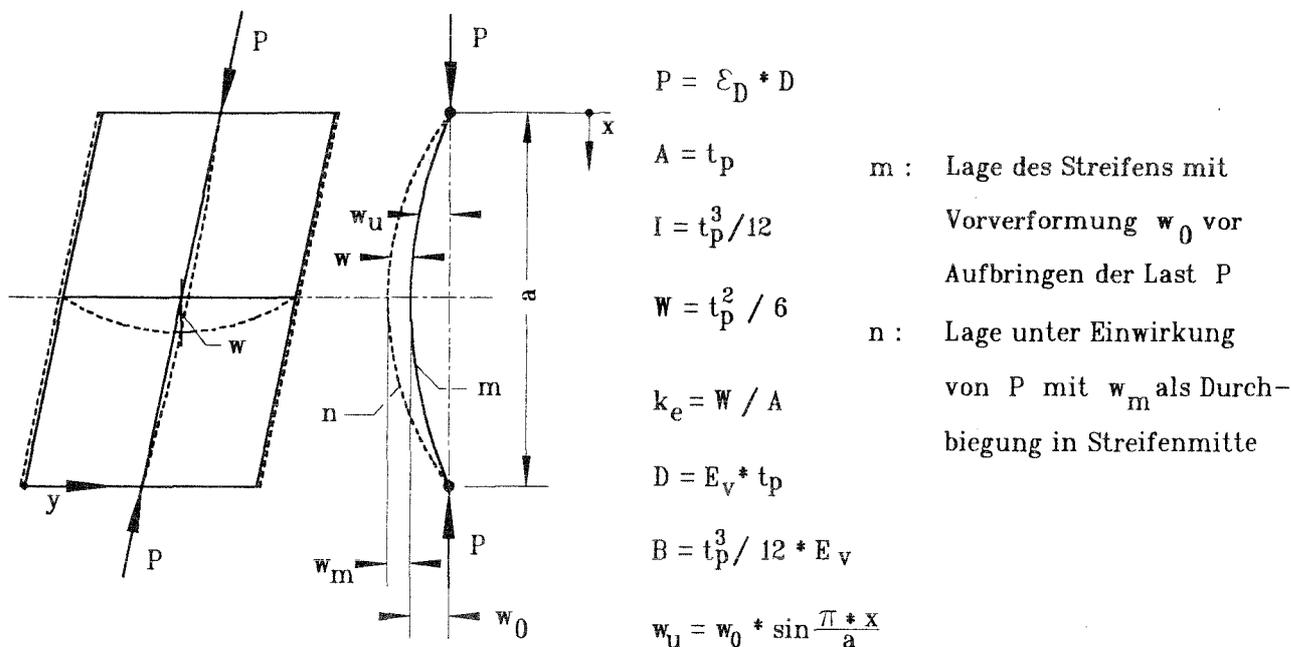


Bild 2.1 : Schema des gelenkig gelagerten vorverformten Plattenstreifens der Breite dy

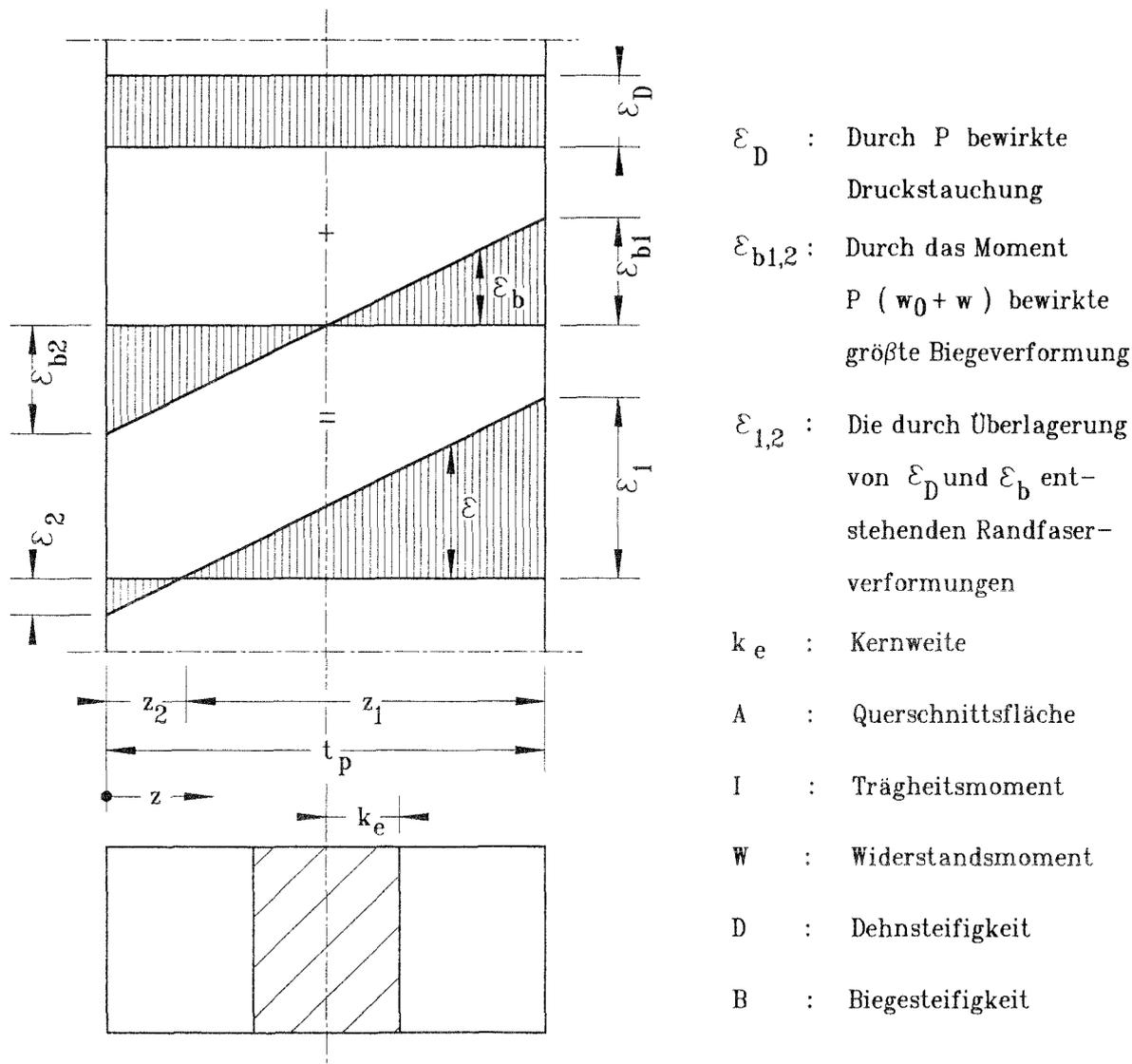


Bild 2.2 : Dehnungsverlauf über dem Streifenquerschnitt

ist das Ergebnis der Formänderungsarbeit, die von der außen angreifenden Kraft geleistet wird. Die folgende Ableitung behält die Voraussetzungen der klassischen Stabilitätstheorie bis auf die volle Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes bei. Es wird nicht mehr vorausgesetzt, daß die Dehnsteifigkeit des Werkstoffs für alle Verformungszustände gleich ist, sondern nur noch, daß die Dehnsteifigkeit für alle Querschnittsteile beim jeweils erreichten Verformungszustand gleich ist.

Die Achse des unbelasteten Plattenstreifens soll der Form einer Sinushalbwellen entsprechen.

$$w_u = w_0 \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \quad \{4\}$$

Die außen angreifende Kraft entspricht dem Produkt aus der erzeugten Druckstauchung ε_D und der Dehnsteifigkeit D_V

$$P_s = \varepsilon_D \cdot D_V \quad \{5.1\}$$

Die Differentialgleichung für das Moment lautet mit der Biegesteifigkeit B_V

$$M_s = -B_V \cdot w'' \quad \{5.2\}$$

Da das Biegemoment des verformten Streifens

$$M_s = \varepsilon_D \cdot D_V \left(w_0 \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} + w \right) \quad \{6\}$$

ist, gilt

$$B_V \cdot w'' + \varepsilon_D \cdot D_V \left(w_0 \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{a} + w \right) = 0 \quad \{7\}$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung (vergleiche *Pflüger* [8]) lautet

$$w = \frac{w_0}{\frac{\pi^2 \cdot B_V}{\varepsilon_D \cdot D_V \cdot a^2} - 1} \sin \frac{\pi \cdot x}{a} \quad \{8\}$$

Die größte Ausbiegung in Streifenmitte erhält man für $x = a/2$ und

$$\lambda^2 = \frac{D_V \cdot a^2}{B_V} \quad \{9\}$$

$$w_m = \frac{w_0}{\frac{\pi^2}{\varepsilon_D \cdot \lambda^2} - 1} \quad \{10\}$$

Wenn die Dehnsteifigkeit aller Querschnittsteile gleich ist, wird die Dehnsteifigkeit mit dem jeweils geltenden Verformungsmodul E_v für die Streifenbreite dy

$$D_v = E_v \cdot t_p \quad \{11.1\}$$

und die Biegesteifigkeit mit dem Trägheitsmoment $I_p = \frac{t_p^3}{12}$

$$B_v = E_v \cdot \frac{t_p^3}{12} \quad \{11.2\}$$

Mit der Kernweite, dem Verhältnis von Widerstandsmoment W_p zur Querschnittsfläche,

$$k_e = W_p / t_p = t_p / 6$$

erhält man für die durch das Moment ausgelöste größte Biegestauchung bzw. -dehnung mit {5.1} und {6}

$$\varepsilon_b = \varepsilon_D \frac{w_0 + w_m}{k_e} \quad \{12\}$$

Da die Dehnungsverläufe linear sind, kann direkt geschlossen werden, daß die auf den Querschnitt bezogene Gesamtverformung

$$\varepsilon_m = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} |\varepsilon| dz \quad \{13\}$$

proportional der Druckstauchung ist, solange die Biegeverformung nicht darüber anwächst. Für diesen Grenzwert $\varepsilon_b \leq \varepsilon_D$ folgt aus {12}

$$w_m + w_0 \leq k_e \quad \{14\}$$

Die Kernweite begrenzt den Querschnittsteil, durch den eine Längskraft angreifen muß, um nur Dehnungen mit gleichen Vorzeichen zu erzeugen. Mit {10} und {12} gilt für

$$0 \leq \varepsilon_D \leq \frac{\pi^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{w_0}{k_e} \right) \quad \{15.1\}$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_D \quad \{15.2\}$$

Werden die Biegeverformungen größer als die Druckstauchungen, also für

$$\varepsilon_D \geq \frac{\pi^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{w_0}{k_e} \right) \quad \{15.3\}$$

erhält man für die mittlere Gesamtverformung

$$\varepsilon_m = \frac{1}{2} \varepsilon_D \left(\frac{1 - \varepsilon_D \cdot \lambda^2 / \pi^2}{w_0 / k_e} + \frac{w_0 / k_e}{1 - \varepsilon_D \cdot \lambda^2 / \pi^2} \right) \quad \{15.4\}$$

Zur vereinfachten Darstellung und da die vorstehenden Gleichungen {15.1} bis {15.4} werkstoffunabhängig sind, bietet sich an, sie auf den Wert π^2 / λ^2 zu beziehen.

Mit dem Grenzwert von {15.1}

$$\varepsilon_k = \lim_{w_0 \rightarrow 0} \frac{\pi^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{w_0}{k_e} \right) = \frac{\pi^2}{\lambda^2} \quad \{16\}$$

folgt für

$$\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_k} \leq 1 - \frac{w_0}{k_e} \quad \{17.1\}$$

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_k} = \frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_k} \quad \{17.2\}$$

und für

$$\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_k} > 1 - \frac{w_0}{k_e} \quad \{17.3\}$$

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_k} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_k} \left(\frac{1 - \varepsilon_D / \varepsilon_k}{w_0 / k_e} + \frac{w_0 / k_e}{1 - \varepsilon_D / \varepsilon_k} \right) \quad \{17.4\}$$

In Bild 3 ist für verschiedene Verhältnisse der Vorverformung zur Kernweite der Zusammenhang dargestellt. Bis zum Erreichen des Grenzwertes nach {17.1} verhält sich die Gesamtverformung proportional zur Druckstauchung, danach steigt sie progressiv an und nähert sich asymptotisch dem Wert $\varepsilon_D / \varepsilon_K = 1$. Da die äußere Last proportional der Druckstauchung ist und Vorverformungen im ausgeführten Bauteil nicht völlig vermeidbar sind, wird deutlich, daß spätestens bei Erreichen des Grenzwertes nach {16} der Plattenstreifen sich der weiteren Kraftaufnahme durch progressive Verformung entzieht. Dieser ideale Wert

$$\varepsilon_{ki} = \frac{\pi^2}{\lambda^2} \quad \{18\}$$

ist beim realen Bauteil nicht zu erreichen. Die progressive Verformungszunahme beginnt, wenn die Wirkungslinie der angreifenden Kraft aus dem Kern des Querschnitts herauswandert. Die dieser Kraft über die Dehnsteifigkeit D_V proportionale Druckstauchung ε_D ist dabei umso größer, je kleiner die Vorverformung ist.

An vorverformten Stäben aus GF - UP mit exzentrischem Lastangriff wurde dieser Zusammenhang in Kurzzeit- und Langzeitversuchen (konstante und in Abständen gesteigerte statische Last) nachgewiesen.

Mit {11.1} und {11.2} und mit $k_s = 1/a_s^2$ wird aus {9}

$$\lambda = \sqrt{\frac{12}{k_s}} \cdot \frac{1}{t_P} \quad \{9.1\}$$

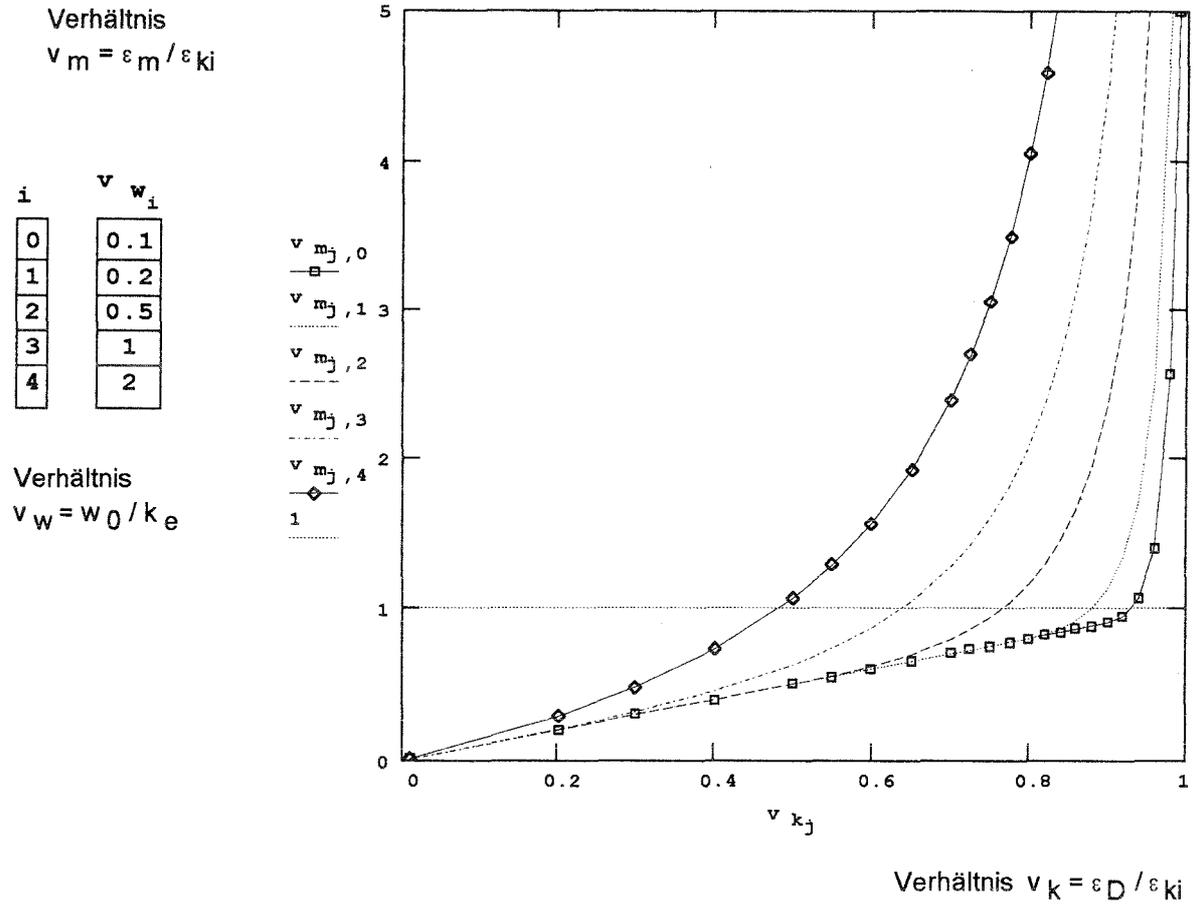
Diese Gleichung entspricht bis auf den Einfluß der Querverformung der Form von {2}. Aufbauend auf {5.1} und {5.2} kann die Gültigkeit von {1} auch auf orthotrope Werkstoffe (z. B. gewebeverstärkte Kunststoffe) ausgedehnt werden, wenn die Einflüsse aus der Orthotropie analog den Geometrie- und Einspannbedingungen einschließlich der Querverformung im Vergleichsschlankheitsgrad λ_V berücksichtigt werden.

1.1.2 Wirksame Breite

Die Druckstauchung nach {15.1}, bei der vorverformte Plattenstreifen vom idealen Verhalten des nicht vorverformten Systems abweichen, sei "Beulbiegestauchung" ε_{kb} genannt,

$$\varepsilon_{kb0} = \frac{\pi^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{w_0}{k_e} \right) \quad \{19.1\}$$

der Vorgang selbst Beginn des "Beulbiegens"



ϵ_D : Durch die Druckkraft P bewirkte Stauchung
 ϵ_m : Durch die Druckkraft P bewirkte, auf den Querschnitt bezogene Gesamtverformung
 ϵ_{ki} : Kritische Stauchung

w_0 : Vorverformung
 k_e : Kernweite
 λ : Schlankheitsgrad
 siehe auch Bilder 1 und 2

$$\epsilon_{ki} := \frac{\pi^2}{\lambda^2}$$

$$v_{m_{j,i}} := v_{k_j}$$

wenn $v_{m_{j,i}} \leq 1 - v_{w_i}$

$$v_{m_{j,i}} := \frac{1}{2} \cdot v_{k_j} \cdot \left(\frac{1 - v_{k_j}}{v_{w_i}} + \frac{v_{w_i}}{1 - v_{k_j}} \right)$$

für $v_{m_{j,i}} \geq 1 - v_{w_i}$

Bild 3 : Auf den Querschnitt bezogene Gesamtverformung in Abhängigkeit von der durch die Druckkraft bewirkten Stauchung eines Plattenstreifens mit Vorverformung, jeweils bezogen auf die kritische Stauchung

Weiterhin wird als zugehöriger "Beulbiege - Schlankheitsgrad"

$$\lambda_{kb0} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{w_0}{k_e}}} \quad \{19.2\}$$

bezeichnet.

Bei einer vorverformten Platte nehmen die Vorverformungen $w_v = f(w_0, y)$ der einzelnen Plattenstreifen von $w_v = w_0$ an der Stelle der größten Vorverformung auf $w_v = 0$ am gehaltenen Längsrand ab. Ohne die Membranwirkung der einzelnen Plattenstreifen untereinander zu berücksichtigen, kann deren Beulbiegestauchung beschrieben werden als

$$\varepsilon_{kb0v} = \frac{\pi^2}{\lambda_{kb0v}^2} \quad \{19.3\}$$

mit

$$\lambda_{kb0v} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{w_v}{k_e}}} \quad \{19.4\}$$

Der mittlere Wert der Beulbiegestauchung der Streifen ist

$$\varepsilon_{kb0m} = \frac{\pi^2}{b_p} \int_0^{b_p} \frac{1}{\lambda_{kb0v}^2} dy \quad \{19.5\}$$

Der Streifen mit der größten Vorverformung hat die geringste Beulbiegestauchung, derjenige am gehaltenen Rand die größte.

$$\varepsilon_{kb0} = \min \varepsilon_{kb0v} \quad \{19.6\}$$

$$\varepsilon_d = \max \varepsilon_{kb0v} \quad \{19.7\}$$

Durch die Membranwirkung in der Platte werden in den einzelnen Streifen die Beulbiegestauchungen höher bzw. die Schlankheitsgrade kleiner, die Zusammenhänge in {19.1 bis 19.7} bleiben jedoch erhalten. Ohne Index o werden sie zur Beschreibung des Verhaltens mit Membranwirkung verwendet.

Der Kehrwert des Integrals in {19.5} entspricht dem Quadrat des Beulbiege - Schlankheitsgrades λ_{ser} der Streifen einer nicht gehaltenen Platte mit gleicher Vorverformung über der Breite b_p , das Produkt aus der Breite b_p und dem Kehrwert des Integrals demjenigen der Platte λ_{er} .

$$\varepsilon_{kbm} = \frac{\pi^2}{\lambda_{er}^2} = \frac{\pi^2}{b_p \cdot \lambda_{ser}^2} \quad \{20\}$$

Das Verhältnis der mittleren zur minimalen Beulbiegestauchung beschreibt die mögliche Erhöhung der mittleren Beulbiegestauchung vom Beginn des Biegebeulens im Streifen mit der größten Vorverformung bis zum Beginn in den Streifen in der Nähe des gehaltenen Randes bzw. dem Erreichen einer vorgegebenen Randstauchung ε_d .

$$\frac{\varepsilon_{kbm}}{\varepsilon_{kb}} = \left(\frac{\lambda_{kb}}{b_p \cdot \lambda_{ser}} \right)^2 \quad \{21.1\}$$

In gleicher Weise kann das Verhältnis der mittleren zur Randstauchung beschrieben werden, indem eine verringerte Breite b_{ef} der Ersatzplatte angesetzt wird.

$$\frac{\varepsilon_{kbm}}{\varepsilon_d} = \left(\frac{b_{ef} \cdot \lambda_{ser}}{b_p \cdot \lambda_{ser}} \right)^2 = \left(\frac{b_{ef}}{b_p} \right)^2 \cdot \lambda_{ser}^2 \quad \{21.2\}$$

Aus {21.1 und 21.2} erhält man

$$\frac{b_{ef}}{b_p} \lambda_{ser} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{kb}}{\varepsilon_d}} \cdot \lambda_{kb} \quad \{21.3\}$$

1.1.2.1 Lösung ohne Imperfektionen

Für den nicht real erreichbaren Grenzzustand, in dem die Vorverformungen entsprechend {16} verschwinden, entspricht die Beulbiegestauchung der ideellen kritischen Stauchung der gehaltenen Platte und alle Streifen haben den gleichen Beulbiege - schlankheitsgrad.

Es gilt also für die reale Platte

$$\varepsilon_{kb} \leq \varepsilon_{ki} \quad \text{und} \quad \lambda_{kb} \leq \lambda_{ser}$$

und

$$\frac{b_{ef}}{b_p} \leq \sqrt{\frac{\varepsilon_{ki}}{\varepsilon_d}} \quad \{22\}$$

Da die Randfaser nach der Definition gehalten ist und daher nicht ausbiegen kann, ist es auch berechtigt, die beiden Verhältnisse gleichzusetzen.

Die Kraft P , die zum Verformungszustand mit der Randstauchung ε_d geführt hat, kann mit dem Verformungsmodul E_v errechnet werden:

$$P = \varepsilon_d \cdot E_v \cdot t_p \cdot b_{ef} \quad \{23\}$$

Wenn die Dehnsteifigkeit für alle Verformungszustände gleich ist, also $E_v = E_0 = \text{const}$, so gilt für einen nicht kriechenden Werkstoff

$$\frac{b_{ef}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \quad \{24\}$$

Diese Gleichung entspricht dem Ansatz nach *v. Kármán* [12, 13]

(zitiert z. B. in [7, 9 bis 11]), der davon ausging, daß die Tragfähigkeit einer an den Längsseiten gehaltenen Platte, derjenigen mit der Breite b_{ef} und der mittleren Spannung σ_d entspricht, die sich am Rand der realen Platte einstellt.

Wie schon gezeigt, ist der Wert für b_{ef} nach {22} im realen Bauteil nicht zu erreichen, da innere und äußere Imperfektionen nicht berücksichtigt sind.

1.1.2.2 Berücksichtigung von Imperfektionen

Für Stahlblechprofile wurde daher aus dem Ergebnis von Versuchen die Beziehung {24} nach *v. Kármán* von *Winter* [14 bis 17], zitiert u. a. bei [7, 9 bis 11], angepaßt.

$$\frac{b_{ef}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \right) \quad \{25\}$$

Diese sogenannte *Winter - Formel* ist Grundlage des Regelwerkes für Stahlblechprofile [z. B. 10 und 18].

Sie wird verwendet mit der bezogenen Schlankheit

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\sigma_d}{\sigma_{ki}}} = 1,052 \frac{b_p}{\sqrt{k_\sigma}} \cdot \frac{b_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_d}{E}} \quad \{26.1\}$$

in der Form

$$\rho = \frac{b_{ef}}{b_p} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p} \right) \quad \{26.2\}$$

Der Beulwert k_σ erfaßt die Abhängigkeit von den Randbedingungen und Spannungsverteilungen.

Da mit {1} und {2} gilt

$$\varepsilon_{ki} = \frac{\pi^2}{\lambda_{vp}^2} = \frac{\pi^2}{\frac{12(1-\mu^2)}{k_\varepsilon} \cdot \frac{b_p^2}{t_p^2}}$$

wird nach {22} mit der Querkontraktionszahl $\mu = 0,3$ für einen isotropen Werkstoff

$$\lambda_{vp} = \frac{1,052}{\sqrt{k_\varepsilon}} \cdot \frac{b_p}{t_p} \cdot \sqrt{\varepsilon_d} \quad \{26.3\}$$

Das Spannungs - Dehnungs - Verhalten von Stahl ist bis zum Erreichen der Streckgrenze nur ein Sonderfall des vorausgesetzten Verhaltens, daß die Dehnsteifigkeiten aller Querschnittsteile beim jeweiligen Verformungszustand gleich sind. Da, wie gezeigt, das instabile Versagen nur vom erreichten Verformungszustand abhängt, ist es berechtigt, die für Stahl hergeleiteten Beziehungen für die wirksame Breite mit Bezug auf die Dehnung $\sigma / E = \varepsilon$ anzuwenden.

$$\rho = \frac{b_{ef}}{b_p} = \frac{1}{\lambda_{vp}} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{vp}} \right) \quad \{26.4\}$$

Für GF - UP kann die Querkontraktionszahl genügend genau unabhängig vom Zeiteinfluß mit $\mu = 0,3$ angenommen werden [19]. Für die untersuchten Wirrfaserlaminat ist die Querkontraktionszahl $\mu > 0,3$ [20, 21].

Winter erfaßte durch Versuche mit dem Beiwert 0,22 in [25] den Einfluß von Imperfektionen bei beidseitig gelagerten Plattenstreifen.

Zu den geometrischen äußeren Imperfektionen zählen in erster Linie Vorbeulen, nicht lineare und exzentrische Lasteintragungen, Querschnitts - und Dicken - abweichungen sowie Abweichungen in den Lagerungsannahmen zur Ermittlung des Beulwertes.

Als strukturelle (innere) Imperfektionen können bei Stahl Eigenspannungen und veränderliche Fließgrenzenverteilung innerhalb der Querschnitte genannt werden [9].

Bei GF - UP - Profilplatten ist nicht mit höherem Einfluß äußerer Imperfektionen als bei solchen aus Stahl zu rechnen. Bei sonst gleichen Querschnittsabmessungen sind wegen der weit geringeren Dehnsteifigkeiten (mit Kriecheinfluß nur etwa 1/70 bis 1/10 der Stahl - steifigkeit) größere Dicken erforderlich, um auch nur annähernd ähnliche Traglasten zu erreichen. Gleiche Vorverformungen wirken sich, wie gezeigt, wegen des geringeren Verhältnisses zur Dicke günstiger aus.

GF - UP - Bauteile werden herstellbedingt mit einer Mindestdicke dimensioniert. Dicken - abweichungen können dann die Tragfähigkeit nur positiv beeinflussen. Die Lasteintragung in das jeweilige Beulfeld unterscheidet sich nicht.

Eine möglicherweise höhere elastische Einspannung an den Rändern (z. B. des Druckgurtes eines Trapezprofils in den Stegen) könnte eine höhere wirksame Breite bei Stahlprofilen ergeben. Wie in [11] durch Vergleichsrechnung gezeigt wurde, kann bei Strahltrapezprofilen durch Berücksichtigung der möglichen Einspannwirkung die wirksame Breite nur unwesentlich gegenüber der einspannungsfreien Annahme erhöht werden.

Weiter ist bedeutsam, daß bei Erreichen der Traglast die Randstauchung bei GF - UP um mehr als etwa fünffach größer ist als die Fließdehnung bei Stahl. Die zugehörige wirksame Breite ist also weniger als halb so groß, wodurch der Einfluß elastischer Einspannung erheblich verringert wird.

Wenn die Gebrauchs - oder Tragfähigkeit mit den jeweils geringsten Werten der Dehn - steifigkeit des Grenzzustandes der Verformung, den 5 % - Quantilen der Werkstoffkenn - werte, ermittelt werden, ist auch der Einfluß innerer Imperfektionen vernachlässigbar, nicht zu unterschiedliche Dehnsteifigkeiten über der Dicke des gedrückten Querschnittsteils vorausgesetzt.

Nach den vorstehenden Überlegungen erscheint es ausreichend begründet, die empirisch gefundene *Winter - Formel* mit dem Beiwert k_{ε} im {26.3} unter Annahme einspannungsfreier Ränder auch für die dehnungsbezogene Bemessung zu verwenden. Für den beidseitig gelagerten Plattenstreifen und gleichmäßige Lasteinleitung ist $k_{\varepsilon} = 4$ und

$$\sqrt{\varepsilon_{ki}} = \frac{\pi}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \cdot \frac{t_p}{b_p} = 1,901 \frac{t_p}{b_p}$$

in dehnungsbezogener Form

$$\frac{b_{ef}}{t_p} = 1,901 \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_d}} \left(1 - 0,415 \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_d}} \cdot \frac{t_p}{b_p} \right) \quad \{27.1\}$$

bzw.

$$\frac{b_{ef}}{b_p} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{ki}}{\varepsilon_d}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\varepsilon_{ki}}{\varepsilon_d}} \right) \quad \{27.2\}$$

Die ursprüngliche *Winter - Formel* (1946) für Stahlblech mit dem E - Modul für Stahl lautete

$$\frac{b_{ef}}{t_p} = 1,901 \sqrt{\frac{E}{\sigma_d}} \left(1 - 0,475 \sqrt{\frac{E}{\sigma_d}} \cdot \frac{t_p}{b_p} \right) \quad \{28.1\}$$

bzw.

$$\frac{b_{ef}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \left(1 - 0,25 \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \right) \quad \{28.2\}$$

Mit später geänderten "Imperfektionsbeiwerten" (1968)

$$\frac{b_{ef}}{t_p} = 1,901 \sqrt{\frac{1}{\sigma_d}} \left(1 - 0,415 \sqrt{\frac{E}{\sigma_d}} \cdot \frac{t_p}{b_p} \right) \quad \{29.1\}$$

bzw.

$$\frac{b_{ef}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \right)$$

wird sie in den einschlägigen Regelwerken für Stahlbauteile verwendet [10, 18 und 22]. In DIN 18807, Teil 1, werden Stahltrapezprofile basierend auf der Form {29.1} berechnet:

$$b_{ef} = 1,9 \cdot b_p \left(1 - 0,42/\lambda_p\right) / \lambda_p \quad \{29.2\}$$

mit dem auf den Beulwert $k = 4$ bezogenen Vergleichsschlankheitsgrad und der Streckgrenze β_s

$$\lambda_{ps} = \frac{2}{\sqrt{k_\sigma}} \cdot \frac{b_p}{t_p} \cdot \sqrt{\frac{\beta_s}{E}} \quad \{29.3\}$$

Dehnungsbezogen wird entsprechend {27.1}

$$\lambda_p = \frac{b_p}{t_p} \sqrt{\varepsilon_d} \quad \{29.4\}$$

Die Formel für Stahltrapezprofile nach DIN 18807, Teil 1 {29.2} kann ohne Veränderung mit dem dehnungsbezogenen Schlankheitsgrad λ_p für die Bemessung von Trapezprofilen aus isotropen oder quasiisotropen Kunststoffen verwendet werden. Hierbei wurde wie bei den *Winter-Formeln* in der Beziehung {29.4} ein etwa quadratisches Beulmuster eines langen Plattenstreifens vorausgesetzt.

1.2 Werkstoffverhalten

GF - UP - Laminat sind schichtförmig aus den verschiedenen Lagen der Verstärkungswerkstoffe aufgebaute Baustoffe, die mit einem flüssigen Reaktionsharz, dem Zusatzstoffe und Reaktionsmittel zugefügt wurden, getränkt werden. Nach Aushärtung erhält der Baustoff GF - UP seine Eigenschaften aus der Verbundwirkung der Glasfasern mit der Matrix, die zu den Duroplasten (Duromeren) gehört. Im Gegensatz zu Stahl und verschiedenen Thermoplasten (Plastomeren) darf wegen fehlender Streckgrenze mit Ausnahme des Kriechens kein duktiler Verhalten vorausgesetzt werden. Einzelheiten zu den Baustoffkomponenten und Herstellverfahren können [19 und 23] entnommen werden.

Es ist allgemein üblich bei der Dimensionierung gegen Bruch, mögliches Stabilitätsversagen und konstruktiv unzulässige Verformungen die Abhängigkeit des Werkstoffverhaltens von der Lastdauer, den Umgebungseinwirkungen und erhöhter Temperatur (insbesondere Dauertemperatur) mit Abminderungsfaktoren zu erfassen, die sich aus dem Vergleich mit in Kurzzeitversuchen bei Normalklima bestimmten 5 % - Quantilen der Eigenschaften ergeben [19, 23, 24, 25, 26, 27, 28, u. a.] .

Die quasielastisch ermittelten Schnittkräfte bzw. Beanspruchungen S_i werden entweder den maßgebenden Festigkeiten nach Abminderung gegenüber gestellt oder mit Beulwerten bzw. Verformungswerten verglichen, die mit abgemindertem Elastizitätsmodul E_0 (siehe Bild 4) errechnet wurden.

Es wird zwischen Abminderungsfaktoren A_{Bi} bzw. K_i [19] für die Dimensionierung gegen

Bruchversagen sowie A_{li} bzw. C_i für den Stabilitätsnachweis und die Verformungsberechnung unterschieden, da sie unterschiedlich groß sein können. Üblicherweise werden die Indices 1 bzw. t [19] für den Einfluß der Lastdauer, 2 bzw. U für den der Umgebung und 3 bzw. S für den der Temperatur gewählt. Entweder werden vereinfacht Abminderungsfaktoren und Sicherheitsfaktoren zu einem globalen Faktor zusammengefaßt, z. B. [27 und 28] oder es werden Lasten und Beanspruchungen unterschiedlich langer Dauer überlagert, indem die einzelnen Schnittgrößen mit den Faktoren A_1 entsprechend ihrer Einwirkdauer und den Faktoren A_2 sowie A_3 multipliziert werden [26] .

Die Bemessungsgleichungen werden dann beim Festigkeitsnachweis

$$\frac{S_B \cdot \sum(A_{Bi} \cdot n_i)}{n_B} + \frac{S_B \cdot \sum(A_{Bi} \cdot m_i)}{m_B} \leq 1 \quad \{30\}$$

beim Stabilitätsnachweis

$$\frac{S_l \cdot \sum(A_{li} \cdot n_i)}{n_e} \leq 1 \quad \{31\}$$

oder

$$\frac{S_l \cdot \sum(A_{li} \cdot p_i)}{p_k} \leq 1 \quad \{32\}$$

und beim Grenzdehnungsnachweis (in allgemeiner Form)

$$S_\varepsilon \left[\frac{\sum(A_{li} \cdot \sigma_{Zi})}{E_Z} + \frac{\sum(A_{li} \cdot \sigma_{Bi})}{E_B} \right] \leq \varepsilon_F \quad \{33\}$$

In diesen Gleichungen bedeuten:

- n_i, m_i, p_i Normalkräfte, Momente und Drücke aus den einzelnen Lasten
- n_B, m_B Kurzzeitbruchkräfte und -momente bei Normalklima
- σ_{Zi}, σ_{Bi} Spannungen aus Zug- und Biegebeanspruchungen
- S_B, S_I, S_E Maßgebliche globale Sicherheitsbeiwerte, in [26] sind $S_B = S_I = 2,0$ und $S_E = 1,0$
- n_e, p_k kritische Beulkräfte bzw. -drücke, ermittelt mit Kurzzeitelastizitätsmoduln
- A_{Bi}, A_{Ii} Produkt der für die einzelnen Lasten maßgeblichen Abminderungsfaktoren. Es sind zum Beispiel folgende A_1 für einzelne Schnittgrößen anzusetzen:
- aus ständiger Last: A_1 für $2 \cdot 10^5$ h Dauer
 - Schnee: A_{1s} für $2 \cdot 10^3$ h
 - kurzzeitiger Last: $A_{1w} = 1,0$
- E_Z, E_B Kurzzeitelastizitätsmoduln bei Normalklima für die maßgebliche Beanspruchung (Normalkraft oder Biegung)
- ε_F Werkstoffbedingte Grenzdehnung
- In [26] ist für von Flüssigkeiten benetzte GF-UP-Behälter, deren Wandaufbau mit einer Wirrfaserschicht (Faseranteil mindestens 450 g/m^2) beginnt und endet, die Randfaserdehnung auf $\varepsilon_F \leq 0,5 \%$ begrenzt

Die Gültigkeit der vorstehenden Überlagerung ist bei Kunststoffen (verstärkt oder unverstärkt) für Verformungs- und Stabilitätsberechnungen nachgewiesen, solange das Verformungsverhalten linear viskoelastisch bleibt. Weiterhin muß bei zyklischen Lasten die Einwirkungsdauer so klein sein, daß bis zum nächsten Lastzyklus genügend Zeit zur viskoelastischen Rückverformung bleibt. Linear viskoelastisch ist ein Werkstoff, wenn die Summe der Verformungen $\sum \varepsilon_i(t)$, die von den einzelnen Beanspruchungen σ_i erzeugt wird, gleich der Verformung $\varepsilon(t)$ ist, die durch die Summe der Spannungen $\sum \sigma_i$ entsteht. Außer durch Einflüsse aus Umgebung und Temperatur wird der linear viskoelastische Bereich bei faserverstärkten Kunststoffen durch die Entstehung von Rissen begrenzt.

Bei Zugbeanspruchung senkrecht zu unidirektional verstärkten Laminatschichten entstehen Risse bei Dehnungen von etwa $0,1 \%$ [29, 30, 31, u. a.]. Je nach Packungsdichte der Fasern in solchen Schichten und Aufbau des Gesamtlaminates können die Rißdehnungen unter oder über $0,1 \%$ bis etwa $0,2 \%$ liegen [32]. Ist die Zugbeanspruchung parallel werden bei Dehnungen von etwa 1% Risse festgestellt [30].

Wirrfaserlaminare zeigen ab Zugdehnungen von 0,3 % bis 0,5 % eine progressive Zunahme von irreversiblen Schädigungen im Verbund Glasfaser / Matrix (Mikrorisse) [20 u. a.]. Unverstärkte übliche UP - Harze verhalten sich bis zu Dehnungen von etwa 0,6 % bis 1 % linear viskoelastisch [30].

Die Berechnung der zeitabhängigen Verformungseigenschaften des Verbundwerkstoffs [33 u. a.] mit voller Gültigkeit der Kontinuumsmechanik ist auf den linear viskoelastischen Bereich begrenzt.

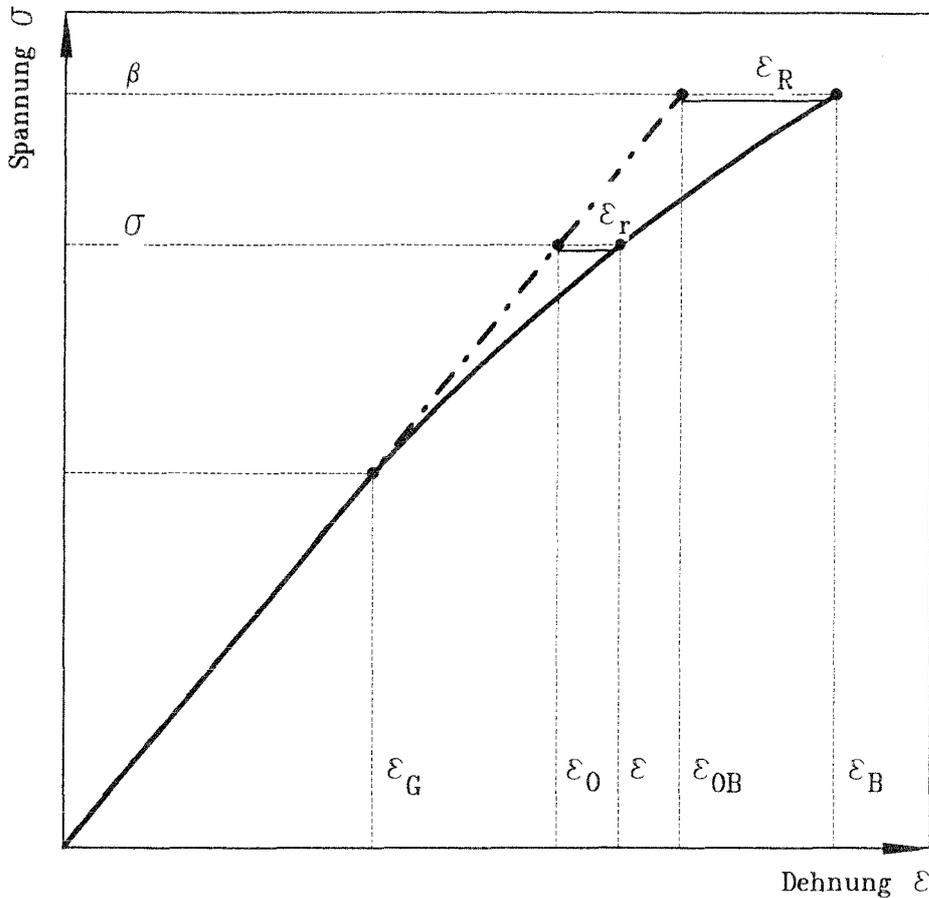
Zum Einfluß von kurzzeitigen und zyklischen Lasten, die mit Dauerlasten überlagert werden, auf die Zeitstandfestigkeit liegen wegen des komplexen Verhaltens nach Überschreitung verformungsbedingter Schädigungsgrenzen nur wenige experimentelle und theoretische Ergebnisse vor. Die Überlagerung nach [30] kann daher nur eine Abschätzung sein, die durch gleichzeitige Einhaltung von Verformungsgrenzen abgesichert werden sollte.

Im Vergleich zu Gesamtbeanspruchungszeiten bzw. Ersatzabminderungsfaktoren A_{1B} , die man erhält, wenn die "Palmgren - Miner - Hypothese" auf GF - UP - Laminare mit vorwiegend ruhenden, aber unterschiedlich hohen Lasten verschiedener Einwirkdauer ausgehend von der Zeitstandfestigkeitskurve angewendet wird [34, 35], liegt diese Abschätzung auf der sicheren Seite. Die lineare Schädigungshypothese (Miner - Regel) [36, 37], zitiert bei [9], wurde für schwingend beanspruchte Bauteile aufgestellt.

Da wie gezeigt in einer Profilplatte im Bruchzustand die Dehnungen von der Bruchdehnung bis weit unter Grenzen reichen, bei denen vermehrt Schädigungen auftreten, wird nachstehend eine Möglichkeit zur Berechnung des zeitabhängigen Spannungs - Dehnungs - Verhaltens für Wirrfaserlaminare vorgeschlagen, die den gesamten Dehnungsbereich für konstante Lasten erfaßt. Die kritische Stauchung des Druckgurts der untersuchten Trapezprofile (siehe Abschnitt 2.2) mit einer Breite $b_p = 120$ mm und Dicke $t_p = 1,03$ mm (Mittelwerte) beträgt 0,027 %, während die mittlere Zug - Bruchdehnung des Laminats bei $\epsilon_B = 1,222$ % liegt.

1.2.1 Kurzzeitiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten

Die Spannungs - Dehnungs - Linie für konstante Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch (Bezeichnungen und Festlegungen siehe Bild 4) verläuft bei Zugbeanspruchung vor dem Überschreiten der Grenzdehnung ϵ_G linear, danach weicht sie zunehmend von diesem quasielastischen Verlauf ab, bis die Bruchdehnung ϵ_B erreicht wird.



- | | |
|---|---|
| ε : Dehnung | E_0 : Elastizitätsmodul
Verhältnis zwischen
Spannung σ
und Dehnung ε_0 |
| ε_r : Durch Risse (Schädigung) bewirkter
Dehnungsanteil | E_v : Verformungsmodul
(Sekantenmodul)
Verhältnis zwischen Spannung σ
und Dehnung ε |
| ε_0 : Theoretische Dehnung ohne
Rißanteil | E_{vB} : Verformungsmodul bei Bruch
Verhältnis zwischen
Bruchspannung β
und Bruchdehnung ε_B |
| ε_B : Bruchdehnung | f_R : Bruchdehnungsfaktor
Beschreibt den durch Risse bewirkten
Anteil an der Bruchdehnung ε_B |
| ε_R : Durch Risse (Schädigung) bewirkter
Anteil an der Bruchdehnung | f_r : Rißfaktor
Beschreibt den durch Risse bewirkten
Anteil an der Dehnung ε |
| ε_{0B} : Theoretische Dehnung bei Bruch
ohne Rißanteil | |
| ε_G : Grenzdehnung
Dehnung (Zugbeanspruchung) bei der
Risse ein zu berücksichtigendes
Ausmaß erreichen | |
| σ : Spannung | |
| β : Bruchspannung | |

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad E_0 = \frac{\beta}{\varepsilon_{0B}} \quad E_v = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad E_{vB} = \frac{\beta}{\varepsilon_B}$$

$$f_R = \frac{\beta}{\varepsilon_B * E_0} \quad f_R = \frac{E_{vB}}{E_0} \quad f_R = \frac{\varepsilon_{0B}}{\varepsilon_B} \quad f_r = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \quad f_r = \frac{E_v}{E_0}$$

Bild 4 : Kurzzeitiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten, schematische Darstellung

Völlig ohne Fehlstellen, z. B. fehlende oder ungleichmäßige Haftung zwischen Faser und Matrix oder Luftporen, kann ein Laminat nicht hergestellt werden. Vom Beginn der Verformung an gibt es oder bilden sich durch Lösen von Bindungen Schädigungen, vereinfacht Risse genannt, wie auch vielfach mit verschiedenen Meßverfahren gefunden wurde [38, 35, u. a.]. Die Grenzdehnung ε_G erfaßt nicht das Entstehen erster Risse, sondern ist die Dehnung, ab der Anzahl und Ausmaß der Risse das linear viskoelastische Verhalten merklich beeinflussen.

Die Differenz ε_r zwischen der Gesamtdehnung ε und der Dehnung ε_0 , die sich aus dem theoretisch linearen Verlauf mit dem Anstieg der Tangente E_0 bei der Dehnung $\varepsilon = 0$ ergibt, ist ein Maß für die Summe der Risse. Der Reißfaktor f_r beschreibt den durch Schädigungen bewirkten Reißanteil. Nach Anwachsen des Reißanteils auf den Wert $\varepsilon_R (f_R)$, "Schadensakkumulation", tritt der Bruch ein.

Die Spannungs - Dehnungs - Linie kann durch eine Parabel unbestimmten Grades angenähert werden. Mit

$$n = \frac{\varepsilon_B + \varepsilon_G}{\varepsilon_B \cdot f_R + \varepsilon_G} \quad \{34.1\}$$

und

$$a = E_0 \cdot f_R \cdot \varepsilon_B^{1-n} \quad \{35.1\}$$

ist

$$\sigma = \varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a (\varepsilon_B - \varepsilon)^n \quad \{36.1\}$$

Gleiche Ergebnisse liefern

$$n = \frac{\varepsilon_B + \varepsilon_G}{\frac{\beta}{E_0} + \varepsilon_G} \quad \{34.2\}$$

$$a = \beta \cdot \varepsilon_B^{-n} \quad \{35.2\}$$

$$\sigma = \beta - a (\varepsilon_B - \varepsilon)^n \quad \{36.2\}$$

In dieser Form {36.2} wird die Beziehung häufig zur Annäherung der Spannungs - Dehnungs - Linie von Beton verwendet.

Durch Umstellung erhält man aus {36.1} die Gesamtdehnung

$$\varepsilon = \varepsilon_B - \left(\frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - \sigma}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{37.1\}$$

und mit $E_v = \sigma / \varepsilon$ den Verformungsmodul

$$E_v = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{\varepsilon} \quad \{38\}$$

Der Reißfaktor wird

$$f_r = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0 \cdot \varepsilon} \quad \{39\}$$

Da nach Definition $\sigma = \varepsilon_0 \cdot E_0$, gilt mit {36.1} für die theoretisch rissefreie Dehnung

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_B \cdot f_R - \frac{a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0} \quad \{40\}$$

und die Gesamtdehnung

$$\varepsilon = \varepsilon_B - \left(\frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - \varepsilon_0 \cdot E_0}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{37.2\}$$

Mit den Werkstoffkonstanten für eine konstante Verformungsgeschwindigkeit,

Elastizitätsmodul E_0 ,

Grenzdehnung ε_G ,

Bruchdehnung ε_B ,

und Bruchspannung β

können die verformungsabhängigen Werte nach vorstehenden Beziehungen ermittelt werden.

1.2.1.1 Grenzdehnung

Die Grenzdehnung ε_G ist bei zyklischer Zugbelastung mit gleicher Höchstdehnung ε und Verformungsgeschwindigkeit sowie genügend langen Entlastungszeiten zur Berücksichtigung des viskoelastischen Matrixverhaltens dann erreicht, wenn die Verlustarbeit bei einem nachfolgenden Zyklus größer als beim vorhergehenden ist. Die Verlustarbeit ist die Differenz zwischen den Formänderungsarbeiten (vergleiche {3}) von Be- und Entlastungsvorgang. Ribbildung in Laminaten wurde [20, 30, 38, 39, 40, 41, 42, u. a.] nachgewiesen, indem man Verlustarbeiten miteinander verglich. Die so erhaltenen Ergebnisse wurden mit anderen Verfahren bestätigt, z. B. mikroskopische Beobachtungen, Schallemissionsmessungen, Messungen der Änderung von Lichtdurchlässigkeit und Verformungsmodul.

Die Höhe der Grenzdehnung wird vom Verformungsmodul und der Bruchdehnung der Matrix (in den Bereichen üblicher UP - Harze [19]) nur sehr gering beeinflusst [41]. Einflüsse, die sich auf den Grenzbereich Faser / Harz auswirken, sind eher zu beachten, wie z. B. die Packungsdichte einzelner Fasern, die Faserausrüstung, die Benetzbarkeit und die Struktur im ausgehärteten Harz, die auch vom Aushärteverfahren abhängig ist [32, 43, 44, 45, 56 u. a.] .

Die Grenzdehnung nimmt bei Wirrfaserlaminaten je nach Kombination von Harztyp und Wirrfaserverstärkung mehr oder weniger stark mit zunehmender Temperatur ab [20] .

Sowohl bei unidirektional verstärkten Laminatschichten als auch bei Wirrfaserlaminaten sind sie im technisch angewendeten Bereich nahezu unabhängig vom Glasvolumenanteil des Laminates. Ebenso sind sie unabhängig von der Verformungsgeschwindigkeit bzw. der Dauer konstanter Beanspruchung [20, 30] auch mit zyklischen Be- und Entlastungen. Die absolute Höhe der gemessenen Grenzdehnungswerte von Wirrfaserlaminaten hängt neben dem gewählten Meßverfahren in erster Linie von der Kombination Faser / Harz ab. Für im Bauwesen verwendete Lamine [19] kann genügend genau von dem Wert $\varepsilon_G = 0,4\%$ ausgegangen werden. Bei optimaler Berücksichtigung der genannten Einflüsse sind höhere Werte möglich. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, daß nicht optimale Fertigung und thermische Nachbehandlung (Tempern) sich, oft unvermeidbar, negativer auswirken können.

1.2.1.2 Bruchdehnung

Die vorstehend diskutierten Faktoren beeinflussen sicherlich auch die Höhe der Bruchdehnung und der zur Beschreibung der Spannungs - Dehnungs - Linie verwendeten Verformungskenngrößen. Insbesondere die neuere Literatur hierzu konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig gesichtet werden.

Ein geringerer Verformungsmodul, z. B. durch kürzere Aushärtezeit (ohne Tempern), führt bei Wirrfaserlaminaten zu größeren Bruchdehnungen [32, 46]. Gleiches Verhalten wurde mit unterschiedlich elastifizierten Harzen (Mischung von Harzen mit deutlich unterschiedlichem Verformungsmodul) festgestellt [35, 47]. Bei Laminaten mit durchlaufenden Fasern in Beanspruchungsrichtung, Gewebelaminaten [47] und Mischlaminaten [32, 44, 46] wurde eine gegenläufige Abhängigkeit gefunden.

Die Bruchdehnung von Wirrfaserlaminaten steigt abhängig vom Harztyp mit zunehmender Temperatur bei gleichzeitig abnehmendem Verformungsmodul an, bis ein von der Temperaturbeständigkeit der Matrix (gekennzeichnet durch die Schubmodul- und Dämpfungs-Temperaturkurven) vorgegebener Grenzwert überschritten wird [20, 21, 48, u. a.]. Bei einem Wirrfaserlaminat mit sehr hohem Glasvolumenanteil (34 %) und einem wärmebeständigen UP-Harz wurde in [48] ebenso wie bei einem Gewebelaminat eine (geringe) abnehmende Tendenz ermittelt.

Bis zu einem Glasvolumenanteil $\varphi = 20\%$ nimmt die Bruchdehnung von Wirrfaserlaminaten entsprechend dem Glasgehalt zu [20], in [49] wird schon ab $\varphi = 13\%$ keine Zunahme mehr gemessen (bis $\varphi = 20\%$). Bei höheren Glasanteilen, bis $\varphi = 35\%$ [48] und bis $\varphi = 45\%$ [47] ist die Bruchdehnung unabhängig vom Glasvolumenanteil, erst bei höheren Werten [47] nimmt sie wieder geringfügig ab. Die Temperatur beeinflusst die Bruchdehnung ungleich stärker [20], sodaß sich bei höheren Temperaturen die Verhältnisse umkehren. Es kann daher wahrscheinlich davon ausgegangen werden, daß die Bruchdehnung wie die Grenzdehnung nahezu unabhängig vom Glasvolumenanteil (bautechnischer Bereich) ist.

Bei den Traglastversuchen am Bauteil und Zugversuchen an Laminatproben wurde festgestellt, daß die Bruchverformungen nicht abhängig sind von der Dauer konstanter Lasteinwirkung. Alle gemessenen Werte (siehe Abschnitte 2.3.2.3 und 2.4.4.2, sowie Bilder 38 und 91), auch bei stufenförmiger Laststeigerung nach vorheriger konstanter Dauerlast, ordnen sich in den statistischen Streubereich der kurzzeitigen Versuche ein. Gleiche Ergebnisse wurden bei Zeitstandzugversuchen an 3 unterschiedlich ausgehärteten Wirrfaserlaminaten mit entsprechend unterschiedlichen Bruchdehnungen gefunden [32, 46]. Die Tendenz der Meßwerte deutet eher daraufhin, daß die Bruchwerte mit abnehmender Verformungsgeschwindigkeit (lange Lastdauer) geringfügig zunehmen, nach [20] werden die Bruchdehnungen umso größer je geringer die Verformungsgeschwindigkeit ist.

Gleiches Verhalten wird bei Normaltemperatur (23°C) auch in [50] für unverstärkte und wirrfaserverstärkte ($\varphi \leq 16,5\%$) UP-Harze festgestellt. Bei höheren Temperaturen (50°C und 80°C) nimmt die Bruchdehnung nach [50] bei Verformungsgeschwindigkeiten unter $1\%/ \text{min}$ wieder ab. Die Abnahme ist jedoch nicht wesentlich größer als in [20] für die Grenzdehnung festgestellt.

Die Bruchdehnungen von unidirektional verstärkten Laminaten sowohl bei Zugbeanspruchung senkrecht als auch parallel zu den Fasern, die in [30, 42] gemessen wurden, liegen im untersuchten Bereich der Dauer konstanter Last (senkrecht bis etwa 400 h , parallel bis 100 h) im gleichen Streubereich. Während bei senkrechter Belastung alle Werte in das Streuband der Kurzzeitwerte eingeordnet werden können, werden bei Längsbeanspruchung Bruchdehnungen im unteren Bereich der Kurzzeitwerte und darunter jedoch ohne eindeutige Abhängigkeit von der Lastdauer ermittelt.

Bei Versuchen an Rohren, mit Rovings nur in Umfangsrichtung und Epoxidharz gewickelt, [51] wurde ebenfalls keine Abnahme sondern sogar eine geringe Zunahme der Bruchdehnungen mit der Dauer konstanter Belastung festgestellt. Untersucht wurden die Bruchdehnungen und -stauchungen sowie Schiebungen bei Bruch mit Dauerlasten bis 2000 h in Form von Zug, Torsion, Zug mit Torsion und Druck mit Torsion.

In [52] wurden die Ergebnisse von Zugversuchen an Wirrfaserlaminaten mit zügiger Laststeigerung nach konstanter Belastung unterschiedlicher Höhe und Dauer vorgestellt. Beurteilt man die ermittelten Verformungsreserven nach dem Kriechvorgang und die gemessenen Bruchdehnungen mit Berücksichtigung der Streuung [53] , so ist von einer Zunahme der Bruchdehnung unter konstanter Last auszugehen. In der gleichen Arbeit ist eine Zeitbruchlinie für konstante Beanspruchung angegeben, die ebenso wie in [21] und [48] eine, wenn auch relativ geringe, Abnahme der Bruchdehnungen mit der Lastdauer annimmt. Leider sind in diesen Berichten keine einzelnen Meßwerte angegeben. In [21] und [48] sind die Linien als untere Grenzkurven gekennzeichnet. In [48] wird darauf hingewiesen, daß die Zeitbruchdehnungen durch Extrapolation ermittelt und zu klein sind. Aus eigener Kenntnis gilt das auch für die Linie in [21] .

Ein negativer Einfluß der Zeit auf die Bruchdehnung des Laminates kann durch korrosive Wirkung der Luftfeuchtigkeit auf die wegen der Laminatrissse zugängliche Glasoberfläche entstehen [54] . Bei Wirrfaserlaminaten dürfte dieser Effekt nur von geringer Bedeutung sein, während er bei unidirektional verstärkten Laminatschichten und Beanspruchung in Richtung der Faser größer sein wird. Dieser Effekt wäre jedoch durch Korrosionsschutzmaßnahmen oder im Faktor A_2 bzw. K_U (siehe oben) zu berücksichtigen.

Die mit der Lastdauer abnehmenden Zeitbruchlinien in [21, 48 und 52] sind wohl eher auf die fehlende Berücksichtigung der Streuung der Meßwerte nach statistischen Methoden und einen gewissen "Sicherheitszuschlag" wegen der vergleichsweise geringen Anzahl der Zeitstandmeßwerte zurückzuführen. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß bei fortgeschrittener Schädigung schon geringste Störungen in der Dauerlast einen abrupten Anstieg der Schäden bewirken und das Meßergebnis verfälschen können.

Für die Bemessung von Bauteilen aus Wirrfaserlaminaten kann genügend genau davon ausgegangen werden, daß die Bruchdehnungen bei Verformungsgeschwindigkeiten unter 1 % / min sowohl für Dauerlasten als auch zyklische Lasten konstant sind.

1.2.2 Zeitabhängiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten

Wenn, wie gezeigt, die Grenz - und Bruchdehnung mit ausreichender Genauigkeit als zeitunabhängig konstant angenommen werden können (Bild 5),

$$\varepsilon_{Gc} = \varepsilon_G \quad \{41.1\}$$

$$\varepsilon_{Bc} = \varepsilon_B \quad \{41.2\}$$

kann im Sinne der "Schadensakkumulation" entsprechend der Miner - Regel auch davon ausgegangen werden, daß der Rißanteil (Schädigungs -) an der jeweils entstandenen Dehnung gleich, also ebenfalls zeitunabhängig ist:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_r \quad \{41.3\}$$

$$\varepsilon_{Rc} = \varepsilon_R \quad \{41.4\}$$

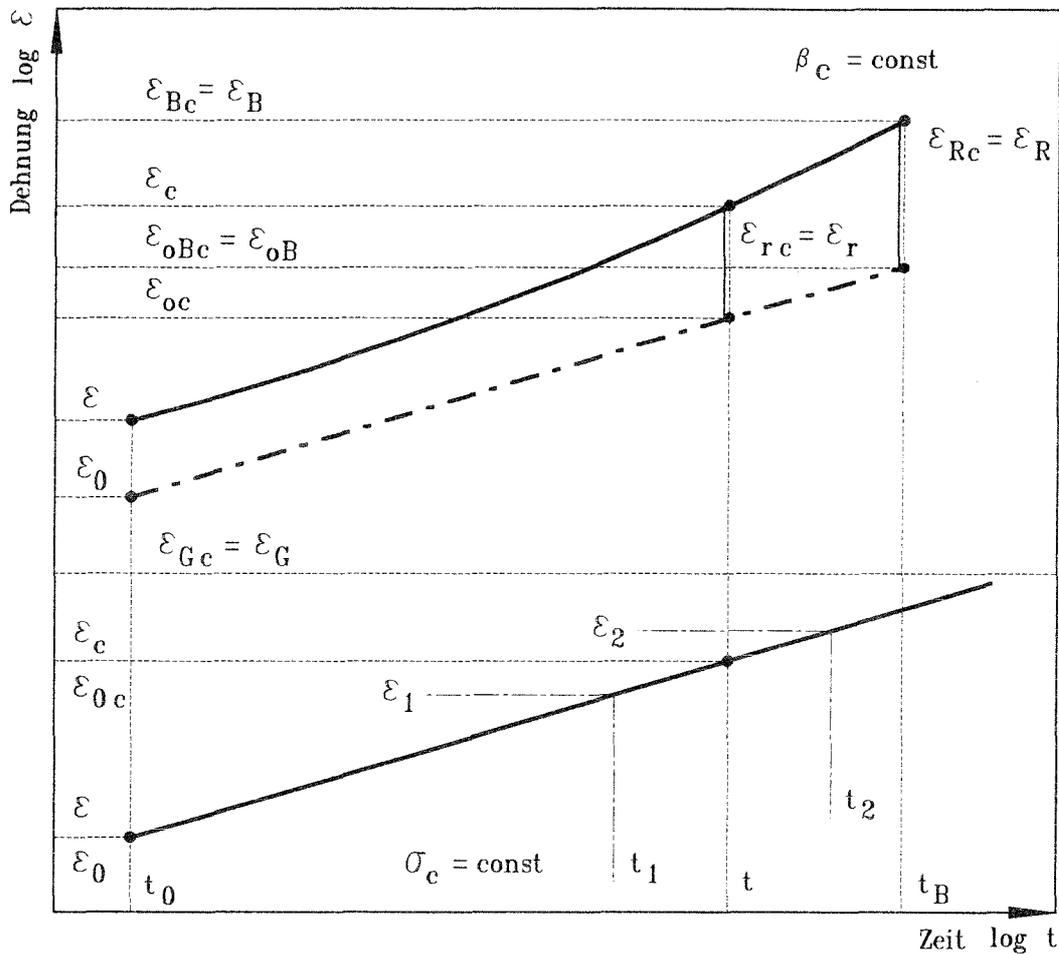
Daraus folgt

$$\varepsilon_{0Bc} = \varepsilon_{0B} \quad \{41.5\}$$

Jeder Punkt einer Zeitdehnlinie ist durch die Summe von Dehnungen $\Delta \varepsilon_i(t)$ aus Spannungserhöhungen $\Delta \sigma_i(\dot{\varepsilon}_i)$ mit Verformungsgeschwindigkeiten $\dot{\varepsilon}_i$ zu beschreiben.

Im einfachsten Fall konstanter Dauerlast, das heißt einer einzigen Spannungserhöhung auf σ_c , wird die Dehnung ε_c zur Zeit t mit der mittleren Verformungsgeschwindigkeit erreicht, die sich aus Zeiten unterschiedlicher Beschleunigung ergibt. Die Dehnung ε entsteht mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Zeitpunkt t_0 und wächst mit ständig abnehmender Beschleunigung auf den Wert ε_c an.

Es gibt verschiedene rheologische Modellvorstellungen zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Kunststoffen, bei denen eine unterschiedliche Anzahl von Federn und Dämpfern in verschiedener Anordnung parallel und hintereinander geschaltet angenommen werden [55, u. a.]. Diese Modelle müssen an real gemessene Kriechkurven angepaßt werden. Es ist daher sinnvoller, direkt von gemessenen Kurven auszugehen. Es hat sich gezeigt, daß die Zeitdehnlinien von Wirrfaserlaminaten vor dem Überschreiten der Grenzdehnung, im linear viskoelastischen Bereich, bei doppeltlogarithmischer Darstellung in ausreichender Näherung als Geraden verlaufen [20, 21, 30, 32, 44, 46, 48, u. a.]. Sie können also durch ein einfaches Potenzgesetz beschrieben werden.



- | | |
|---|--|
| ε_c : Zeitabhängige Dehnung | σ_c : Zeitstand-Spannung |
| ε_{rc} : Zeitabhängiger durch Risse (Schädigung) bewirkter Dehnungsanteil | β_c : Zeitstand-Bruchspannung |
| ε_{0c} : Theoretische zeitabhängige Dehnung ohne Rißanteil | t : Belastungszeit |
| ε_{Bc} : Zeitabhängige Bruchdehnung | t_0 : Bezugszeit für Belastungsvorgang |
| ε_{Rc} : Zeitabhängige durch Risse (Schädigung) bewirkter Anteil an der Bruchdehnung | t_B : Belastungszeit bei Bruch |
| ε_{0Bc} : Zeitabhängige theoretische Dehnung bei Bruch ohne Rißanteil | k_t : Zeitexponent |
| ε_{Gc} : Zeitabhängige Grenzdehnung (Zugbeanspruchung) bei der Risse ein zu berücksichtigendes Ausmaß erreichen | C_t : Kriechfaktor |
| | φ_t : Kriechfaktor |
| | E_{vc} : Zeitabhängiger Verformungsmodul |

$$C_t = \left(\frac{t}{t_0}\right)^{k_t} \quad \varphi_t = C_t - 1 \quad k_t = \frac{\log(\varepsilon_2/\varepsilon_1)}{\log(t_2/t_1)}$$

Bild 5 : Zeitabhängiges Spannungs – Dehnungs – Verhalten für konstante Last (schematische, doppelt-logarithmische Darstellung)

Die theoretische, linear viskoelastische Dehnung ε_0 zur Zeit t_0 wächst mit dem Kriechfaktor C_t auf die Dehnung ε_{0c} bei der Belastungszeit t an

$$\varepsilon_{0c} = \varepsilon_0 \cdot C_t \quad \{42.1\}$$

Mit dem Zeitexponenten k_t [20], der dem Anstieg der Geraden entspricht

$$k_t = \frac{\log(\varepsilon_2 / \varepsilon_1)}{\log(t_2 / t_1)} \quad \{42.2\}$$

wird

$$C_t = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{k_t} \quad \{42.3\}$$

Der Kriechfaktor C_t entspricht dem Abminderungsfaktor A_{11} . Für den Kriechfaktor φ_t , der nur den Verformungszuwachs durch das Kriechen erfaßt, gilt

$$\varphi_t = C_t - 1 \quad \{42.4\}$$

Zur Bestimmung des Zeitexponenten k_t aus Versuchen sollte die erste Bezugszeit mindestens $t_1 = 1$ h betragen. Die Versuchsdauer bis zur Zeit t_2 sollte größer als 1 Dekade sein. Nach eigenen Erfahrungen wird $t_2 = 100$ h empfohlen. In [20] werden $t_1 = 10$ h und $t_2 = 100$ h vorgeschlagen. Die in DIN 18820 Teil 4 zur Bestimmung des Verformungsmoduls gewählten Zeiten $t_1 = 1$ h und $t_2 = 24$ h führen ebenfalls zu ausreichend genauen Ergebnissen.

Es ist sicherer aus einer größeren Anzahl von Versuchsergebnissen mit Zeiten von 1 bis 24 Stunden nach statistischen Methoden [53] die 5% - Quantilen zu ermitteln als aus Versuchsergebnissen geringerer Anzahl mit längeren Versuchszeiten. Wird die erste Bezugszeit kleiner als 1 h (oft üblich 0,1 h) gewählt, so sind die errechneten Zeitexponenten bzw. Kriechfaktoren in einem nicht mehr zu vernachlässigenden Umfang zu gering. Bei kleineren Versuchszeiten zeigt sich ein verzögertes Kriechen (geringerer Anstieg der Zeit - dehnlinien in doppelt - logarithmischer Darstellung) [20, 21, 30, 32, 44, u. a.]. Neben Meßunsicherheiten (Belastungsvorgang, hohe Verformungsgeschwindigkeit - Zeitverzug beim Messen) sind für die scheinbar geringere Kriechneigung hauptsächlich Dehnungs - überhöhungen im Mikrobereich der unvermeidlichen Fehlstellen mit zeitverzögerter Verformungsumlagerung auf den Gesamtquerschnitt maßgeblich. Der Verformungs - ausgleich dauert um so länger, je geringer der Verformungsmodul der Matrix ist [32, 44].

Wenn die Dauerlast konstant ist, gilt

$$\sigma_c = \varepsilon_0 \cdot E_0 \quad \{42.5\}$$

und

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_{0c} \cdot E_0}{C_t} \quad \{42.5\}$$

Mit {37.2} und {42.1} wird die zeitabhängige Gesamtdehnung

$$\varepsilon_c = \varepsilon_B - \left(\frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - \varepsilon_0 \cdot C_t \cdot E_0}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{43.1\}$$

und mit {42.5}

$$\varepsilon_c = \varepsilon_B - \left(\frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - \sigma_c \cdot C_t}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{43.2\}$$

Durch Umstellung erhält man

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon_c)^n}{C_t} \quad \{43.3\}$$

Da beim Erreichen der Bruchdehnung

$$\varepsilon_c = \varepsilon_B \quad \text{und} \quad \sigma_c = \beta_c$$

wird die Zeitstandbruchspannung

$$\beta_c = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R}{C_t} \quad \{44\}$$

Der zeitabhängige Verformungsmodul, der dem "Kriechmodul" entspricht ist

$$E_{vc} = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon_c)^n}{C_t \cdot \varepsilon_c} \quad \{45\}$$

Der Rißanteil an der Dehnung ist (vergleiche {39})

$$f_r = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon_c)^n}{E_0 \cdot \varepsilon_c} \quad \{46\}$$

und da

$$\varepsilon_{0c} = f_r \cdot \varepsilon_c$$

wird mit {43.3} die theoretisch linear viskoelastische Dehnung

$$\varepsilon_{0c} = \varepsilon_B \cdot f_R - \frac{a(\varepsilon_B - \varepsilon_c)^n}{E_0} \quad \{47\}$$

Solange, siehe Bild 5, die Dehnung ε_c unter der Grenzdehnung ε_G bleibt, verhält sich der Werkstoff linear viskoelastisch, die Linien für ε_c und ε_{0c} fallen zusammen. Oberhalb der Grenzdehnung weicht die Gesamtdehnung mit über der Zeit ansteigendem Rißfaktor f_r von der linear viskoelastischen Dehnung ab.

Da der Zeitpunkt $t = t_0$ im Kriechfaktor C_t miterfaßt wird, kann auf die Unterscheidung in den Bezeichnungen zwischen Kurz- und Langzeitbelastung (Index c) verzichtet werden.

$$\varepsilon = \varepsilon_B - \left(\frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - \sigma \cdot C_t}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{48.1\}$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t} \quad \{49.1\}$$

$$E_V = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t \cdot \varepsilon} \quad \{50.1\}$$

$$f_r = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0 \cdot \varepsilon} \quad \{51.1\}$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_B \cdot f_R - \frac{a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0} \quad \{52.1\}$$

$$\varepsilon_0(t_0) = \left(\varepsilon_B \cdot f_R - \frac{a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0} \right) \frac{1}{C_t} \quad \{52.2\}$$

Gleiche Ergebnisse liefern

$$\varepsilon = \varepsilon_B - \left(\frac{\beta - \sigma \cdot C_t}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{48.2\}$$

$$\sigma = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t} \quad \{49.2\}$$

$$E_v = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t \cdot \varepsilon} \quad \{50.2\}$$

$$f_r = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0 \cdot C_t} \quad \{51.2\}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0} \quad \{52.3\}$$

$$\varepsilon_0(t_0) = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0 \cdot C_t} \quad \{52.4\}$$

mit $n = \frac{\varepsilon_B + \varepsilon_G}{\varepsilon_B \cdot f_R + \varepsilon_G}$ und $a = E_0 \cdot f_R \cdot \varepsilon_B^{-n}$

oder $n = \frac{\varepsilon_B + \varepsilon_G}{\frac{\beta}{E_0} + \varepsilon_G}$ und $a = \beta \cdot \varepsilon_B^{-n}$

Die Gleichungen {52.2} und {52.4} geben die theoretisch linear viskoelastische Dehnung zum Zeitpunkt $t = t_0$ an.

Für $t = t_0$ also $C_t = 1$, entsprechen vorstehende Gleichungen denjenigen für konstante Verformungsgeschwindigkeit, vergleiche {36.1, .2}, {37.1, .2}, {38}, {39} und {40}.

Die Verformungsgeschwindigkeit im Kurzzeitversuch zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte β (bzw. f_R), E_0 und ε_B ist so niedrig zu wählen, daß durch weitere Verringerung die Bruchdehnung nicht mehr wesentlich erhöht wird.

Die Zeit t_0 muß unter Berücksichtigung der Versuchsdauer bis zum Bruch so festgelegt werden, daß die Kennwerte für diesen Zeitpunkt ausreichend genau sind.

Bei GF - UP - Laminaten entspricht die üblicherweise verwendete Dehnungsgeschwindigkeit 1 % / min vorstehender Bedingung. In dieser Arbeit wurde $t_0 = 0,015$ h gewählt (5 % - Quantile der Bruchdehnung $\varepsilon_{Bu} = 0,9$ %), wird $t_0 = 0,03$ h wie in [30] (Bruchdehnung $\approx 2,0$ %) angesetzt, sind die Abweichungen vernachlässigbar gering.

Die angegebenen Beziehungen beschreiben das Verhalten von Wirrfaserlaminaten bei einachsiger Zugbeanspruchung mit Werkstoffkennwerten aus Zugversuchen.

Sie können wie in [19] auch für einachsige Druckbeanspruchung verwendet werden. Um Schädigungen, z. B. durch Querverformung, Schubbeanspruchung und vielleicht Knicken der Glasfasern, auszulösen, muß das Laminat unter Druck höher verformt werden als unter Zug. In [21] werden an einem Mattenlaminat etwa 30 % größere Bruchverformungen festgestellt, der Verformungsmodul bei Bruch E_{vB} (siehe Bild 4) ist etwa 10 % größer. Das Laminat bleibt bis zu höheren Verformungen linear viskoelastisch (mehr als doppelt so hoch wie ε_G , nach [21]).

Da bei Wirrfaserlaminaten die interlaminare Scherfestigkeit (Verschiebung von Laminatschichten gegeneinander) von untergeordneter Bedeutung ist, versagen sie unter Biegebeanspruchung, wenn die Bruchdehnung in der gezogenen Randfaser erreicht ist. Die Biegebruchmomente sind jedoch wegen des nicht mehr linearen Verlaufs der Dehnsteifigkeiten über dem Querschnitt höher als bei Annahme linearen Verlaufs errechnet wird. Ebenso ist der Anstieg von Zeitdurchbiegungslinien bei querkraftfreier Biegung nach Überschreiten der Grenzdehnung ε_G in der Zugzone geringer als bei reiner Zugbeanspruchung. Auch für Biegebeanspruchung sind die mit den genannten Beziehungen errechneten Spannungen kleiner als vom wirklichen Werkstoffverhalten zu erwarten.

Ebenso führen bei mehrachsiger Beanspruchung die Formeln bezogen auf die Hauptzugspannung zu sicheren Werten [57, 58, u. a.]. Es ist jedoch sicherlich von großem Interesse, die Verschiebung des Schädigungsbereiches bei Druckbeanspruchung und damit die höhere Beanspruchbarkeit (Spannungen) insbesondere durch den Einfluß mehr oder weniger großer Querverformung zu untersuchen. Wegen der quasiisotropen Anordnung der Faserverstärkung dürften sich Schubbeanspruchungen vergleichsweise gering auswirken.

Nach der Beziehung {44} für die Zeitstandbruchspannung

$$\beta_c = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R}{C_t} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R = \beta$$

(siehe Bild 4) sollten die Abminderungsfaktoren $A_{B1}(K_t)$ und $A_{11}(1 + \varphi_t)$, die in [19] und [26] für festgelegte Zeiten der Dauerlast (z. B. $2 \cdot 10^5$ h) angewendet werden, gleich groß sein. Für ein Laminat mit gleichem Glasgehalt, gleichem Harz und gleichem

Aushärtezustand stimmen bei richtiger Wahl des Zeitpunktes t_0 (siehe Bild 5) diese Werte überein. Da aber die Kenngrößen Bruchdehnung ε_B , Elastizitätsmodul E_0 und damit der Reißfaktor f_R sowie die Grenzdehnung ε_G ebenso wie der Kriechfaktor in unterschiedlicher Weise vom Glasgehalt und den Eigenschaften der Matrix abhängen, können bei der üblichen Auswertung von Zeitstandbruchlinien (Festigkeit) die Zeitspannen zwischen einer gewählten Zeit t_0 und der Zeit t_B bei Erreichen der Bruchdehnung sich für verschiedene Lamine in einem anderen Verhältnis zueinander ergeben, als durch die Kriechfaktoren vorgegeben. Neben der meist nur vergleichsweise geringen Anzahl der Meßwerte, ist sicherlich von Bedeutung wieviel des Reißanteils an der Dehnung ε_r zum Zeitpunkt t_0 schon erreicht wurde und wieviel für die Zunahme durch Kriechen bis zum Erreichen des Reißanteils ε_R bei Bruch noch zur Verfügung steht. Ebenso ist von Einfluß, daß die Größe der wahrscheinlichen Zunahme der Bruchdehnung mit der Lastdauer von der Struktur der Matrix abhängt. Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich, diese Fragen weiter zu untersuchen.

Auch die Überlagerung der Dauerlast mit wechselnden Lasten konnte nicht weiter behandelt werden. Hierbei ist folgendes zu beachten: Die Auswirkung von Lasterhöhungen $\Delta \sigma_i$ mit den zugehörigen ihren Lastdauern entsprechenden C_{ti} auf die entstehende Gesamtdehnung ε kann mit den Beziehungen {47} bis {51} erfaßt und der Bruchdehnung gegenübergestellt werden. Bei Zwischenentlastungen ist zu beachten, daß der einmal entstandene Schädigungsanteil ebenso erhalten bleibt wie ein viskoelastischer Anteil bei nicht ausreichender Entlastungszeit im Vergleich zur Belastungsdauer. Die linear viskoelastischen Verformungsanteile $\Delta \varepsilon_{0i}$ stellen sich vollständig zurück, die notwendigen Entlastungszeiten entsprechen wahrscheinlich etwa den Belastungszeiten. Die jeweiligen Entlastungszeiten können durch "Rückkriechfaktoren" C_{rti} erfaßt werden.

Die sich aus dem Last - Zeit - Kollektiv einstellende Gesamtdehnung darf innerhalb einer vorgegebenen Lebensdauer den Wert der Bruchdehnung nicht erreichen oder im Sinne der Schadensakkumulation ausgedrückt:

Der durch das Last - Zeit - Kollektiv bewirkte Schädigungsfaktor $f_r(\Delta \sigma_i, C_{ti}, C_{rti})$ darf den Bruchdehnungsfaktor f_R nicht überschreiten

$$\frac{f_r(\Delta \sigma_i, C_{ti}, C_{rti})}{f_R} \leq 1 \quad \{53\}$$

Mit Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten z. B. nach [53] γ_{fi} für die Einwirkungen des Last - Zeit - Kollektivs, γ_{sys} für die Modellbildung zur Erfassung der Schnittkräfte in kritischen Querschnitten und γ_m für die Bruchdehnung (bzw. den Reißfaktor f_R) kann ein Bauteil nach vorstehender Bedingung gegen Bruch bemessen werden.

Bei Lastwechseln mit hoher Frequenz ist neben der Auswirkung möglicher Eigenerwärmung auch zu beachten, daß in der Festlegung des Elastizitätsmoduls E_0 schon viskose Anteile enthalten sind, die sich entsprechend der gewählten Verformungsgeschwindigkeit auswirken. Außerdem muß davon ausgegangen werden, daß unvermeidliche Fehlstellen sowie Vorschädigungen von höherem, mit zunehmender Lastspielzahl wachsendem Einfluß sind als bei vorwiegend ruhenden, wechselnden Lasten unterschiedlicher Einwirkdauer [31, 59, 60, 61, 62, u. a.] .

Beim Grenzdehnungsnachweis (ϵ_G), z. B. wegen des Angriffs aggressiver Medien, führen die Formeln {48.1, 48.2, bzw. 49.1, 49.2} zu geringfügig niedrigeren Spannungen, weil die Spannungs - Dehnungs - Linie parabelförmig angenähert wurde. Beachtet man die unvermeidlichen Fehlstellen im Laminat, erscheint dieser Effekt nicht unerwünscht.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise einer Schadensakkumulation geht davon aus, **daß die Abweichung der Dehnung vom linear viskoelastischen Dehnungsanteil ein Maß für die Schädigung ist und daß dieses Maß, der Rißfaktor f_r , genügend genau nur von der entstandenen Dehnung abhängt, unabhängig von dem Belastungs - Zeit - Kollektiv, das die Dehnung bewirkt hat.**

Inwieweit dieser Weg mit der Schadensakkumulation in [35 und 63], die auf Basis der Zeitstandfestigkeitslinie vorgenommen wurde, vergleichbar ist und welche Auswirkungen mögliche Abweichungen haben, bleibt zu untersuchen.

Wegen der relativ hohen Bemessungslasten aus Wind und Schnee nach DIN 1055 Teil 4 und 5 im Vergleich zu den realen Last - Zeit - Kollektiven [63] ist nicht zu erwarten, daß durch die beschriebenen Schädigungen und ihr Anwachsen eine Bemessung nach {30} und {33} entsprechend [26] bei diesen Lasten unsicher wäre. Anders könnte sich die Addition der Schädigungsanteile bei einer Vielzahl gleich hoher Lasterhöhungen auswirken, als Beispiel sei ein Flüssigkeitsbehälter mit häufigen kurzzeitigen Überdrücken genannt.

Eine analoge Akkumulation dehnungsabhängiger Schädigungsanteile für Mischlaminat sollte untersucht werden. Hierbei ist zu beachten, daß senkrecht zur Verstärkungsrichtung beanspruchte Schichten schon bei Dehnungen von etwa 0,1 % vollständig reißen können. Sicherlich sind die Einflüsse aus Querverformung, Schub - (Hauptzugspannung) und interlaminarer Scherbeanspruchung größer als bei Wirrfaserlaminaten. Als Bemessungsgrenze bietet sich die Bruchdehnung der Glasfasern in den Schichten an, die in Richtung der Hauptzugbeanspruchung angeordnet sind. Hinweise hierzu sind in [64] und [65] gegeben.

1.3 Ohne Querkraft aufnehmbares Biegemoment

Profilplatten aus Kunststoffen werden in erster Linie im Wand- und Dachbereich als Flächentragwerke auf Unterkonstruktionen mit zwei (Einfeldträger) oder mehr (Durchlaufträger) linienförmigen Auflagern eingesetzt. Das aufnehmbare Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft ("Feldmoment") kann wie gezeigt in dehnungsbezogener Anwendung der Regelwerke für Stahltrapezprofile ermittelt werden. In Anlehnung an DIN 18807 Teil 1 ist bei einem Trapezprofil ohne Sicken wie folgt vorzugehen (Bezeichnungen siehe Bild 6).

Nach {29.2} mit {29.4} gilt für die wirksame Breite des Druckgurttes

$$b_w = 1,9 \cdot b_p \left(1 - 0,42 / \lambda_p\right) / \lambda_p \leq b_p \quad \{54.1\}$$

mit

$$\lambda_p = \frac{b_p}{t_o} \sqrt{\varepsilon_d} \quad \{54.2\}$$

Dabei darf die errechnete wirksame Breite b_w die Druckgurtbreite b_p nicht überschreiten.

Die wirksame Breite im Steg ist am Druckrand

$$l_{w1} = 0,76 \cdot \frac{t_s}{\sqrt{\varepsilon_d}} \quad \{54.3\}$$

Direkt oberhalb der Dehnungsnulllinie ist die wirksame Breite

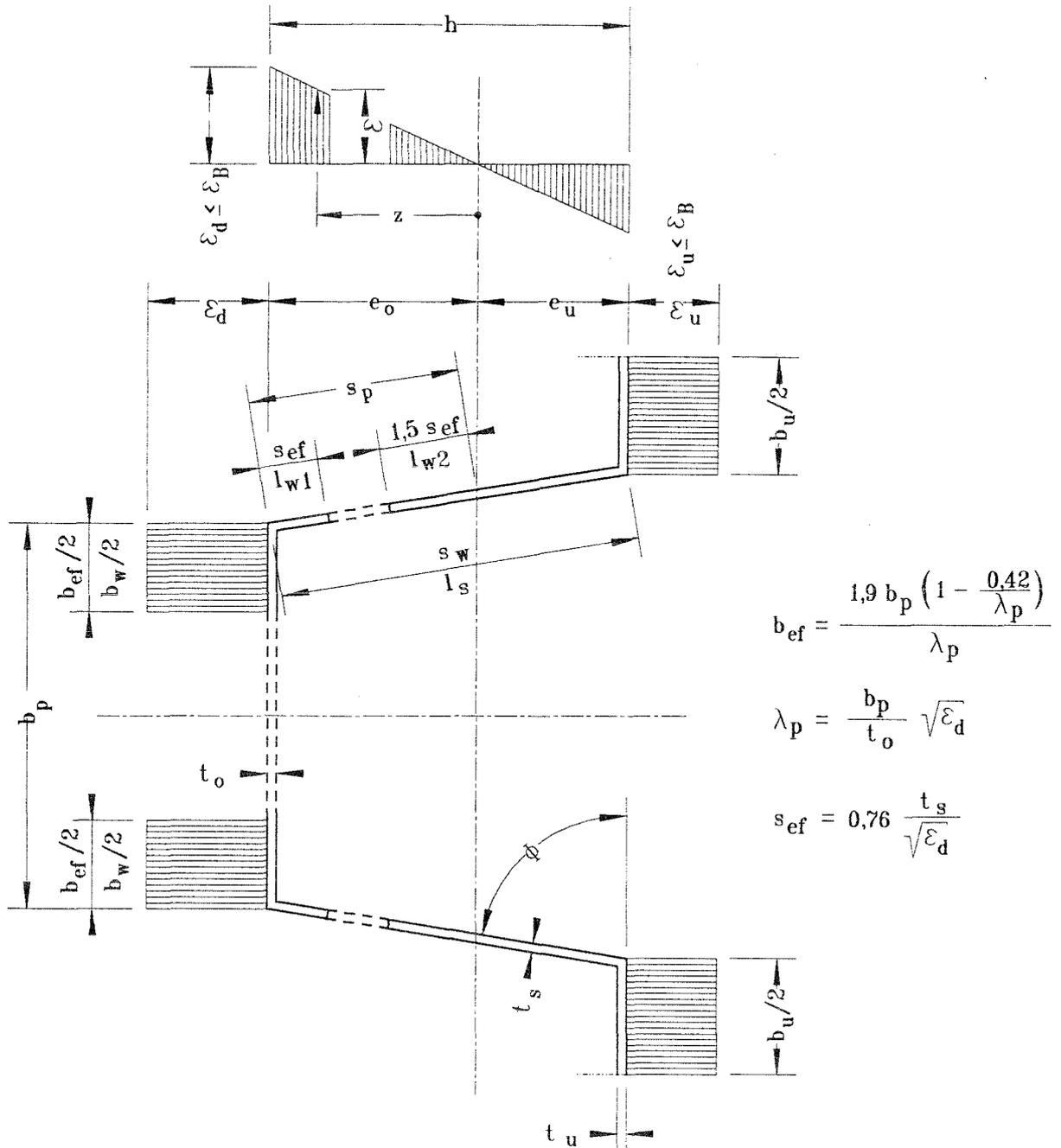
$$l_{w2} = 1,5 \cdot l_{w1} \quad \{54.4\}$$

Die Summe der wirksamen Breiten im Steg darf nicht größer als die wirkliche Breite des Steges s_p zwischen dem Druckrand und der Dehnungsnulllinie sein.

$$\sum l_{wi} \leq s_p \quad \{54.5\}$$

Der Verlauf der Dehnungen über dem Querschnitt ist linear. Da der Verformungsmodul E_v nach {50.1 und 50.2} abhängig von der Dehnung ist, kann nicht mehr im gesamten Verformungsbereich von einer linearen Spannungsverteilung ausgegangen werden.

Nur solange das Werkstoffverhalten linear viskoelastisch ist, also die Grenzdehnung ε_G im Querschnitt nicht überschritten wird, ist auch ein linearer Spannungsverlauf gegeben.



b_w : wirksame Breite des Druckgurtes

l_{wi} : wirksame Breiten im Steg

A_g : Gesamtfläche des Querschnitts

A_w : wirksame Querschnittsfläche, berechnet mit b_w und l_{wi}

I_g : Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grades) des Querschnitts mit der Fläche A_g

I_w : Trägheitsmoment (Flächenmoment 2. Grades), des wirksamen Querschnitts mit der Fläche A_w

W_g : Widerstandsmoment des Querschnitts mit der Fläche A_g

W_w : Widerstandsmoment des wirksamen Querschnitts mit der Fläche A_w

Bild 6 : Mögliche rechnerische Dehnungsverteilung im Trapezprofil ohne Sicken

1.3.1 Rechnungsschritte

Die Rechnung erfolgt in mindestens 4 Schritten für eine vorgegebene Dehnungsgrenze im Druckgurt

- Rechnungsschritt A

Berechnung der Lage 1 der Dehnungsnullinie unter Annahme eines konstanten Verformungsmoduls über dem Querschnitt mit Ansatz des vollen Steges und der wirksamen Breite des Druckgurtes aus der Bedingung

$$\int \varepsilon \cdot dA = 0 \quad ; \quad E_v = \text{const} \quad \{55\}$$

- Rechnungsschritt B

Berechnung der wirksamen Breiten im Steg unter Verwendung der Lage 1 der Dehnungsnullinie

- Rechnungsschritt C

Berechnung der Lage 2 der Dehnungsnullinie unter Berücksichtigung der wirksamen Breiten in Gurt und Steg mit der Bedingung {55} .

- Weitere Berechnungsschritte B_i und C_i

Iterative Berechnung der endgültigen Lage der Dehnungsnullinie entsprechend den Schritten B und C aus der Bedingung

$$\int \varepsilon \cdot E_v \cdot dA = 0 \quad \{56\}$$

- Berechnung des aufnehmbaren Biegemomentes

$$M = \int \varepsilon \cdot E_v \cdot z \cdot dA \quad \{57\}$$

- Überprüfen, daß der vorgegebene Grenzwert der Dehnung im gezogenen Querschnittsteil nicht überschritten wird

1.3.2 Kurzzeitige Belastung

Bei kurzzeitiger Beanspruchung entsprechend der zugrunde gelegten Beschreibung des Werkstoffverhaltens kann mit {50.1 bzw. 50.2} und $C_t = 1$ sowie der Bemessungsdehnung ε_{db} am Druckgurtrand aus dem Trägheitsmoment I_w des wirksamen Querschnitts und dem Abstand e_o des Druckgurtes von der Dehnungsnullinie bzw. dem Widerstandsmoment W_w des wirksamen Querschnitts das aufnehmbare Biegemoment berechnet werden:

$$M(\varepsilon_{db}) = W_w(\varepsilon_{db}) \cdot \varepsilon_{db} \cdot E_v \quad \{58.1\}$$

$$\text{mit} \quad W_w(\varepsilon_{db}) = \frac{I_w(\varepsilon_{db})}{e_o(\varepsilon_{db})} \quad \{58.2\}$$

Mit {50.1 bzw. 50.2} wird aus {58.1} für $C_t = 1$

$$M(\varepsilon_{db}) = W_w(\varepsilon_{db}) \cdot \left[\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \quad \{59.1\}$$

oder

$$M(\varepsilon_{db}) = W_w(\varepsilon_{db}) \cdot \left[\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \quad \{59.2\}$$

Für den Bruchzustand $\varepsilon_{db} = \varepsilon_B$ gilt

$$M_B = W_w(\varepsilon_B) \cdot \varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R \quad \{60.1\}$$

oder

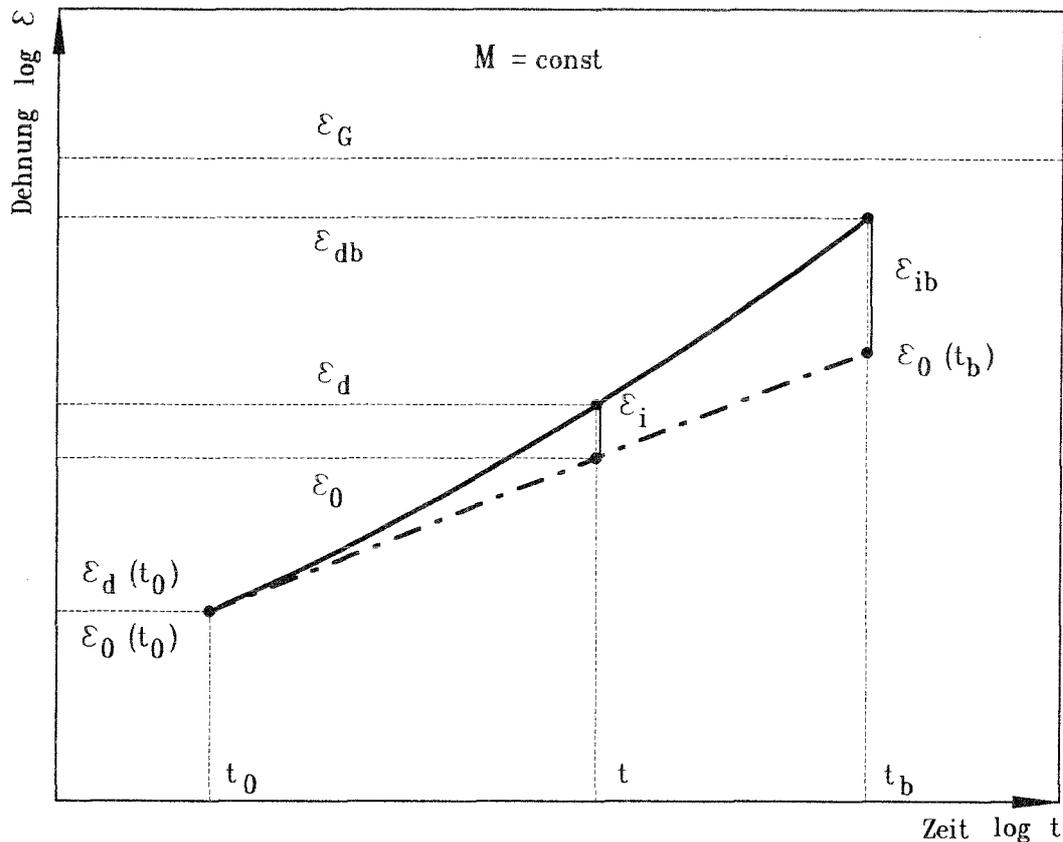
$$M_B = W_w(\varepsilon_B) \cdot \beta \quad \{60.2\}$$

1.3.3 Konstante Dauerbelastung

Bei einer konstanten Dauerbelastung wächst die Dehnung am Druckgurtrand von $\varepsilon_d(t_0)$ beim Zeitpunkt $t = t_0$ auf den Wert ε_{db} zum Bemessungszeitpunkt $t = t_b$ an (Bilder 7 und 8).

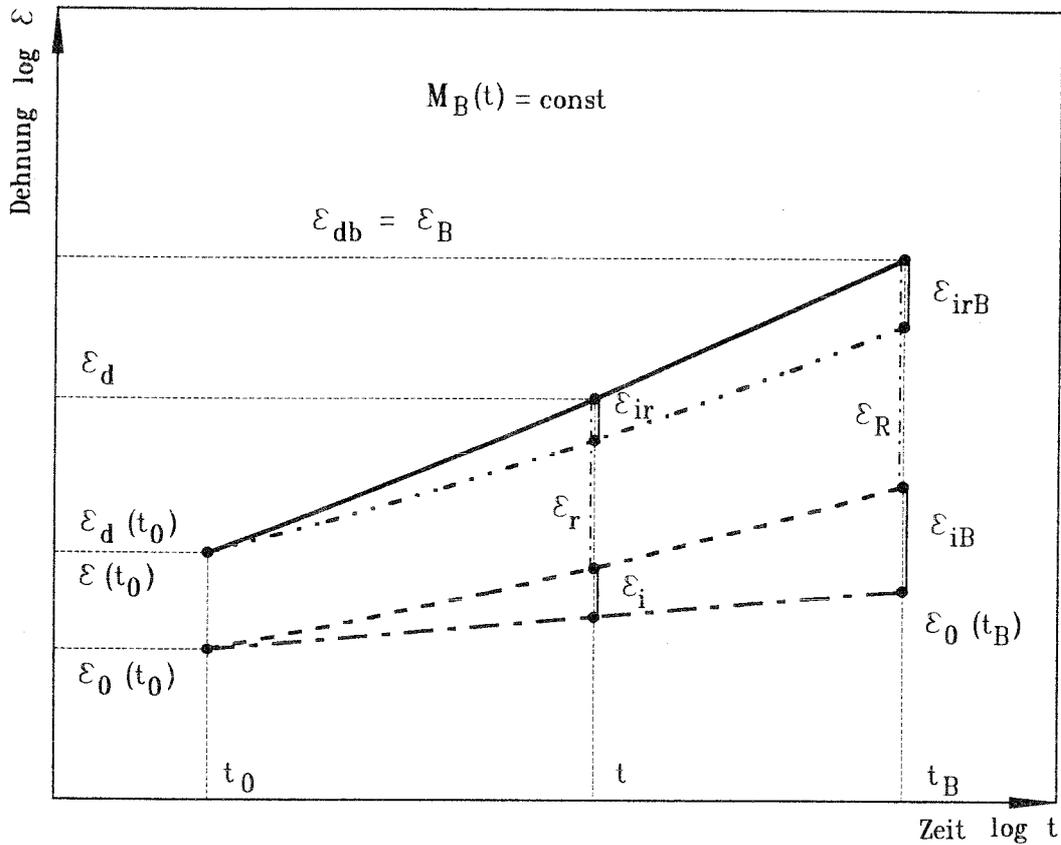
Der Zuwachs der Dehnung setzt sich zusammen aus dem Kriechen des Werkstoffs entsprechend {48.1 bzw. 48.2} von $\varepsilon(t_0)$ auf $\varepsilon(t_b)$ und dem Dehnungszuwachs ε_i , der sich aus der Abnahme des wirksamen Querschnitts mit zunehmender Randdehnung ε_d ergibt.

Durch Iteration analog Theorie II. Ordnung kann das aufnehmbare Moment bestimmt werden.



- M : Zeitstand-Biegemoment
- ε_d : Dehnung (Stauchung) am Rand des Druckgurtes
- ε_{db} : Bemessungsdehnung zum Zeitpunkt t_b
- ε_0 : Theoretische zeitabhängige Dehnung ohne Abnahme der wirksamen Breite
- ε_i : Durch Abnahme der wirksamen Breite zeitabhängig entstehende zusätzliche Dehnung
- ε_G : Grenzdehnung
Dehnung (Zugbeanspruchung) bei der Risse ein zu berücksichtigendes Ausmaß erreichen
- t : Belastungszeit
- t_0 : Bezugszeit für Belastungsvorgang
- t_b : Bemessungszeit

Bild 7 : Zeitabhängiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten im Druckgurt eines Trapezprofils für konstante Last vor dem Überschreiten der Grenzdehnung im Querschnitt (schematische, doppelt-logarithmische Darstellung)



$M_B(t)$: Zeitstand-Bruchmoment

ε_B : Bruchdehnung

ε_d : Dehnung (Stauchung) am Rand des Druckgurtes

ε_{db} : Bemessungsdehnung zum Zeitpunkt t_B

ε_0 : Theoretische zeitabhängige Dehnung ohne Rißanteil und ohne Abnahme der wirksamen Breite

ε_i : Durch Abnahme der wirksamen Breite zeitabhängig entstehende zusätzliche Dehnung ohne Rißanteil

ε_{ir} : Rißanteil der durch Abnahme der wirksamen Breite entstehenden zusätzlichen Dehnung

ε_r : Durch Risse (Schädigung) bewirkter Dehnungsanteil

ε_R : Durch Risse (Schädigung) bewirkter Anteil an der Bruchdehnung

t : Belastungszeit

t_0 : Bezugszeit für Belastungsvorgang

t_B : Belastungszeit bei Bruch

Bild 8 : Zeitabhängiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten im Druckgurt eines Trapezprofils für konstante Last (schematische, doppelt-logarithmische Darstellung)

Indem man das aufnehmbare Moment mit dem wirksamen Querschnitt bei der Bemessungsdehnung ε_{db} berechnet, ist eine sichere Abschätzung möglich. Hierbei wird vereinfacht angenommen, die Spannungserhöhung durch Abnahme der wirksamen Breite mit der Belastungszeit wäre schon zum Zeitpunkt $t = t_0$ eingetreten.

Aus {58.1} wird mit {50.1 bzw. 50.2}

$$M(\varepsilon_{db}) \geq W_w(\varepsilon_{db}) \left[\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{62.1\}$$

oder

$$M(\varepsilon_{db}) \geq W_w(\varepsilon_{db}) \left[\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{62.2\}$$

Für den Bruchzustand $\varepsilon_{db} = \varepsilon_B$ gilt

$$M_B(t) \geq W_w(\varepsilon_B) \cdot \varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{63.1\}$$

oder

$$M_B(t) \geq W_w(\varepsilon_B) \cdot \beta \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{63.2\}$$

Für $t = t_0$, also $C_t = 1$, entsprechen die Beziehungen {62 und 63} denjenigen für Kurzzeitbeanspruchung {59 und 60}.

Wegen der komplexen Beanspruchung im Bruchzustand des gebeulten Druckgurtes mit mehrachsigen, sich überlagernden Druck-, Zug- und Biegebeanspruchungen sollte das Spannungs-Dehnungsverhalten für Zugbeanspruchung zur Bemessung herangezogen werden.

2 Versuche

Zur Kontrolle des Berechnungsverfahrens wurden Traglastversuche an einem Trapezprofil aus wirrfaserverstärktem ungesättigtem Polyesterharz (GF - UP - M) mit kurzzeitiger, stufenförmig gesteigerter Last, mit konstanter Dauerlast und mit stufenförmiger, kurzzeitiger Höherbelastung nach konstanter Dauerlast jeweils bis zum Bruch durchgeführt.

Um das Werkstoffverhalten des Laminates der untersuchten Bauteile (Bild 9) beurteilen und mit den Kennwerten nach DIN 18820 [19] vergleichen zu können, wurden an daraus entnommenen Prüfkörpern Zugversuche vorgenommen. Hierbei wurden gleiche Belastungsarten wie bei den Bauteilversuchen gewählt. Zusätzlich wurde in Kurzzeit - Zugversuchen die Belastung mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch gesteigert.

2.1 Werkstoffe der Bauteile

Die Trapezprofile (Typ: 183 / 40) wurden im industriellen, kontinuierlichen Verfahren hergestellt von der Fa. SCOBALITWERK, Andernach.

2.1.1 Baustoffkomponenten

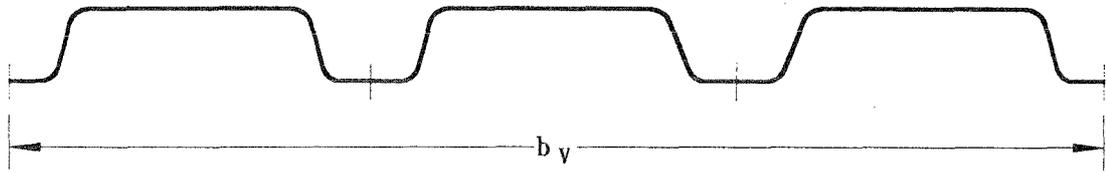
Folgende Baustoffkomponenten wurden verwendet:

2.1.1.1 Reaktionsharz (RH)

Das Reaktionsharz Palatal P 67 - 01 KR kann nach den Angaben des Herstellers, BASF AG, Ludwigshafen, im optimal ausgehärteten Zustand als Gießharzformstoff DIN 16946 - FS 1140 eingeordnet werden [66]. Es ist ein mittelviskoses, hochreaktives ungesättigtes Polyesterharz auf Basis von Orthophthalsäure und Standardglykol, es entspricht der Gruppe 1 nach DIN 18820, Teil 1, Tabelle 1. Der Styrol - Massenanteil beträgt 35 % - 39 %, bei der Herstellung der Profile werden etwa 5 % zugegeben. Der Zug - E - Modul (E_0) bei Normalklima DIN 50014 - 23/50 - 2 ist mit 4500 N/mm^2 vergleichsweise hoch, als Zugfestigkeit wird 95 N/mm^2 und als Zug - Bruchdehnung 2,7 % angegeben.

2.1.1.2 Verstärkungswerkstoffe

Verstärkt wurden die Lamine mit dem Roving aus E - Glas Typ 487 PR - 2400 tex der Owens - Corning FIBERGLAS GmbH, Wiesbaden, der mit Schnittlängen zwischen 30 mm und 50 mm verarbeitet wurde.



$$l_V = 2000$$

Laminat : GF-UPi-M

	o	u	m	
h (mm)	42,19	39,73	40,95	
t _o (mm)	1,09	0,97	1,03	
t _u (mm)	1,07	0,88	0,97	
t _s (mm)	1,12	0,94	1,03	
t _{ro} (mm)	1,26	0,85	1,04	
t _{ru} (mm)	0,97	0,85	0,91	
b _o (mm)	121,97	118,06	120,00	
b _u (mm)	46,57	43,48	45,00	
b _v (mm)	565,10	556,03	560,55	
R (mm)	10,71	8,95	9,80	
Φ (°)	79,64	76,19	77,90	
Ψ	Obergurt	0,282	0,209	0,243
		m _G (g/m ²)	402	302
V _G	0,164	0,117	0,138	
Ψ	Untergurt	0,276	0,218	0,246
		m _G (g/m ²)	416	252
V _G	0,160	0,122	0,140	

m : Mittelwerte

o, u : 95 % -, 5 % - Quantilen

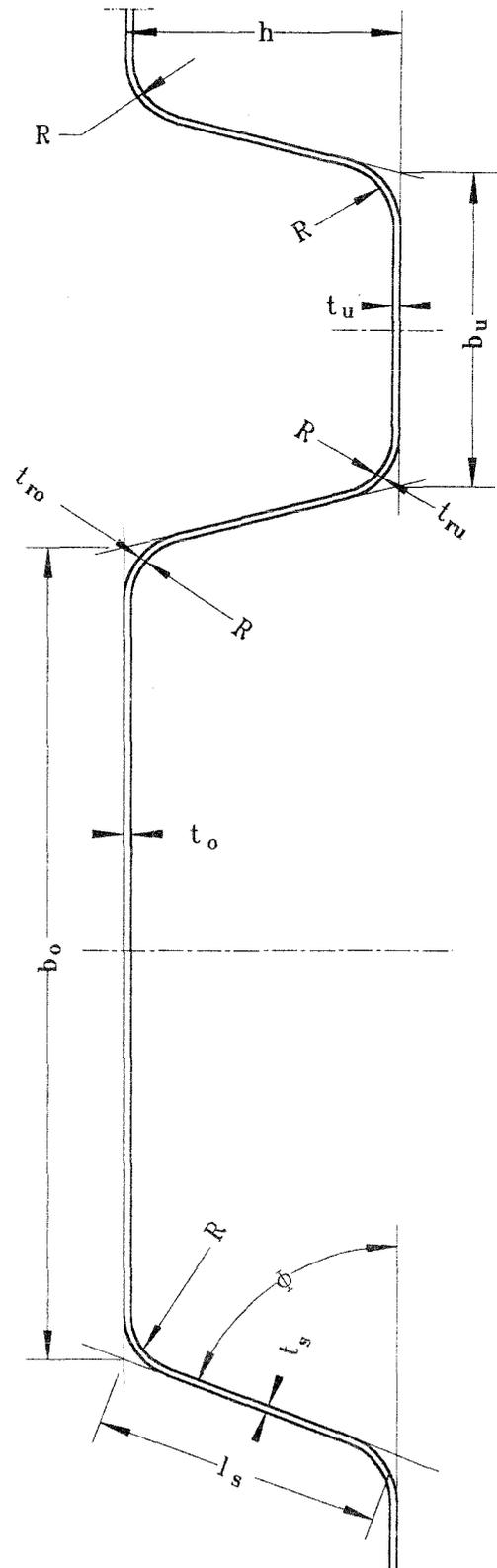


Bild 9 : Prüfkörper für Traglastversuche
Trapezprofil 183/40

2.1.1.3 Reaktionsmittel

Zur Aushärtung wurde ein cobaltbeschleunigtes System in Kombination mit einer Ketonperoxid - Zubereitung verwendet.

"Kobaltoctoat in Xylol mit 10 % Kobalt (PERGAQUICK C 100) und Methylethyl - ketonperoxid, 47 % ig , in Phthalatweichmacher (PEROXAN ME 50 L)" der PERGAN GmbH, Bocholt.

2.1.2 Herstellung

Zwischen zwei Folien aus linearem Polyester der Dicke 30 µm wird auf einer kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 6,5 m/min laufenden Anlage die mit den geschnittenen Fasern verstärkte Reaktionsharzmasse nach dem Gelieren in das vorgesehene Profil geformt und anschließend durch einen 100 m langen Heizkanal mit einer Temperatur von 60° C bis 70° C transportiert. Auf dieser Heizstrecke härten die Lamine durch. Unter Gelieren versteht man einen Zwischenzustand der Aushärtung, bei dem die Matrix noch plastisch verformbar ist.

Die beiden thermoplastischen Folien aus Polyterephthalat (PTP), "Melinex" der ICI, verbinden sich fest mit dem GF - UP - Laminat . Wegen ihrer geringen Dicke wurden sie bei der Auswertung der Versuchsergebnisse nicht besonders berücksichtigt, sondern mit zur Matrix hinzugerechnet.

2.1.3 Laminatdicken

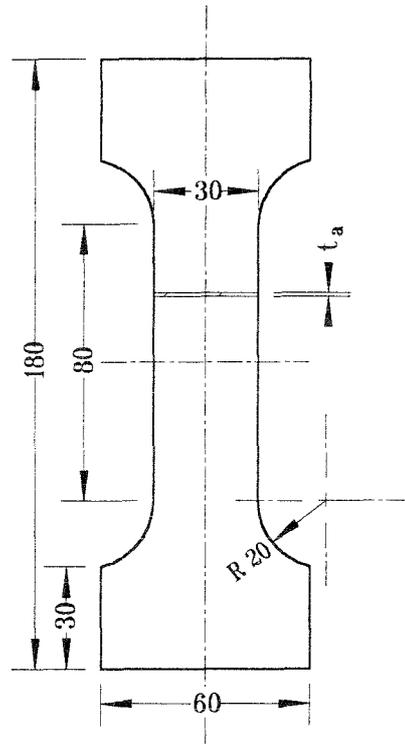
Die Laminatdicken des Profils (Bild 9) zeigten einen offensichtlich herstellbedingten Unterschied zwischen Ober - und Untergurt , während die Stegdicken derjenigen des Obergurtes, jedoch mit etwas größerer Streuung, entsprachen.

Die Prüfkörper für die Zugversuche (Bild 10) wurden aus den Obergurten entnommen.

2.1.4 Glasmasse und Glas - Anteile

Die flächenbezogene Glasmasse wurde durch Veraschung nach DIN EN 60 [67] an Prüfkörpern der Abmessungen 30 x 40 mm² aus dem Obergurt (einschließlich der Zug - Prüfkörper) und dem Untergurt ermittelt.

Prüfkörper
der Zugversuche



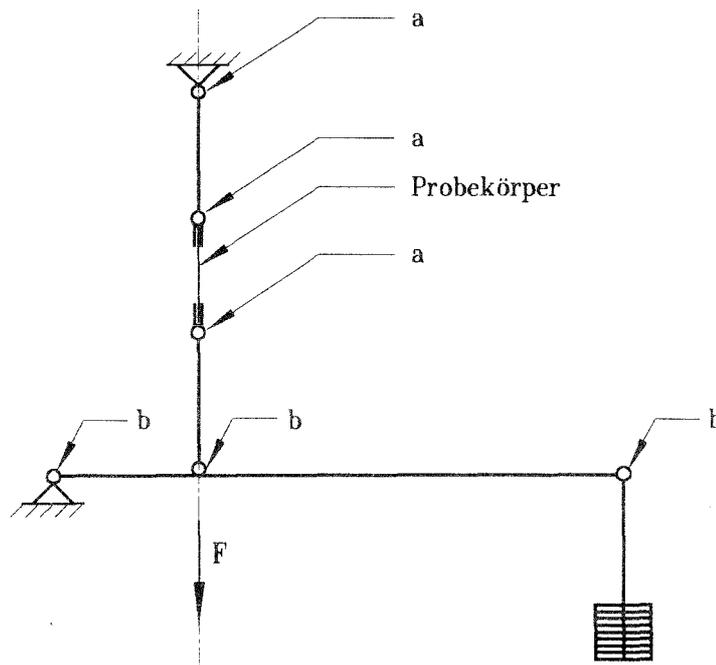
Laminat : GF-UP1-M

	o	u	m
t_a (mm)	1,13	0,91	1,02
ψ	0,269	0,206	0,236
m_G (g/m ²)	391	292	338
V_G	0,155	0,115	0,134

m : Mittelwerte

o, u : 95 % -, 5 % - Quantilen

Aufbau der
Zeitstand - Zugversuche
(schematisch)



a : Gelenke

b : Schneidenlager

Bild 10 : Prüfkörper der Zugversuche
Aufbau der Zeitstand - Zugversuche

Die Glasmassen je Flächeneinheit m_G und die Glas - Massenanteile ψ entsprechen bei vereinfachter Annahme der Dichte der Matrix mit $\rho_{RH} = 1,25 \text{ g/cm}^3$ und des Glases mit $\rho_G = 2,5 \text{ g/cm}^3$ nach DIN 18820 Teil 2

$$V_G = \frac{\psi}{2 - \psi}$$

den angegebenen Volumenanteilen V_G .

Die Streuung der Glasmasse, sowohl absolut als auch als Anteil ist wegen der geringen Laminatdicke von etwa 1 mm vergleichsweise größer als in DIN 18820 vorausgesetzt. Bei größeren Laminatdicken ist der Unterschied zwischen den 5 % - Quantilen und den Mittelwerten merklich geringer. Die Kennwerte in DIN 18820 gelten erst für Lamine von mindestens 3 mm Dicke.

2.2 Statistische Auswertung

Die Ergebnisse der Versuche wurden nach [53] statistisch ausgewertet. Es wurde eine logarithmische Normalverteilung der Werte vorausgesetzt. Abhängig von der jeweiligen Anzahl der Versuchsergebnisse wurden die 5 % - und 95 % - Quantilen (Fraktile) für unbekannte Standardabweichung der Grundgesamtheit mit einer 75 % igen Aussage - wahrscheinlichkeit errechnet. Mit den Indices o und u sind die jeweiligen oberen und unteren Quantilen gekennzeichnet.

Den geometrischen Angaben in Bild 9 und 10 liegen jeweils mindestens 54 Meßwerte zugrunde (mindestens 3 an 18 Profilplatten). Die Dicken von Ober - und Untergurt sowie Steg wurden mindestens 5 mal je Profilplatte (insgesamt mindestens 90 Werte) gemessen.

Für die Glasmassenprüfung wurden jeweils mindestens 27 Proben aus Ober - und Untergurt (mindestens 3 pro geprüfter Profilplatte) entnommen. Zusätzlich wurden 10 Werte an Zug - Prüfkörpern bestimmt.

2.3 Werkstoffverhalten bei Zugbeanspruchung

Die Zugversuche wurden (siehe DIN EN 61, [67]) bei Normalklima DIN 50014 - 23/50 - 2 durchgeführt.

Die Prüfkörper (Bild 10) wurden mit einer Diamant - Trennscheibe unter Wasserzugabe aus den Profilplatten entnommen, anschließend wurde mit einer Schablone die Schulterform herausgefräst (diamantbesetztes Werkzeug). Wie nach der Erfahrung aus der Prüfung von Wirrfaserlaminaten erwartet, traten bei dieser Probenform keine Einspannbrüche auf.

In einer dehnungsgeregelten Zug - Prüfmaschine wurden 5 Prüfkörper mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 1 % / min bis zum Bruch belastet. Die Dehnung wurde mit beidseitigen Setzdehnungsgebern (induktive Wegaufnehmer, Meßlänge 50 mm) gemessen und als Funktion der Spannung aufgezeichnet.

Bei den Versuchen in der Vorrichtung für Zeitstandzugversuche wurden die Dehnungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) von 13 mm Länge und 6 mm Breite erfaßt. Nicht vermeidbare geringfügige Temperatureinflüsse wurden durch Brückenschaltung mit DMS auf einem unbelasteten Prüfkörper ausgeglichen. Um bei aller Sorgfalt in der Prüfkörpereinspannung nicht vermeidbare Biegeeinflüsse zu berücksichtigen, wurden je Prüfkörper 2 DMS einander gegenüber liegend in der Mitte der Meßlänge angebracht. Die Ergebnisse sind Mittelwerte beider DMS. Die Steifigkeit und Festigkeit von DMS und Klebstoff ist im Vergleich zum Laminat so gering, daß ihr Einfluß vernachlässigt werden kann.

2.3.1 Versuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit

Aus den Meßschrieben der einzelnen Prüfkörper wurden die Dehnungen bei den jeweiligen Spannungen in der Stufung von 5 N/mm² herausgemessen. In Bild 11 sind die ermittelten Dehnungen der Prüfkörper mit kleinster und größter Bruchdehnung als Funktion der Spannung aufgetragen.

Die Bruchdehnungen ϵ_{Bj} wurden direkt aus dem Meßschrieb entnommen.

Die Tangente der Kurven bei der Dehnung $\epsilon_{vj} = 0$ wurde durch lineare Regression der ersten 5 Werte (weniger als 0,3 % Dehnung) bestimmt.

Die Spannungen wurden um die versuchsbedingte Abweichung am Beginn der aufgenommenen Spannungs - Dehnungs - Linien korrigiert (Schnittpunkt der Tangente mit der σ - Achse, Anfangsfehler etwa 1,5 N/mm²). Aufgetragen sind in Bild 11 die korrigierten Spannungen σ_{kj} über den gemessenen Dehnungen ϵ_{vj} .

Der Anstieg der Tangente entspricht dem Verformungsmodul E_{v0} bzw. dem rechnerischen Elastizitätsmodul E_0 in den Beziehungen zur Erfassung des Spannungs - Dehnungs - Verhaltens {48 bis 52}.

Aus den Meßwerten E_{0j} , E_{Bj} und β_{kj} wurden die Bruchdehnungsfaktoren f_{Rj} bestimmt und mit der Grenzdehnung ϵ_G die Spannungs - Dehnungs - Linien nach {49.1} errechnet. Die Grenzdehnung wurde mit $\epsilon_{Gj} = 0,4$ % angenommen. Wie zu sehen ist, kann trotz starker Unterschiede zwischen den Prüfkörpern das Spannungs - Dehnungs - Verhalten mit {49.1} äußerst gut angenähert werden.

Aus den Einzelwerten aller Prüfkörper wurden die Mittelwerte und 5 % - Quantilen errechnet (Bilder 12 bis 15) .

Wenn der Verformungsmodul E_{v0} der einzelnen Kurven statistisch ausgewertet wird, sind geringe Unterschiede gegenüber den Tangenten der statistisch ermittelten Kurven festzustellen, da Meß - und Auswertungenauigkeiten sich anders auswirken.

Die Spannungs - Dehnungs - Linien nach {49.1} sind im Vergleich zu den einzelnen Meßwerten in Bild 13 und im Vergleich zu den statistischen Werten in Bild 14 dargestellt. Die statistische Auswertung war natürlich nur möglich für Dehnungsbereiche in denen noch kein Prüfkörper gebrochen war. Die Umkehr von {49.1} entsprechend {48.1} zeigt Bild 16 .

Die für das Laminat errechneten Verformungsmoduln {50.1} (Sekante der Spannungs - Dehnungs - Linie) und Tangentenmoduln sind im Vergleich zu den Elastizitätsmoduln in Bild 16 wiedergegeben, das Verhalten des Reißfaktors {51.1} in Bild 17 .

Wie auch aus dem Vergleich der gemessenen mit den errechneten Dehnungen in Bild 18 der für Bemessungen maßgeblichen 5 % - Quantile hervorgeht, sind die Beziehungen {48.1} bis {51.1} sehr gut geeignet, das Spannungs - Dehnungs - Verhalten für kurzzeitige Beanspruchung mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit zu beschreiben. Bei kleinen Dehnungen wird der Verformungsmodul geringfügig unterschätzt. In diesem Bereich ist jedoch die Erfassung der Meßwerte nur mit größeren relativen Fehlern möglich, außerdem wirken sich unvermeidbare Fehler in der Herstellung ebenfalls stärker aus.

Nach den Glas - Massenanteilen entspräche das Laminat DIN 18820 - GF - UP1 - M1 - 1 - 20 . Mittelwert und 5 % - Quantile des Elastizitätsmoduls E_0 sind höher (8492 N/mm² bzw. 6663 N/mm² im Vergleich zu 6800 N/mm² bzw. 5500 N/mm²) . Wegen der größeren Streuung der Glasmassen, sind die Unterschiede zwischen Mittelwert und 5 % - Quantile größer als üblich:

$$\frac{E_{0u}}{E_{0m}} = 0,78 \quad ; \quad \frac{\varepsilon_{Bu}}{\varepsilon_{Bm}} = 0,73 \quad ; \quad \frac{\beta_u}{\beta_m} = 0,64$$

Die Werte des Elastizitätsmoduls und der Bruchdehnung streuen geringer als diejenigen der Bruchspannung. Die 5 % - Quantile der Bruchspannung unterschreitet wegen der größeren Streuung mit 56,8 N/mm² geringfügig den Normwert von 60 N/mm² .

$$\sigma_e(\epsilon) := \epsilon_{B_j} \cdot 10^{-2} \cdot E_{\sigma_j} \cdot f_{R_j} - a_{k_j} \cdot \left[(\epsilon_{B_j} - \epsilon) \cdot 10^{-2} \right]^{n_j}$$

$$n_j := \frac{\epsilon_{B_j} + \epsilon_{G_j}}{f_{R_j} \cdot \epsilon_{B_j} + \epsilon_{G_j}} \quad a_{k_j} := E_{\sigma_j} \cdot f_{R_j} \cdot (\epsilon_{B_j} \cdot 10^{-2})^{1-n_j}$$

Verformungsmodul E_{V0} (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Grenzdehnung (%)
$E_{\sigma_0} = 7228$	$\epsilon_{B_0} = 1$	$f_{R_0} = 0.943$	$\epsilon_{G_0} = 0.4$
$E_{\sigma_1} = 8915$	$\epsilon_{B_1} = 1.4$	$f_{R_1} = 0.819$	$\epsilon_{G_1} = 0.4$

Versuch Nr.: Z.0

Zugspannung
(N/mm²)

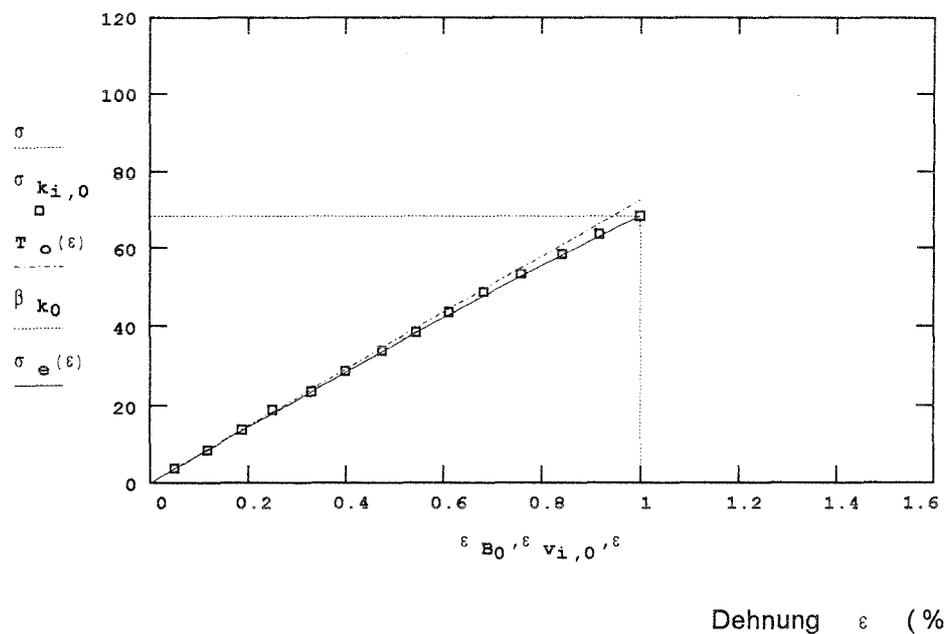
Meßwerte

Tangente (E_{V0})

Bruchspannung

Näherungskurve

$\beta_{k_0} = 68.158$



Dehnung ϵ (%)

Versuch Nr.: Z.1

Zugspannung
(N/mm²)

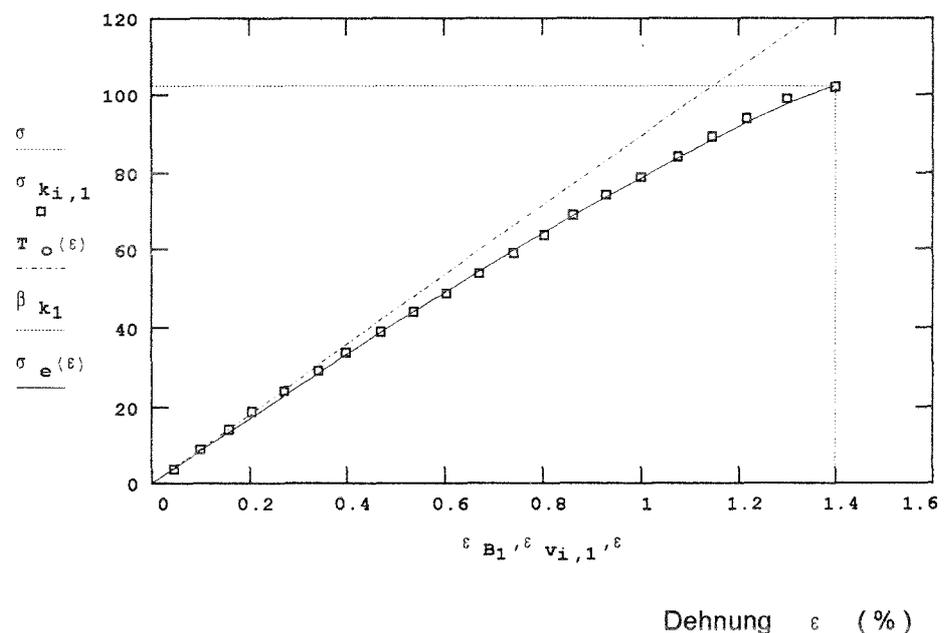
Meßwerte

Tangente (E_{V0})

Bruchspannung

Näherungskurve

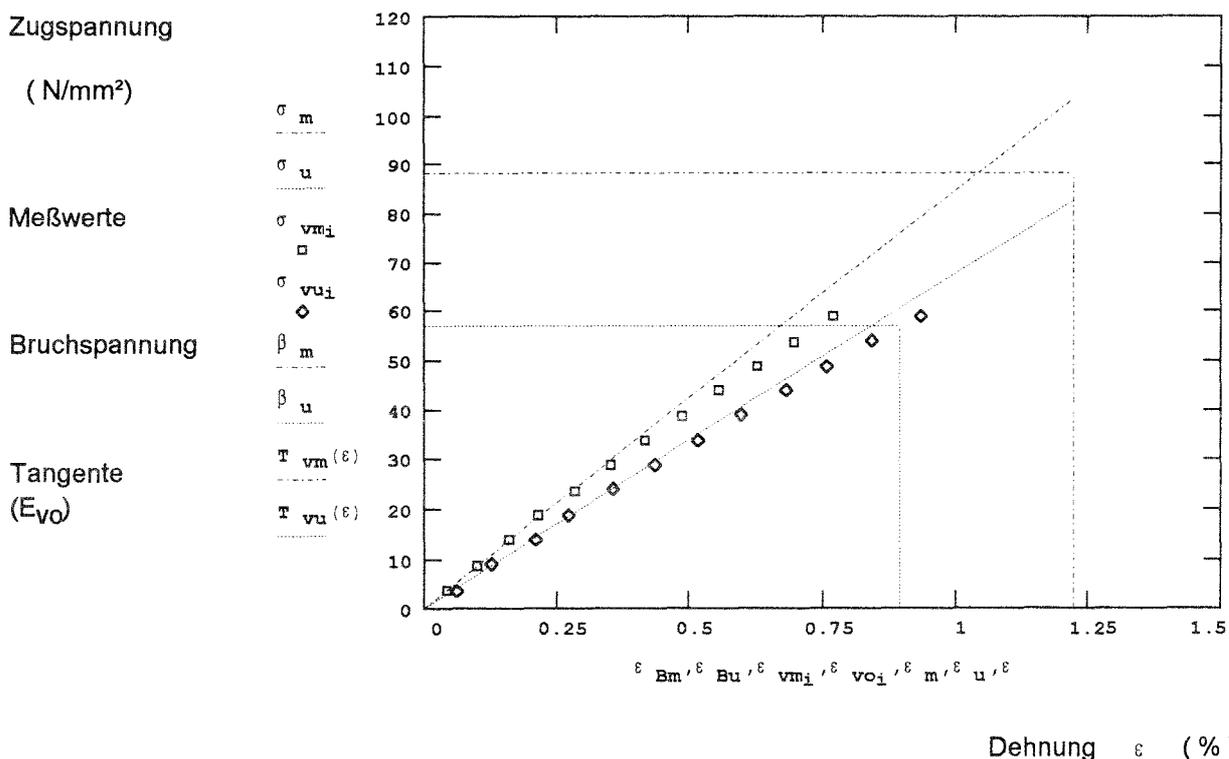
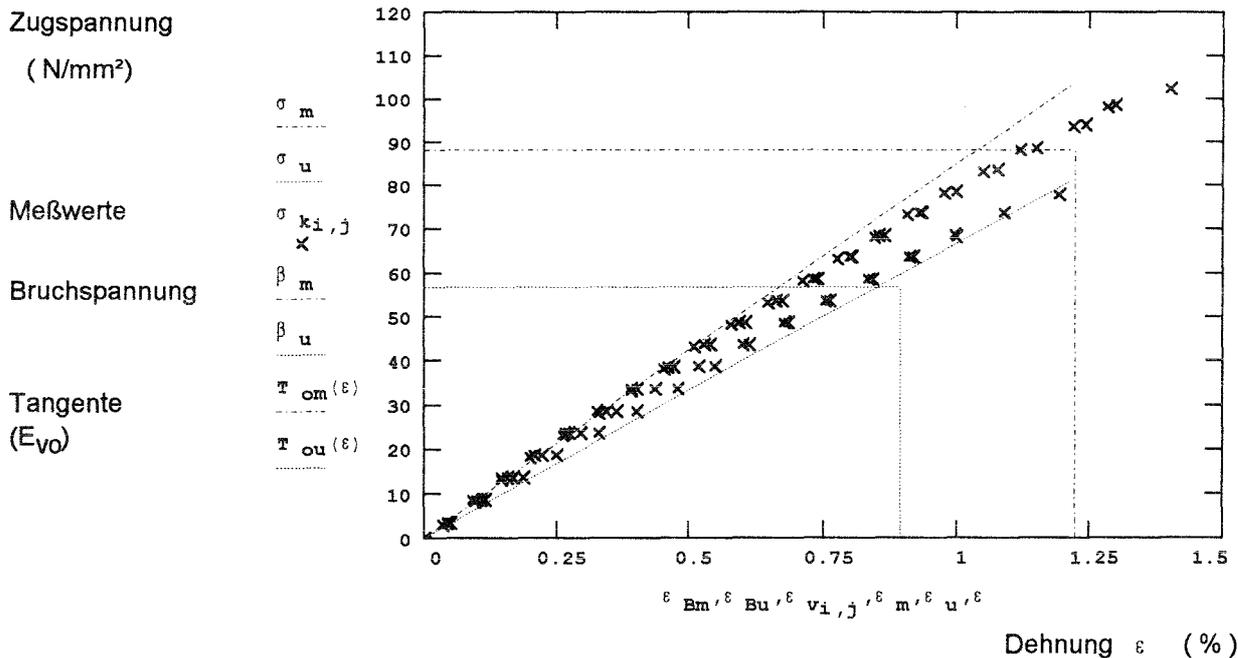
$\beta_{k_1} = 102.2$



Dehnung ϵ (%)

Bild 11 : Spannungs-Dehnungs-Linien der Prüfkörper mit kleinster und größter Bruchdehnung

Verformungsmodul E_{VO} (N/mm ²)		Bruchdehnung (%)	Bruchspannung (N/mm ²)
einzelne Linien	statistische Linien		
$E_{om} = 8492$	$E_{vom} = 8462$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$\beta_m = 88.1$
$E_{ou} = 6663$	$E_{vou} = 6752$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$\beta_u = 56.8$



Versuche Nr.: Z.0 - Z.4
 m : Mittelwert
 u : 5%-Quantile

Bild 12 : Verformungsmodul E_{VO} als Elastizitätsmodul (Tangente) ausgewertet aus einzelnen oder statistischen Spannungs-Dehnungs-Linien

$$\sigma(\epsilon) := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon) \cdot 10^{-2}]^n \quad \epsilon \leq \epsilon_B$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

$$\beta := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$$

Grenzdehnung (%)

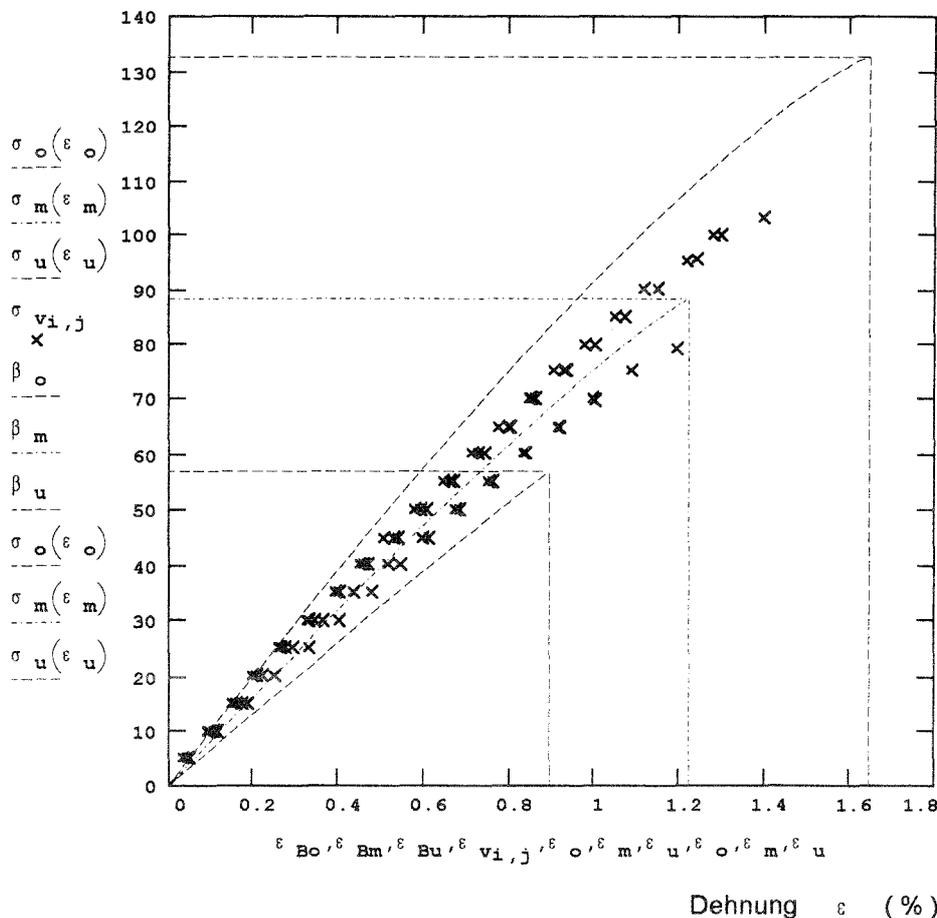
$$\epsilon_G = 0.4$$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Bruchspannung (N/mm ²)
E _{om} = 8492	ε _{Bm} = 1.222	f _{Rm} = 0.84939	β _o = 132.7
E _{ou} = 6663	ε _{Bu} = 0.895	f _{Ru} = 0.9522	β _m = 88.1
E _{oo} = 10744	ε _{Bo} = 1.649	f _{Ro} = 0.74909	β _u = 56.8

Zugspannung
(N/mm²)

Meßwerte

Näherungslinien



Versuche Nr.: Z.0 - Z.4
 m : Mittelwert
 o,u : 95%-, 5%-Quantile

Bild 13 : Rechnerische Spannungs-Dehnungs-Linien im Vergleich zu einzelnen Meßwerten

$$\sigma(\epsilon) := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_O \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon) \cdot 10^{-2}]^n \quad \epsilon \leq \epsilon_B$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_O \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

$$\beta := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_O \cdot f_R$$

Grenzdehnung (%)

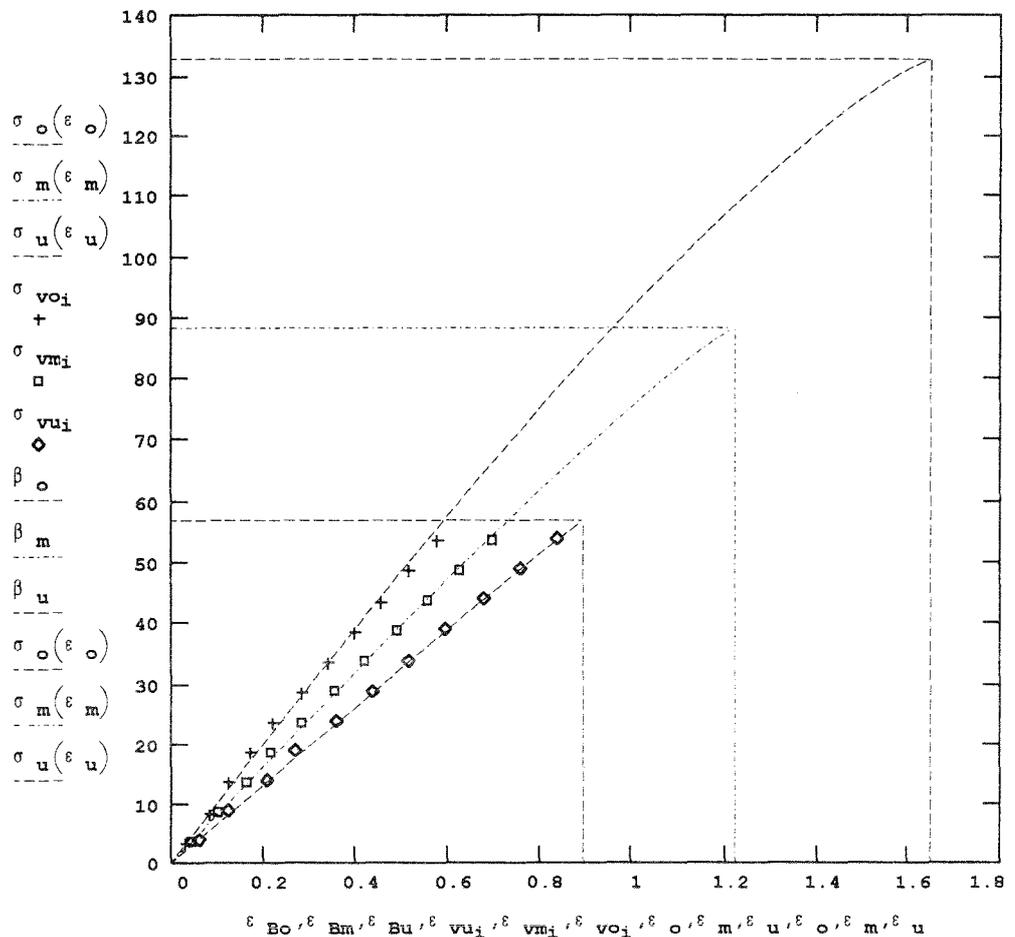
$$\epsilon_G = 0.4$$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Bruchspannung (N/mm ²)
E _{om} = 8492	ε _{Bm} = 1.222	f _{Rm} = 0.84939	β _m = 88.1
E _{ou} = 6663	ε _{Bu} = 0.895	f _{Ru} = 0.9522	β _u = 56.8
E _{oo} = 10744	ε _{Bo} = 1.649	f _{Ro} = 0.74909	β _o = 132.7

Zugspannung
(N/mm²)

Meßwerte

Näherungslinie



Dehnung ε (%)

Versuche Nr.: Z.0 - Z.4
 m : Mittelwert
 o,u : 95%-, 5%-Quantile

Bild 14 : Rechnerische Spannungs-Dehnungs-Linien im Vergleich zu gemessenen Linien

$$\epsilon(\sigma) := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2 \quad \%$$

$$\sigma \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R \quad \beta := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G}$$

$$a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung (%)

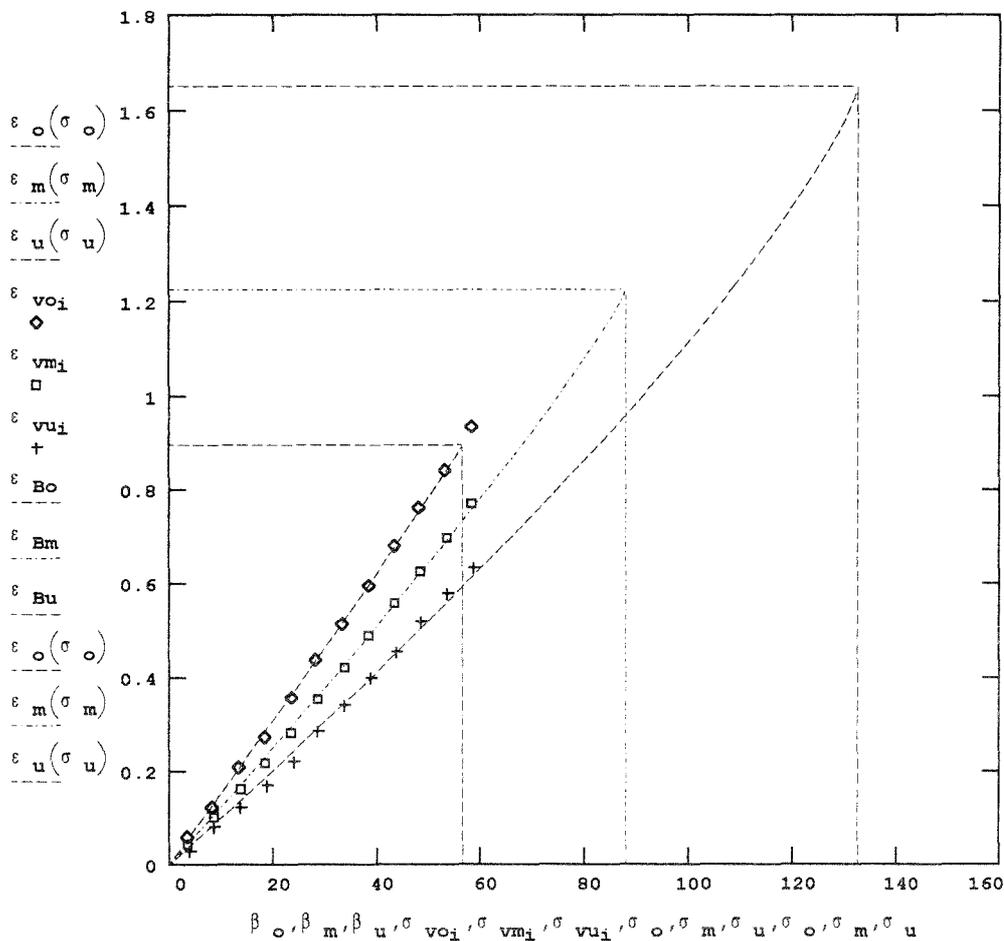
$$\epsilon_G = 0.4$$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Bruchspannung (N/mm ²)
E _{om} = 8492	ε _{Bm} = 1.222	f _{Rm} = 0.84939	β _m = 88.1
E _{ou} = 6663	ε _{Bu} = 0.895	f _{Ru} = 0.9522	β _u = 56.8
E _{oo} = 10744	ε _{Bo} = 1.649	f _{Ro} = 0.74909	β _o = 132.7

Dehnung
ε (%)

Meßwerte

Näherungslinie



Spannung σ N/mm²

Versuche Nr.: m : o,u :
Z.0 - Z.4 Mittelwert 95%-, 5%-Quantile

Bild 15 : Rechnerische Dehnungs-Spannungs-Linien im Vergleich zu gemessenen Linien

$$E_v(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_0 \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon \cdot 10^{-2}} \quad \epsilon \leq \epsilon_B$$

Tangentenmodul

$$\beta := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_0 \cdot f_R$$

$$E_{vt}(\epsilon) := n \cdot a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon) \cdot 10^{-2}]^{n-1}$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G}$$

$$a := E_0 \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung (%)

$$\epsilon_G = 0.4$$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Bruchspannung (N/mm ²)
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$\beta_m = 88.1$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$\beta_u = 56.8$

$$E_{vm}(0.001) = 8136$$

$$n_m = 1.12799$$

$$n_u = 1.03416$$

$$E_{vu}(0.001) = 6561$$

$$a_m = 12675$$

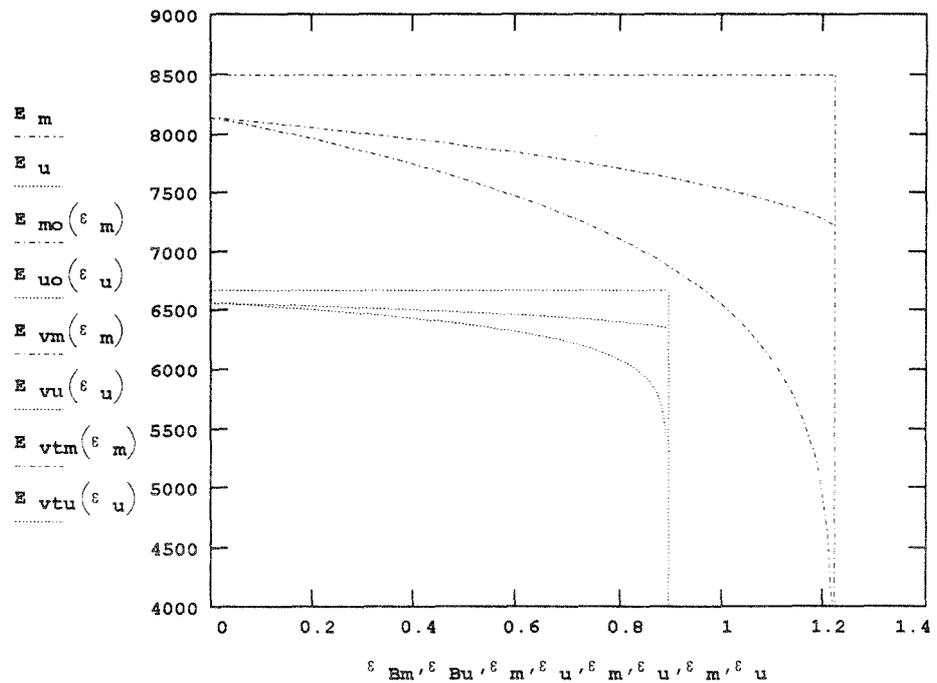
$$a_u = 7454$$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

E-Modul E_0

Verformungsmodul E_v

Tangentenmodul E_{vt}



Versuche Nr.:
Z.0 - Z.4

m :
Mittelwert

u :
5%-Quantile

Dehnung ϵ (%)

Bild 16 : Vergleich der Abhängigkeit von Verformungsmodul und Tangentenmodul von der Dehnung

Verformungsmodul

$$E_v(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_0 \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon \cdot 10^{-2}}$$

$$\epsilon \leq \epsilon_B$$

Rißfaktor

$$\beta := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_0 \cdot f_R$$

$$f_r(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_0 \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon \cdot 10^{-2} \cdot E_0}$$

Grenzdehnung (%)

$$\epsilon_G = 0.4$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G}$$

$$a := E_0 \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Bruchspannung (N/mm ²)
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$\beta_m = 88.1$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$\beta_u = 56.8$
$n_m = 1.128$	$a_m = 12675$	$f_{rm}(0.01) = 0.958$	$f_{ru}(0.01) = 0.985$
$n_u = 1.0342$	$a_u = 7454$	$f_{rm}(0.4) = 0.936$	$f_{ru}(0.4) = 0.976$

Rißfaktor

f_r

Elastizitätsmodul (N/mm²)

Rißfaktor

E-Modul E_0

Verformungsmodul E_v

E_m

E_u

$f_{rm}(\epsilon_m)$

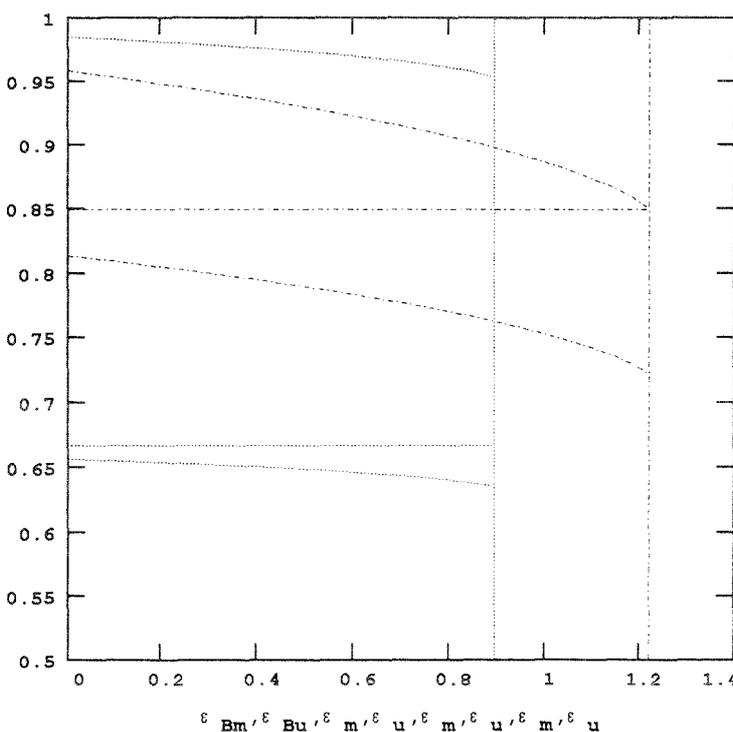
$f_{ru}(\epsilon_u)$

$E_{om} \cdot 10^{-4}$

$E_{ou} \cdot 10^{-4}$

$E_{vm}(\epsilon_m) \cdot 10^{-4}$

$E_{vu}(\epsilon_u) \cdot 10^{-4}$



Versuche Nr.:
Z.0 - Z.4

m :
Mittelwert

u :
5%-Quantile

Dehnung ϵ (%)

Bild 17 : Abhängigkeit des rechnerischen Rißfaktors von der Dehnung
Verformungsmodul im Vergleich zum Elastizitätsmodul

$$\epsilon(\sigma) := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2 \quad \%$$

$$\sigma \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R \quad \beta := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G}$$

$$a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung (%)

$$\epsilon_G = 0.4$$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

Bruchdehnung (%)

Bruchdehnungsfaktor

Bruchspannung (N/mm²)

$$E_{ou} = 6663$$

$$\epsilon_{Bu} = 0.895$$

$$f_{Ru} = 0.9522$$

$$\beta_u = 56.8$$

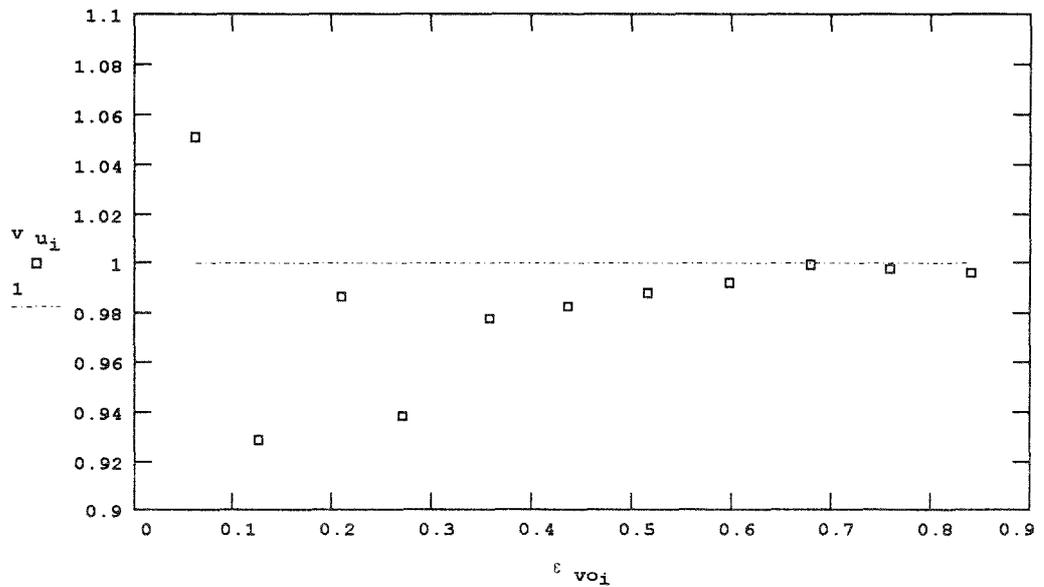
ϵ_{vo_i} : 5%-Quantilen aus einzelnen Meßwerten

ϵ_{ru_i} : Berechnete 5%-Quantilen

$$v_{u_i} := \frac{\epsilon_{vo_i}}{\epsilon_{ru_i}}$$

Verhältnis

v_u



Dehnung ϵ (%)

Versuche Nr.:

Z.0 - Z.4

u :

5%-Quantile

Bild 18 :

Vergleich der gemessenen mit errechneten Dehnungen
5%-Quantilen

2.3.2 Versuche mit Dauerlast

Die zwischen Stahlklemmen mit prismatischer Struktur auf der Klemmseite in den Abmessungen der Schulter eingespannten Prüfkörper waren frei drehbar aufgehängt und wurden über ein gelenkig gelagertes (Schneidenlagerung) Hebelsystem belastet (Bild 10). Die Belastung mit einem Hebelsystem hat gegenüber einer hydraulischen den Vorteil, daß die Kraft F ohne Verringerung ihrer Größe den Verformungen des Prüfkörpers folgen kann. Bei dem Dehnungsbereich des geprüften Werkstoffs ist der Einfluß von Winkeländerungen des Hebels zur Horizontalen auf die Kraft vernachlässigbar gering.

Bei drei Prüfkörpern (Versuche SZ) wurde die Belastung in gleichen Zeitabständen von 30 sec um gleiche Laststufen (entsprechend etwa $\Delta\sigma = 6 \text{ N/mm}^2$) bis zum Bruch gesteigert. Zwischen den Laststufen (nach etwa 15 sec) wurden die jeweiligen Dehnungen gemessen.

Die Last für die Zeitstandversuche wurde in voller Höhe mit einer hydraulischen Vorrichtung (Wagenheberprinzip) möglichst störungsfrei in der Zeit von etwa 20 sec aufgebracht.

Zwei Prüfkörper wurden nach konstanter Dauerlast (2344 h) entsprechend den Versuchen SZ bis zum Bruch belastet.

Die 3 Prüfkörper, die unterhalb der Grenzdehnung ε_G beansprucht waren, wurden nach 100 h entlastet. Ihr zeitabhängiger Dehnungsverlauf nach Entlastung ist in gleicher Weise erfaßt worden, wie das Dehnungsverhalten der anderen Proben unter Last.

In Bild 19 sind die Zeitdehnlinien aller Zeitstandversuche dargestellt. Außerdem sind die Bruchdehnungen aller Zugversuche eingetragen, die Bruchdehnungen der Versuche Z mit konstanter Verformungssteigerung bei der Zeit $t_0 = 0,015 \text{ h}$ (entsprechend der 5 % - Quantile $\varepsilon_{Bu} = 0,895$ und der Verformungsgeschwindigkeit $1 \% / \text{min}$) die Bruchwerte der Versuche SZ bei der jeweiligen Gesamtzeit für die Laststeigerung.

Die Restdehnung der Prüfkörper LZ.0 bis LZ.2 betrug nach insgesamt 204 h (also nach etwa gleicher Ent- wie Belastungszeit) 0,001 %. Der Wert liegt im Rahmen der Meßgenauigkeit des DMS - Verfahrens, daher kann von einer vollständigen Rückverformung ausgegangen werden.

Dehnung (%)

j

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

N/mm²

σ_j

16.6
16.6
16.5
71.1
71
66.2
70.9
85.2
58.3
54.7
49.4

Versuche Nr.:

Z.0 - Z.4
SZ.0 - SZ.2
LZ.0 - LZ.10

m : Mittelwert
o, u : 95%-, 5%-Quantile

Zeit t (h)

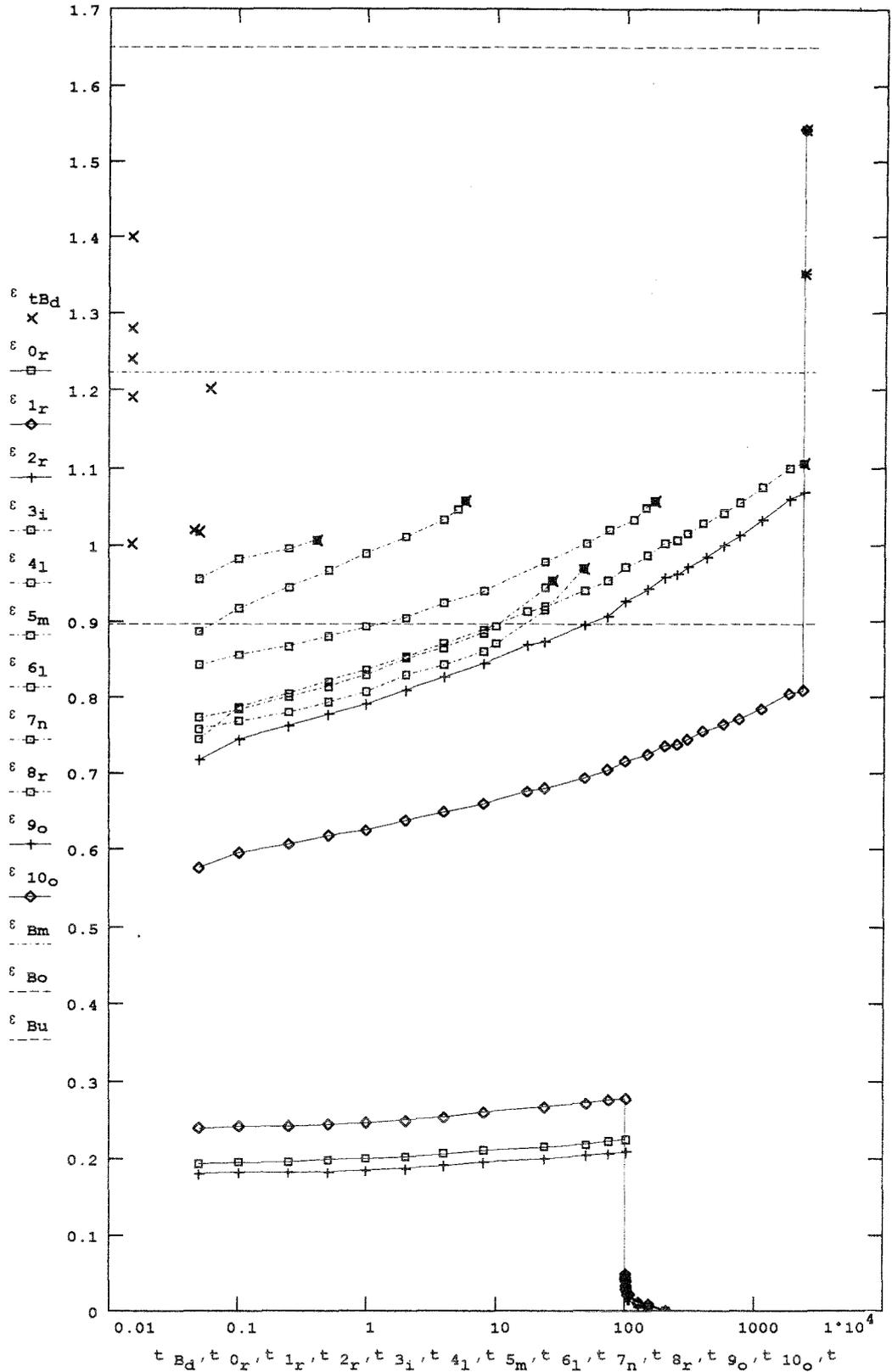


Bild 19 : Bruchdehnungen aller Zugversuche sowie Zeitdehnlinien aller Zeitstandversuche LZ

Versuche LZ.0 - LZ.2 einschließlich Verhalten nach Entlastung
 Versuche LZ.9 und LZ.10 wurden nach Zeitstandbelastung stufenförmig bis Bruch belastet
 Versuche Z : Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1 %/min
 Versuche SZ : Kurzzeitversuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

Zeitexponenten aus lin. Regression
(doppelt-logarithmisch)
der Zeitdehnlinien LZ.0 bis LZ.2
zwischen den Zeitpunkten
1 h und 100 h
unterhalb der Grenzdehnung

$$k_{tm} = 0.02598$$

$$k_{to} = 0.02741$$

$$k_{tu} = 0.02462$$

Grenzdehnung (%)

$$\epsilon_G = 0.4$$

Kriechfaktor :

$$c_t(t) := \left(\frac{t}{t_o}\right)^{k_t} \quad t_o = 0.015$$

Vergleichslinien mit Bezugszeit $t_k = 1$ für linear viskoelastisches Verhalten

$$c_{tk}(t) := \left(\frac{t}{t_k}\right)^{k_{tm}} \quad \epsilon_{kj}(t) := \epsilon_j(t_k) \cdot c_{tk}(t)$$

Dehnung (%)

Versuchswerte

$$\sigma_0 = 16.6$$

$$\sigma_1 = 16.6$$

$$\sigma_2 = 16.5$$

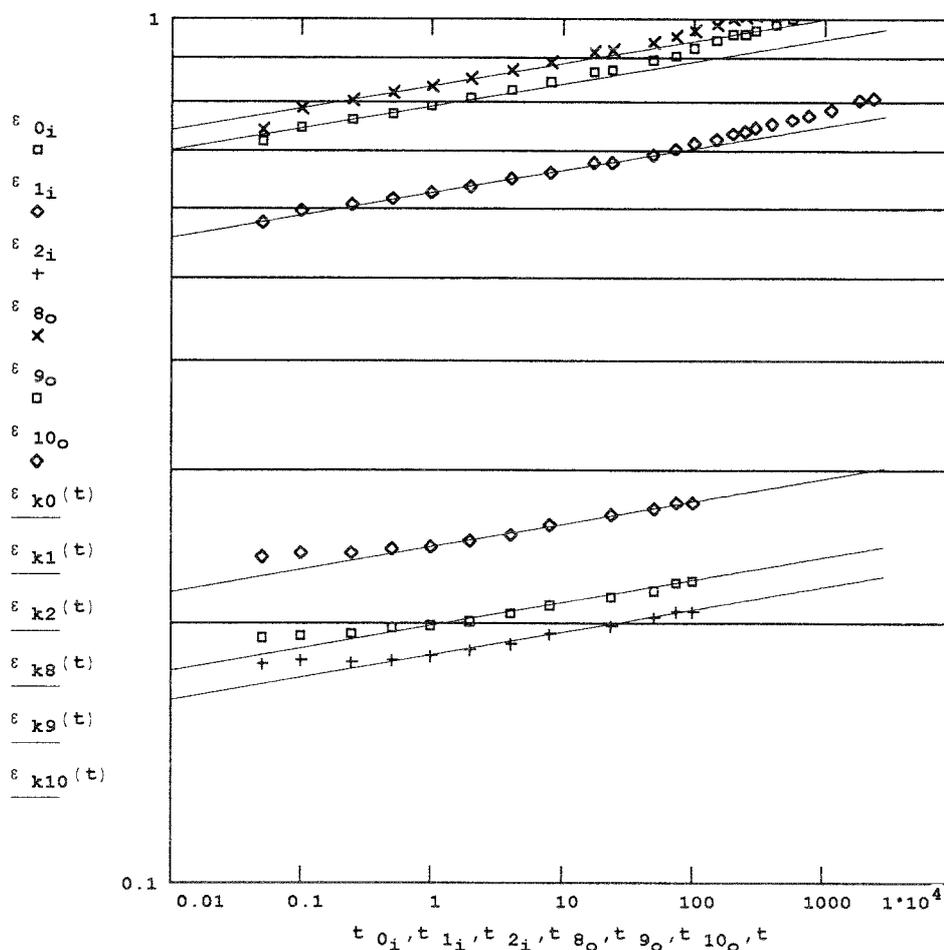
$$\sigma_8 = 58.3$$

$$\sigma_9 = 54.7$$

$$\sigma_{10} = 49.4$$

Vergleichslinien

Spannungen in N/mm²



Versuche Nr.:

LZ.0 - LZ.2
LZ.8 - LZ.10

m :
Mittelwert

o,u :
95%-, 5%-Quantile

Zeit t (h)

Bild 20 : Gemessene Zeitdehnlinien im Vergleich zu linear viskoelastischem Zeitdehnverhalten (rechnerisch ohne Schädigungen)

2.3.2.1 Linear viskoelastisches Verhalten

Aus der doppelt - logarithmisch linearen Regression zwischen den Zeiten $t_1 = 1 \text{ h}$ und $t_2 = 100 \text{ h}$ der Zeitdehnlagen unterhalb der Grenzdehnung (Bild 20) wurden die Zeitexponenten für linear viskoelastisches Verhalten nach {42.2} bestimmt. Wie aus der vollständigen Rückverformung der Prüfkörper zu ersehen, ist die rechnerische Annahme, Dehnverlauf ohne Schädigungen, ausreichend begründet.

Neben den Meßwerten dieser Linien und weiterer Linien oberhalb der Grenzdehnung sind in Bild 20 Vergleichslinien nach {42.1} für linear viskoelastisches Verhalten mit dem mittleren Kriechfaktor nach {49.3} und der Bezugszeit $t_k = 1 \text{ h}$ eingetragen.

Deutlich ist das verzögerte Kriechen zu Beginn der Belastungszeit bei den geringeren Anfangsdehnungen erkennbar. Bei größeren Anfangsdehnungen ist ein solcher Vorgang kaum noch zu beobachten. Die als Hauptgrund vermuteten Dehnungsüberhöhungen im Mikrobereich unvermeidlicher Fehlstellen mit zeitverzögerter Verformungsumlagerung auf den Gesamtquerschnitt wirken sich gegenüber dem Einfluß des Schädigungsanteils bei Anfangsdehnungen über der Grenzdehnung geringer aus.

Wie aus der doppelt - logarithmischen Darstellung in Bild 20 hervorgeht, könnten die Kurven oberhalb der Grenzdehnung ebenfalls durch Geraden mit größerem Anstieg als solche unterhalb angenähert werden (wie oft üblich). Die Dehnungszunahme nach langen Lastzeiten wird wegen des wachsenden Schädigungsanteils dann jedoch unterschätzt.

2.3.2.2 Zeitstanddehnverhalten

An typischen Beispielen der im Versuch ermittelten Dehnlagen hinsichtlich Höhe der Dehnung und Lastdauer werden in den Bildern 21 bis 33 die gemessenen Werte mit den berechneten verglichen.

Mit den Kennwerten aus den Kurzzeitversuchen bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit und dem Zeitexponenten k_t für linear viskoelastisches Verhalten sind die entsprechenden mittleren Zeitdehnlagen sowie die Linien der 5 % - Quantilen mit {48.1} berechnet worden.

Der Index r wird in den Darstellungen nur als mathematische Beschreibung der jeweiligen Lastzeit t_r verwendet. Die Dehnungen ε_r sind hier die rechnerischen Gesamtdehnungen, **nicht** die Reißanteile an der Dehnung nach den Bildern 4 oder 5 .

Die größten Dehnungen

$$\varepsilon_{or} = f(E_{0u}, \varepsilon_{Bu}, f_{Ru}, k_{to}, \sigma_c, t_r)$$

können nur für Dehnungen unterhalb der Bruchdehnungen ε_{Bu} berechnet werden, da die Beziehungen {48 bis 52} nur für Dehnungen unterhalb der jeweiligen Bruchdehnung bzw. Bruchspannung definiert sind.

Zusätzlich zu den mittleren Dehnungen

$$\varepsilon_{mr} = f(E_{0m}, \varepsilon_{Bm}, f_{Rm}, k_{tmo}, \sigma_c, t_r)$$

wurden teilweise Mittelwerte mit dem Exponenten k_{to}

$$\varepsilon_{mor} = f(E_{0m}, \varepsilon_{Bm}, f_{Rm}, k_{to}, \sigma_c, t_r)$$

errechnet. Die kleinsten Dehnungen

$$\varepsilon_{ur} = f(E_{0o}, \varepsilon_{Bo}, f_{Ro}, k_{tu}, \sigma_c, t_r)$$

sind in allen Bildern eingetragen.

Zum Vergleich wurden mit der Bezugszeit $t_k = 1 \text{ h}$ wie in Bild 20 Linien eingezeichnet, die den theoretischen Anstieg der gemessenen bzw. berechneten Dehnung ab diesem Zeitpunkt ohne Rißzuwachs beschreiben.

In den Bildern 22, 26, 29 und 32 wird der gemessene Dehnungszuwachs $\Delta\varepsilon$ ab der Bezugszeit dem rechnerischen gegenübergestellt.

Den entsprechend dem Kriechfaktor C_t definierten Zeitfaktor C , den Quotienten aus den Dehnungen bei der Zeit t_r und der Dehnung bei der Bezugszeit t_k , zeigen die Bilder 23, 27, 30 und 33. Aus dem Verhältnis der gemessenen Zeitfaktoren zu den berechneten, ebenfalls in diesen Bildern wiedergegeben, können Rückschlüsse auf die Verwendbarkeit der Beziehungen {48 bis 52} gezogen werden.

Die Meßwerte der Versuche LZ.0 - LZ.2 ordnen sich recht gut der rechnerischen Lage der Zeitdehnlinien zu. Daß die Zunahme und die Zeitfaktoren übereinstimmen ist vorgegeben, da aus diesen Zeitdehnlinien unterhalb der Grenzdehnung mit der Zeitstandspannung $\sigma_c = 16,6 \text{ N/mm}^2$ die Zeitexponenten k_t ermittelt wurden.

Beim Versuch LZ.3, Versuchsdauer 164 h bis zum Erreichen der Bruchdehnung $\varepsilon_{B3} = 1,055 \%$ bei der Spannung $\sigma_{c3} = 71,1 \text{ N/mm}^2$, liegt die gemessene Linie ebenfalls im rechnerischen Streubereich. Die Abweichung zwischen Rechnung und Versuch beträgt bei den Zeitfaktoren bis zum Bruch weniger als 3 %.

Bis zur Bruchdehnung $\epsilon_{B8} = 1,105 \%$ bei der Spannung $\sigma_{c8} = 58,3 \text{ N/mm}^2$ betrug im Versuch LZ.8 die Dauer 2344 h. Der für eine Bemessung maßgebliche obere Dehnungsverlauf konnte nicht dargestellt werden, da rechnerisch die Bruchdehnung ϵ_{Bu} schon zum Zeitpunkt t_0 überschritten ist. Auch bei diesem Versuch ist die gemessene Dehnlinie zwischen oberer und unterer Streugrenze angeordnet. Das kann in gleicher Weise bei den Werten aus Versuch LZ.10 mit der Spannung $\sigma_{c10} = 49,4 \text{ N/mm}^2$ ohne Bruch über 2344 h festgestellt werden. Hier konnten wegen der geringeren Zeitstandbeanspruchung beide rechnerischen Streugrenzen dargestellt werden.

Die Differenz zwischen berechneten mittleren und gemessenen Zeitfaktoren ist nach 2344 h beim Versuch LZ.8 mit unter 6 % (berechnet mit k_{tm}) und etwa 4 % (berechnet mit k_{t0}) etwas größer als bei den Versuchen LZ.0 - LZ.2 und LZ.3. Beim Versuch LZ.10 betragen die entsprechenden Abweichungen nur 4 % bzw. 2 %. Die Ergebnisse von Versuch LZ.9 (nicht besonders dargestellt) liegen zwischen denjenigen von LZ.8 und LZ.10. Ein großer Teil der Abweichungen ist versuchsbedingt. Die Versuche LZ.8 - LZ.10 wurden gleichzeitig durchgeführt. Da die Versuche nur geplant waren, um Zeitexponenten bzw. Abminderungsfaktoren A_{11} oberhalb der Grenzdehnung zu ermitteln, wurden ab etwa 150 h Versuchsdauer an benachbarten Versuchsständen Zeitstandbruchversuche durchgeführt. Durch Lagerung der Ständer auf Hartgummi und Abfangen der Lasthebel sollten zwar Reaktionen beim Bruch auf benachbarte Versuche verhindert werden. Wie sich bei Beobachtung der DMS - Meßinstrumente zeigte, konnten Störungen jedoch nicht völlig vermieden werden. Aus dem Verlauf der Meßwerte ist zu ersehen, daß geringste Störungen in der Dauerlast zu einer Riß - und Dehnungszunahme führen. Diese Dehnungszunahme wird, wie ja theoretisch gezeigt, nur mit ihrem elastischen Anteil nach Abklingen der Störung wieder ausgeglichen, der zusätzlich entstandene Rißanteil bleibt erhalten. Ist der jeweils vorhandene Rißanteil schon groß (LZ.8), sind die durch Störungen entstehenden Anteile vergleichsweise größer als bei geringerem vorhandenem Rißfaktor (LZ.10), die Abweichung zwischen Versuch und Rechnung für konstante Last entsprechend höher. Auch durch das Entstehen zusätzlicher Risse selbst können gleichartige Störungen ausgelöst werden.

Es kann festgestellt werden, daß die Ergebnisse sich überraschend gut in das berechnete Verhalten einordnen, obwohl die Versuche nach Anzahl und Durchführung nicht zum Nachweis der Berechnungsgleichungen geplant waren.

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Vergleichsdehnung
Annahme:
kein Rißzuwachs

$$\epsilon_{k_r} := \epsilon_k \cdot C_{t_k}$$

Bezugszeit:

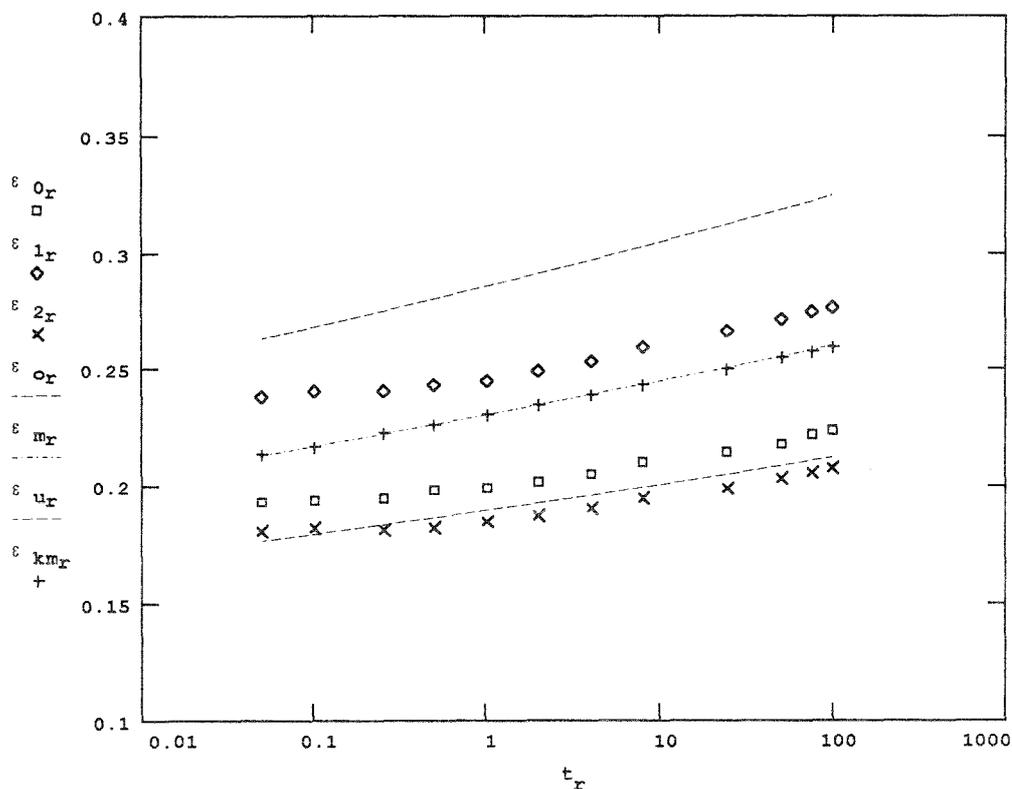
$$t_k = 1$$

$$C_{t_k} := \left(\frac{t_r}{t_k} \right)^{k_t}$$

Dehnung
(%)

Meßwerte

rechnerische
Werte



Versuche Nr.:

LZ.0 - LZ.2

m: Mittelwert
o,u: 95%-, 5%-Quantile

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$$\sigma_c = 16.6$$

Zeit t (h)

Bild 21: Rechnerische Dehnung im Vergleich zu Meßwerten

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{Rm} - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_{tm}}$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_{Rm} \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_{Rm} \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{Rm}$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Dehnungszunahme
ab Bezugszeit

Bezugszeit
 $t_k = 1$

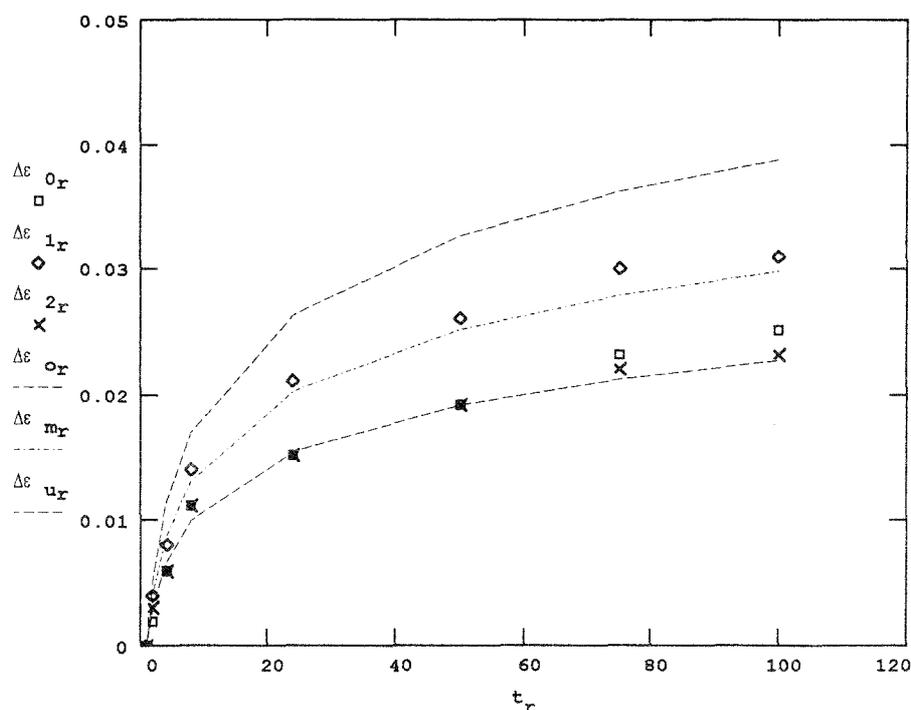
Meßwerte: $\Delta \epsilon_{i_r} := \epsilon_{i_r} - \epsilon_{i_k}$

Berechnete Werte: $\Delta \epsilon_r := \epsilon_r - \epsilon_k$

Dehnungszunahme
(%)

Meßwerte

rechnerische
Werte



Versuche Nr.:

LZ.0 - LZ.2

m:

Mittelwert

o,u:

95%-, 5%-Quantile

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$\sigma_c = 16.6$

Zeit t (h)

Bild 22 :

Rechnerische Dehnungszunahme im Vergleich zu Meßwerten
ab 1 h Belastungszeit

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \frac{\left(\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma_c \cdot C_{t_r} \right)^{\frac{1}{n}}}{a} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_{t_r}}$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G}$$

$$a := E_o \cdot f_R \cdot \left(\epsilon_B \cdot 10^{-2} \right)^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Zeitfaktor
ab Bezugszeit

Bezugszeit

$$t_k = 1$$

Meßwerte :

$$C_{ki_r} := \frac{\epsilon_{i_r}}{\epsilon_{i_k}}$$

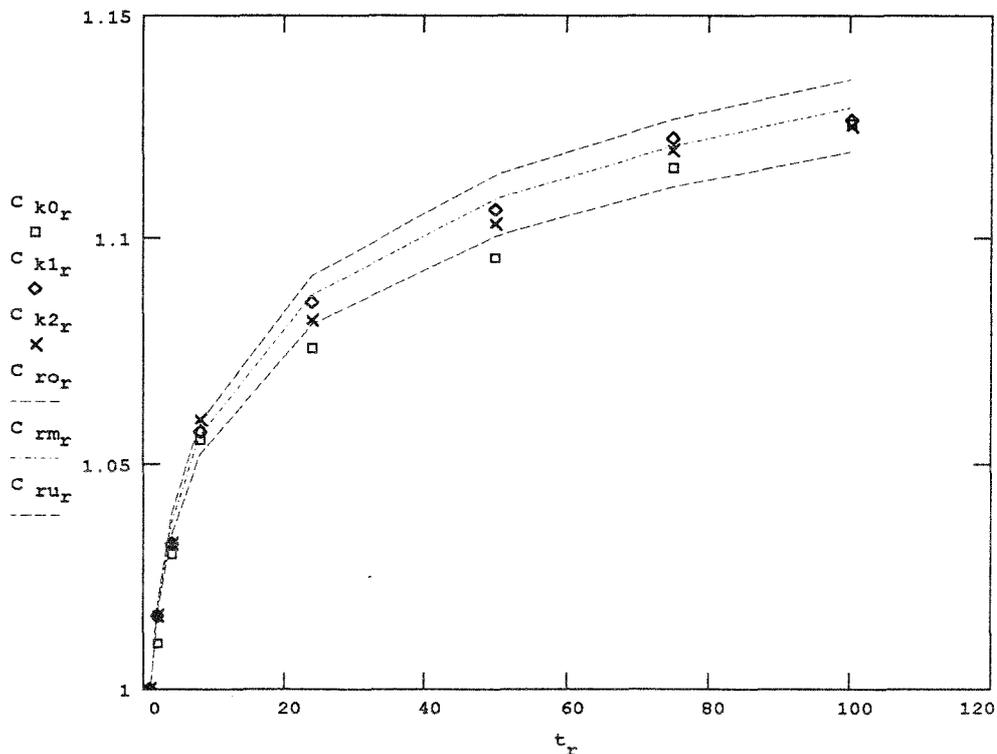
Berechnete Werte :

$$C_{r_r} := \frac{\epsilon_r}{\epsilon_k}$$

Zeitfaktor

Meßwerte

rechnerische
Werte



Versuche Nr.:

m :

o,u :

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

Zeit t (h)

LZ.0 - LZ.2

Mittelwert

95%-, 5%-Quantile

$$\sigma_c = 16.6$$

Bild 23 : Rechnerischer Zeitfaktor im Vergleich zu Meßwerten
ab 1 h Belastungsdauer

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_{t_r}} \quad n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Verhältnis der
Zeitfaktoren
ab Bezugszeit

$$v_{ci_r} := \frac{C_{ki_r}}{C_{r_r}}$$

Bezugszeit

$$t_k = 1$$

Meßwerte:

$$C_{ki_r} := \frac{\epsilon_{i_r}}{\epsilon_{i_k}}$$

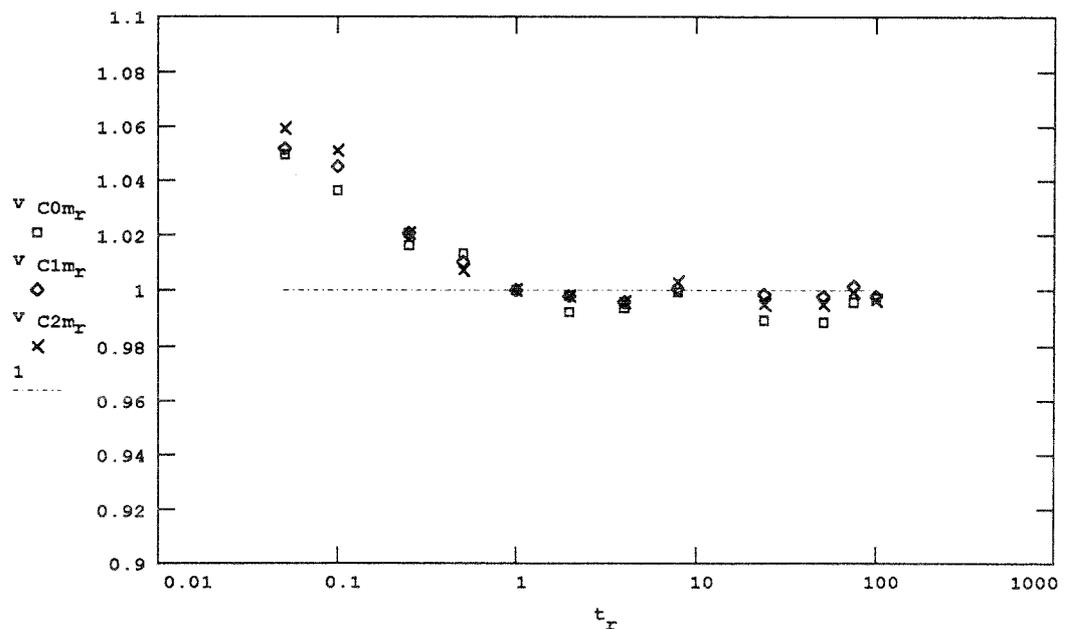
Berechnete Werte:

$$C_{r_r} := \frac{\epsilon_r}{\epsilon_k}$$

Mittelwerte

Verhältnis

v_{ci}



Zeit t (h)

Versuche Nr.:

LZ.0 - LZ.2

m:

Mittelwert

o,u:

95%-, 5%-Quantile

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$$\sigma_c = 16.6$$

Bild 24: Verhältnis der gemessenen zu den berechneten Zeitfaktoren ab 1 h Belastungsdauer

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R\sigma} - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n = \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_{R\sigma} \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_{R\sigma} \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R\sigma}$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Vergleichsdehnung
Annahme:
kein Rißzuwachs

$$\epsilon_{k_r} := \epsilon_k \cdot C_{t_k}$$

Bezugszeit

$$t_k = 1$$

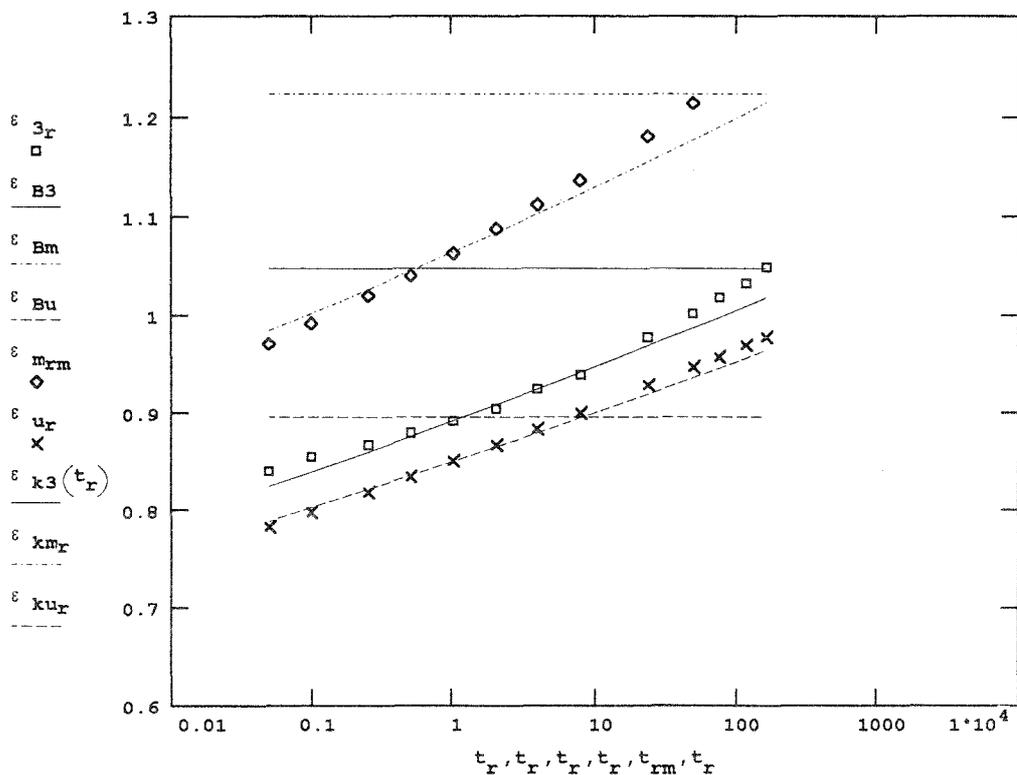
$$C_{t_k} := \left(\frac{t_r}{t_k} \right)^{k_t}$$

Dehnung
(%)

Meßwerte

Bruch-
dehnung

Vergleichs-
dehnung



Versuch Nr.:

Zeit t (h)

LZ.3

m :
Mittelwert

o,u :
95%-, 5%-Quantile

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$$\sigma_{c3} = 71.1$$

Bild 25 : Rechnerische Dehnung im Vergleich zu Meßwerten
Theoretischer lin. viskoelastischer Verlauf (Vergleichsdehnung, Bezugszeit: 1 h)

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R\sigma} - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_{tm}}$$

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_{R\sigma} \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_{R\sigma} \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R\sigma}$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Dehnungszunahme
ab Bezugszeit

Bezugszeit
 $t_k = 1$

Meßwerte :

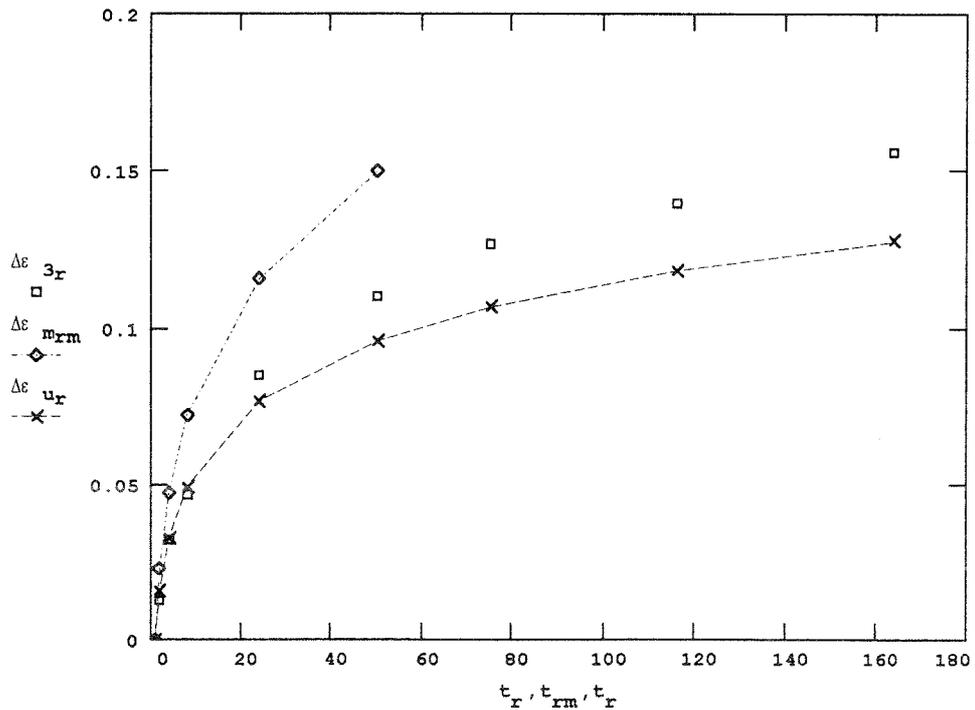
$$\Delta \epsilon_{3_r} := \epsilon_{3_r} - \epsilon_{3_k}$$

Berechnete Werte :

$$\Delta \epsilon_r := \epsilon_r - \epsilon_k$$

Dehnungs-
zunahme
(%)

Meßwerte
rechnerische
Werte



Versuch Nr.:

Zeit t (h)

LZ.3

m :
Mittelwert

o,u :
95%-, 5%-Quantile

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$$\sigma_{c3} = 71.1$$

Bild 26 : Rechnerische Dehnungszunahme im Vergleich zu Meßwerten
ab 1 h Belastungszeit

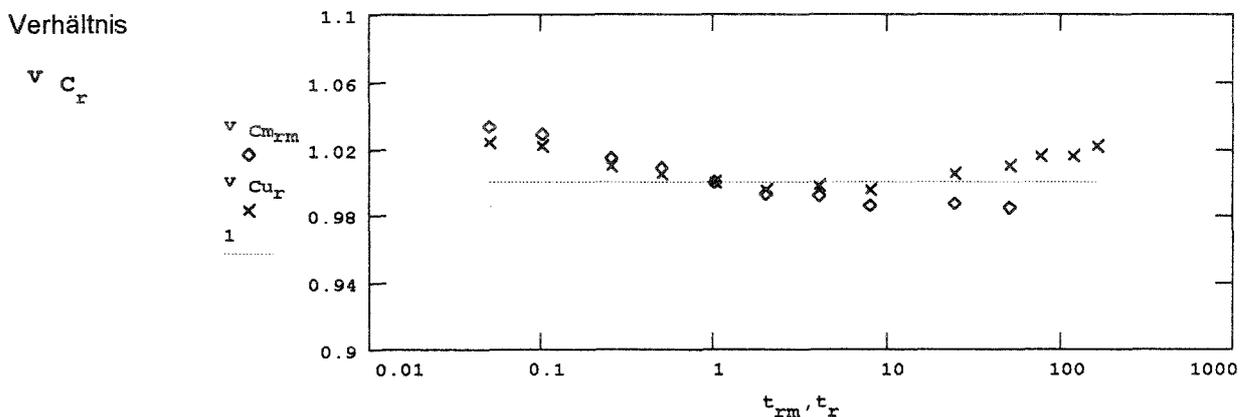
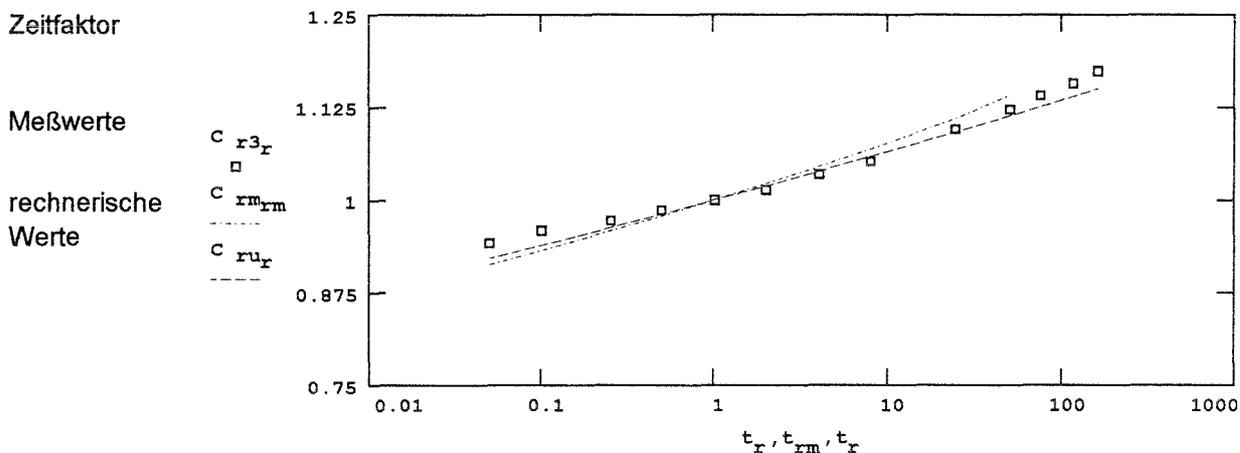
$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{Rr} - \sigma_c \cdot C_{tr}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{tr} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_{Rr} \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_{Rr} \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{tr} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{Rr}$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Zeitfaktor ab Bezugszeit	Bezugszeit	Meßwerte	Berechnete Werte	Verhältnis
	$t_k = 1$	$C_{r3r} := \frac{\epsilon_{3r}}{\epsilon_{3k}}$	$C_{rr} := \frac{\epsilon_r}{\epsilon_k}$	$v_{Cr} := \frac{C_{r3r}}{C_{rr}}$



Versuch Nr.:

LZ.3	m : Mittelwert	o,u : 95%-, 5%-Quantile	Zeitstand-Spannung (N/mm ²) $\sigma_{c3} = 71.1$	Zeit t (h)
------	-------------------	----------------------------	---	------------

Bild 27 : Rechnerischer Zeitfaktor im Vergleich zu Meßwerten
Bezugszeit: 1 h

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Vergleichsdehnung
Annahme:
kein Rißzuwachs

$$\epsilon_{k_r} := \epsilon_k \cdot C_{t_k}$$

Bezugszeit

$$t_k = 1$$

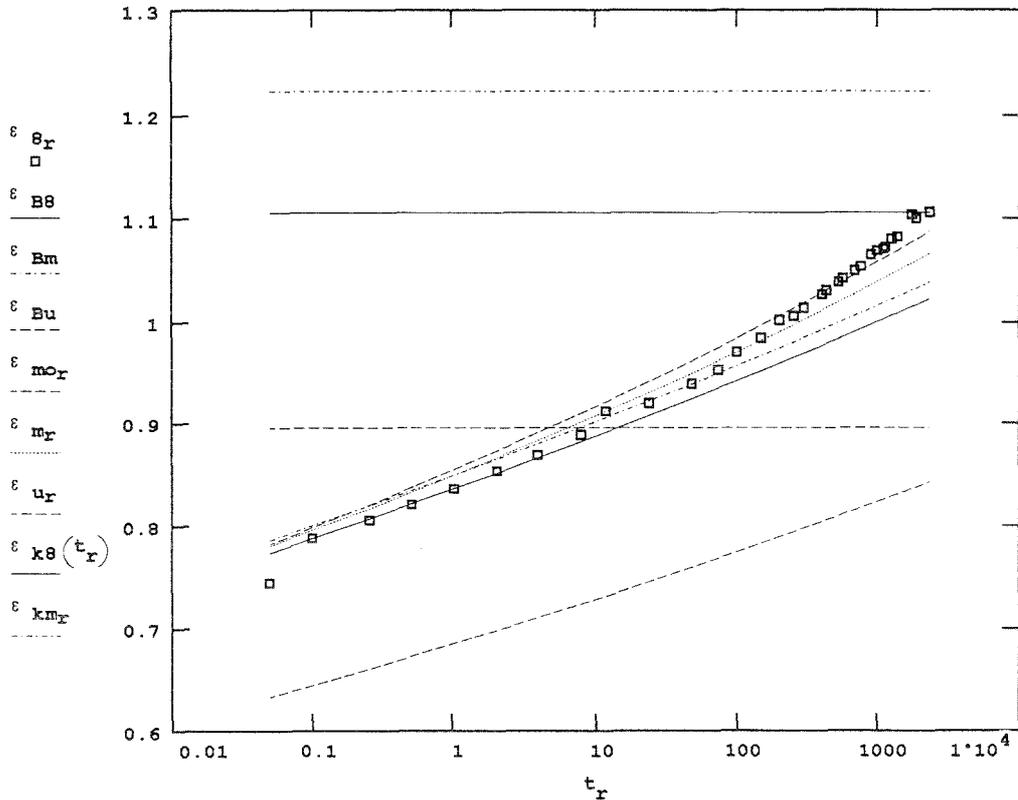
$$C_{t_k} := \left(\frac{t_r}{t_k} \right)^{k_t}$$

Dehnung
(%)

Meßwerte

Bruch-
dehnung

Vergleichs-
dehnung



Versuch Nr.:
LZ.8

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile
 ϵ_{mo} mit k_{to} errechnet

Zeitstand-Spannung (N/mm²)
 $\sigma_{c8} = 58.26$

Zeit t (h)

Bild 28 : Rechnerische Dehnung im Vergleich zu Meßwerten
Theoretischer lin. viskoelastischer Verlauf (Vergleichsdehnung, Bezugszeit: 1 h)

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r = \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma_c \cdot C \cdot t_r}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C \cdot t_r = \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n = \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a = E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C \cdot t_r \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Dehnungszunahme
ab Bezugszeit

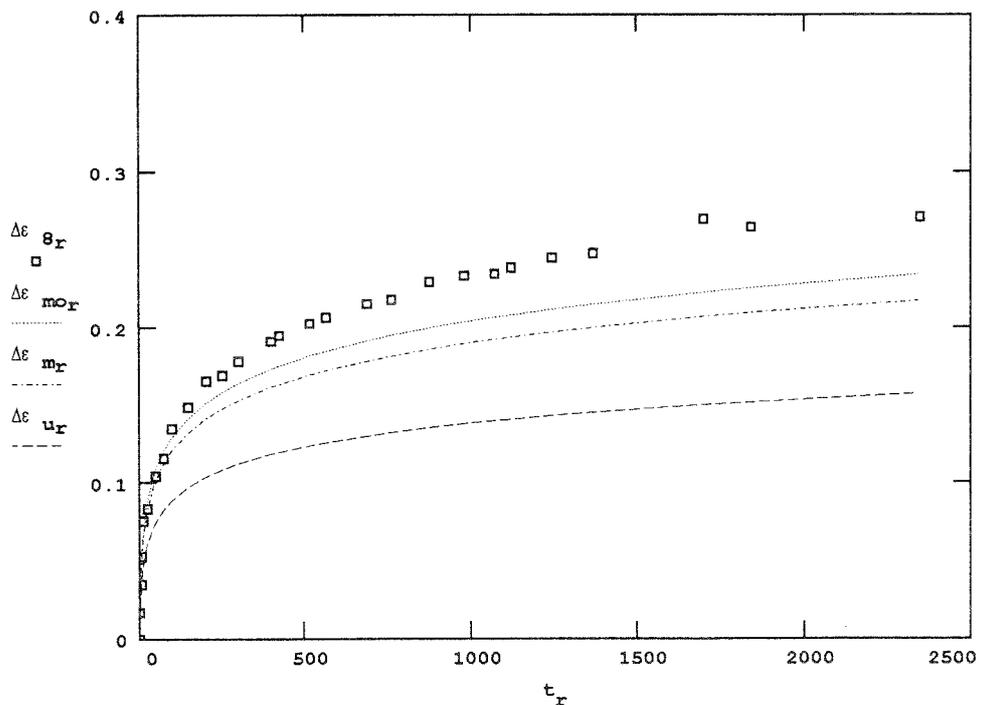
Bezugszeit
 $t_k = 1$

Meßwerte: $\Delta \epsilon_{\theta_r} := \epsilon_{\theta_r} - \epsilon_{\theta_k}$

Berechnete Werte: $\Delta \epsilon_r := \epsilon_r - \epsilon_k$

Dehnungs-
zunahme
(%)

Meßwerte
rechnerische
Werte



Versuch Nr.:
LZ.8

m: Mittelwert
o,u: 95%-, 5%-Quantile
 $\Delta \epsilon_{mo}$ mit k_{to} errechnet

Zeitstand-Spannung (N/mm²)
 $\sigma_{c8} = 58.26$

Zeit t (h)

Bild 29 : Rechnerische Dehnungszunahme im Vergleich zu Meßwerten ab 1 h Belastungszeit

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r = \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R-\sigma} \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} = \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n = \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_{R-\sigma} \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a = E_o \cdot f_{R-\sigma} \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_{C \cdot t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R-\sigma}$

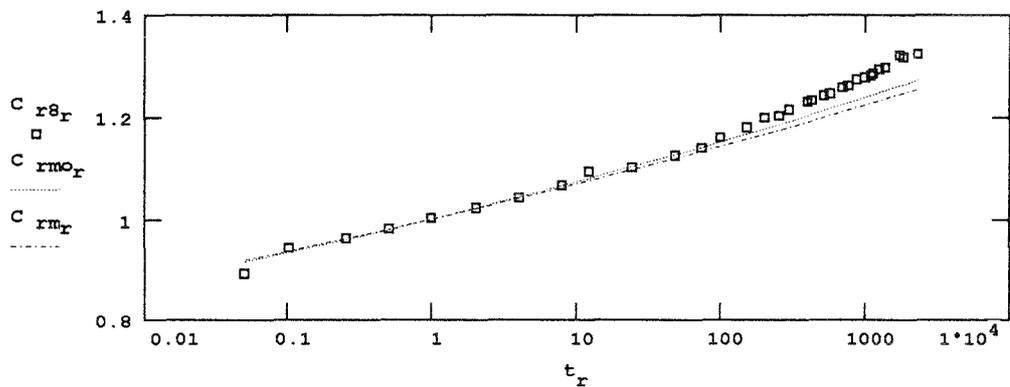
Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Zeitfaktor ab Bezugszeit	Bezugszeit	Meßwerte	Berechnete Werte	Verhältnis
	$t_k = 1$	$C_{r8_r} = \frac{\epsilon_{8_r}}{\epsilon_{8_k}}$	$C_{r_r} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_k}$	$v_{C_r} = \frac{C_{r8_r}}{C_{r_r}}$

Zeitfaktor

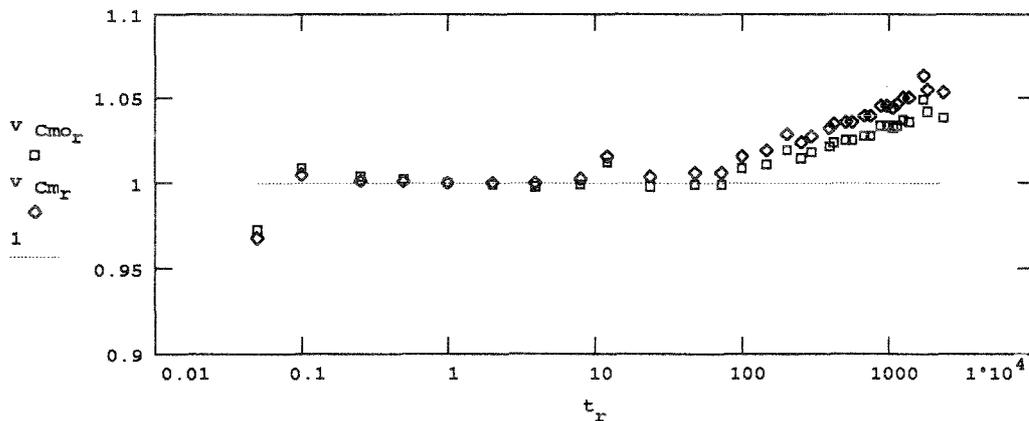
Meßwerte

rechnerische
Werte



Verhältnis

v_{C_r}



Versuch Nr.:

LZ.8

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile
 C_{rmo} mit k_{t0} errechnet

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$\sigma_{c8} = 58.26$

Zeit t (h)

Bild 30 : Rechnerischer Zeitfaktor im Vergleich zu Meßwerten
Bezugszeit: 1 h

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_{t_r}} \quad n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung : $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Vergleichsdehnung
Annahme :
kein Rißzuwachs

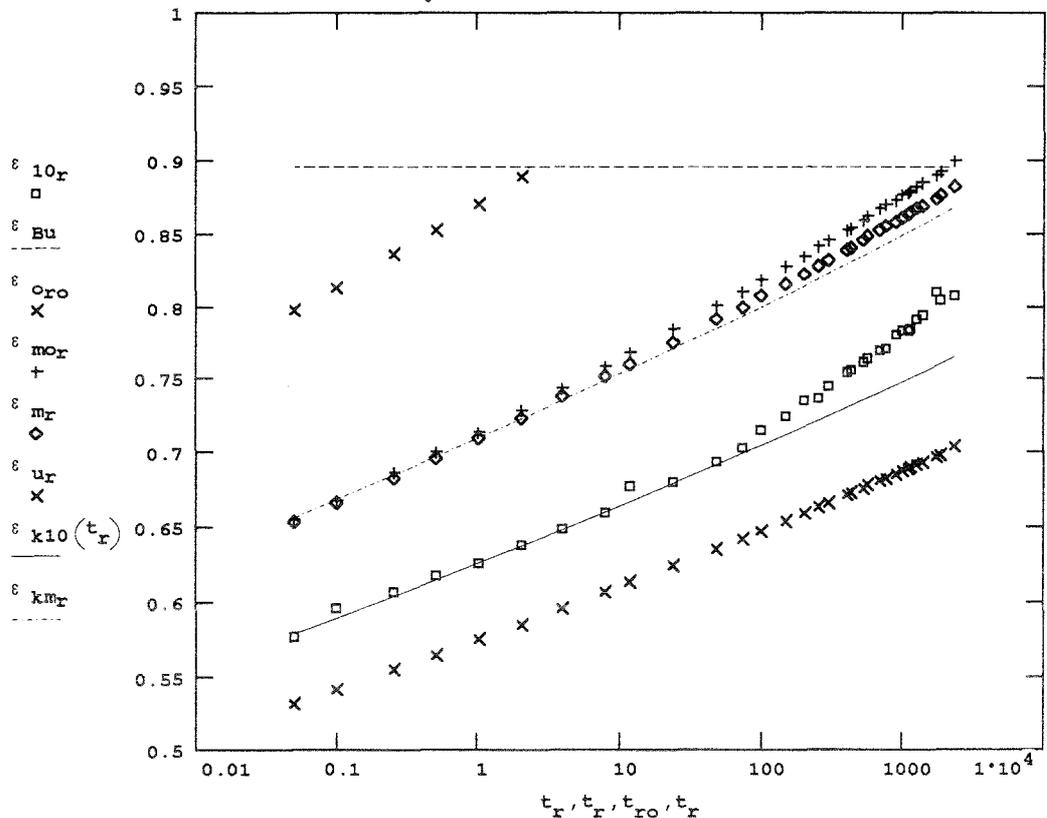
$\epsilon_{k_r} := \epsilon_k \cdot C_{t_k}$ Bezugszeit
 $t_k = 1$ $C_{t_k} := \left(\frac{t_r}{t_k} \right)^{k_{t_k}}$

Dehnung
(%)

Meßwerte

Bruchdehnung

Vergleichsdehnung



Versuch Nr.:

LZ.10

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile
 ϵ_{mo} mit k_{t0} errechnet

Zeitstand-Spannung (N/mm²)
 $\sigma_{c10} = 49.36$

Zeit t (h)

Bild 31 :

Rechnerische Dehnung im Vergleich zu Meßwerten

Theoretischer lin. viskoelastischer Verlauf (Vergleichsdehnung, Bezugszeit: 1 h)

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R-\sigma} \cdot c \cdot t_r}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$c \cdot t_r := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_{R-\sigma} \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_{R-\sigma} \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung : $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_{c \cdot t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_{R-\sigma}$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Dehnungszunahme
ab Bezugszeit

Bezugszeit

Meßwerte :

$$\Delta \epsilon_{10_r} := \epsilon_{10_r} - \epsilon_{10_k}$$

$$t_k = 1$$

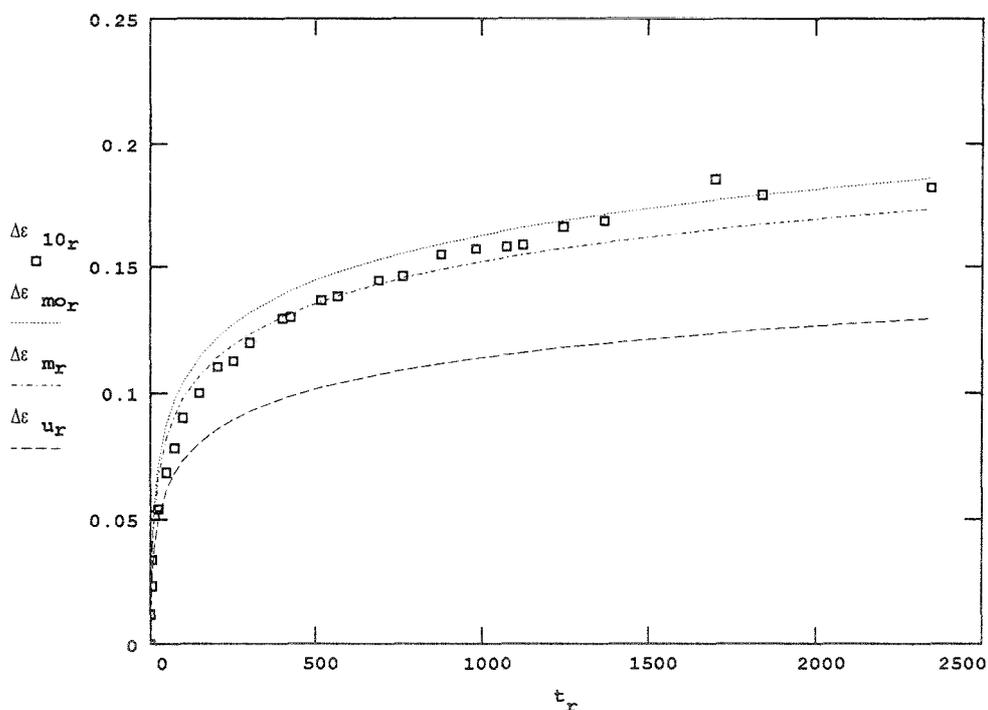
Berechnete Werte :

$$\Delta \epsilon_r := \epsilon_r - \epsilon_k$$

Dehnungs-
zunahme
(%)

Meßwerte

rechnerische
Werte



Versuch Nr.:

LZ.10

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$$\sigma_{c10} = 49.36$$

$\Delta \epsilon_{m0}$ mit k_{to} errechnet

Zeit t (h)

Bild 32 :

Rechnerische Dehnungszunahme im Vergleich zu Meßwerten
ab 1 h Belastungszeit

Berechnete
Dehnung

$$t_o = 0.015 \quad \epsilon_r := \left[\epsilon_B \cdot 10^{-2} - \left(\frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - \sigma_c \cdot C_{t_r}}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot 10^2$$

$$C_{t_r} := \left(\frac{t_r}{t_o} \right)^{k_t} \quad n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Grenzdehnung: $\epsilon_G = 0.4$ $\sigma_c \cdot C_{t_r} \leq \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R$

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Zeitexponent
$E_{om} = 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$k_{tm} = 0.02598$
$E_{oo} = 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$k_{tu} = 0.02462$
$E_{ou} = 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$k_{to} = 0.02741$

Zeitfaktor
ab Bezugszeit

Bezugszeit Meßwerte
 $t_k = 1$

$$C_{r10_r} := \frac{\epsilon_{10_r}}{\epsilon_{10_k}}$$

Berechnete Werte

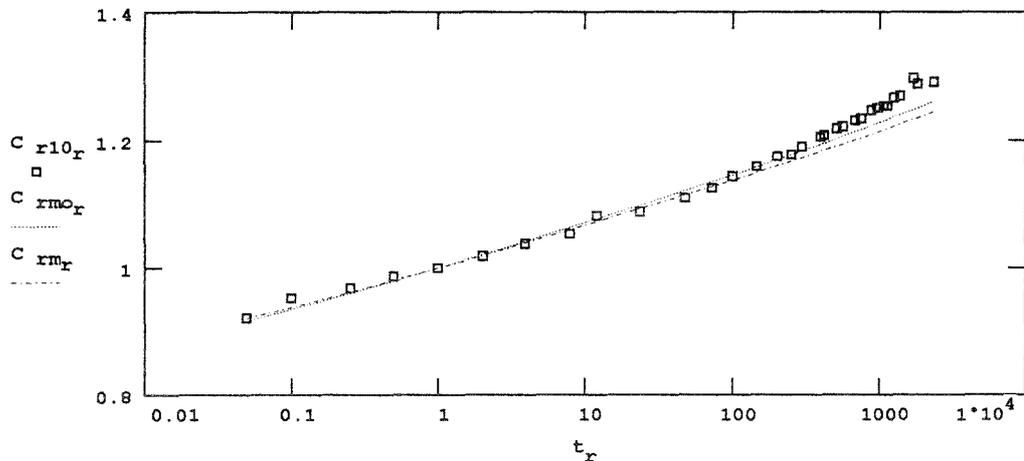
$$C_{r_r} := \frac{\epsilon_r}{\epsilon_k}$$

Verhältnis

$$v_{C_r} := \frac{C_{r10_r}}{C_{r_r}}$$

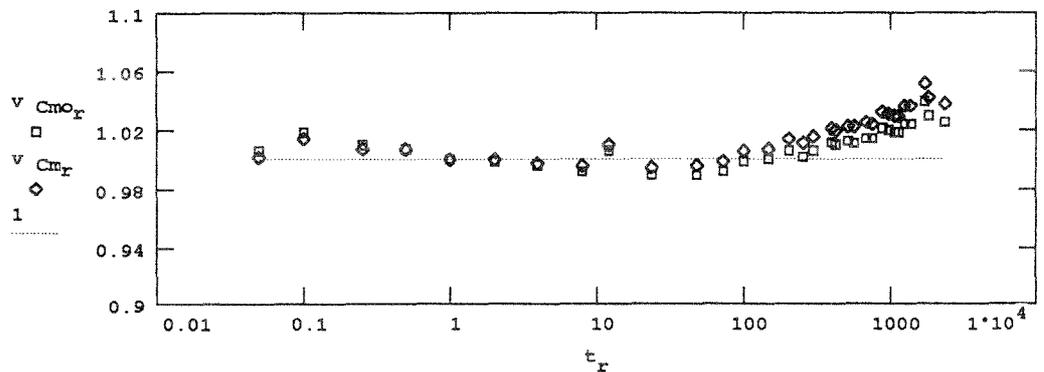
Zeitfaktor

Meßwerte
rechnerische
Werte



Verhältnis

v_{C_r}



Versuch Nr.:

LZ.10

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Zeitstand-Spannung (N/mm²)

$$\sigma_{c10} = 49.36$$

C_{rmo} mit k_{t0} errechnet

Zeit t (h)

Bild 33 : Rechnerischer Zeitfaktor im Vergleich zu Meßwerten
Bezugszeit: 1 h

2.3.2.3 Zeitstandbruchverhalten

In den Bildern 34 und 35 sind die Zeitstandbruchspannungen und -dehnungen doppelt - bzw. halb - logarithmisch über der Lastdauer aufgetragen.

Die Ergebnisse der Versuche SZ wurden mit eingezeichnet und ebenfalls für die lineare Regressionsrechnung (doppelt - logarithmisch) verwendet. Die Zeitstandbruchzeit wurde mit 45 % der Dauer eingesetzt, die bei der stufenförmigen Laststeigerung bis zum Bruch benötigt wurde. Diese Zeit entspricht etwa der mittleren Zeit, wenn die Summe aus dem Produkt der Laststufen mit ihren Zeitanteilen auf die Bruchlast bezogen wird.

Die einzelnen Werte aus den Versuchen KZ mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit und mit stufenförmiger Höherbelastung nach vorheriger Dauerbeanspruchung über 2344 h sind in den Bildern 36 und 37 zusätzlich angegeben (Die Kurzzeitwerte bei $t_0 = 0,0015$ h). Diese Werte wurden jedoch nicht in die lineare Regression mit einbezogen.

Es ist offensichtlich, daß die Bruchspannungen mit der Zeit abnehmen und ihr Verlauf über der Zeit genügend genau durch eine Potenzfunktion angenähert werden kann (doppelt - logarithmisch linear).

Bei den Bruchdehnungen zeigt sich ein anderes Verhalten, sie sind praktisch unabhängig von der Lastdauer. Sie liegen zwar in der unteren Hälfte des Streubandes der Kurzzeitwerte, ein Abfall über der Zeit ist jedoch nicht gegeben. Insbesondere nach Zeiten über 10 h Dauer wurden Werte aus den gemessenen Bruchzeiten und dem vorherigen Verlauf der Dehnungen (siehe Bild 19) durch Extrapolation ermittelt. Einzelne Werte könnten so geringfügig zu niedrig erfaßt sein. Die Bruchdehnungen nach sehr langer Dauer konnten vergleichsweise genau festgestellt werden.

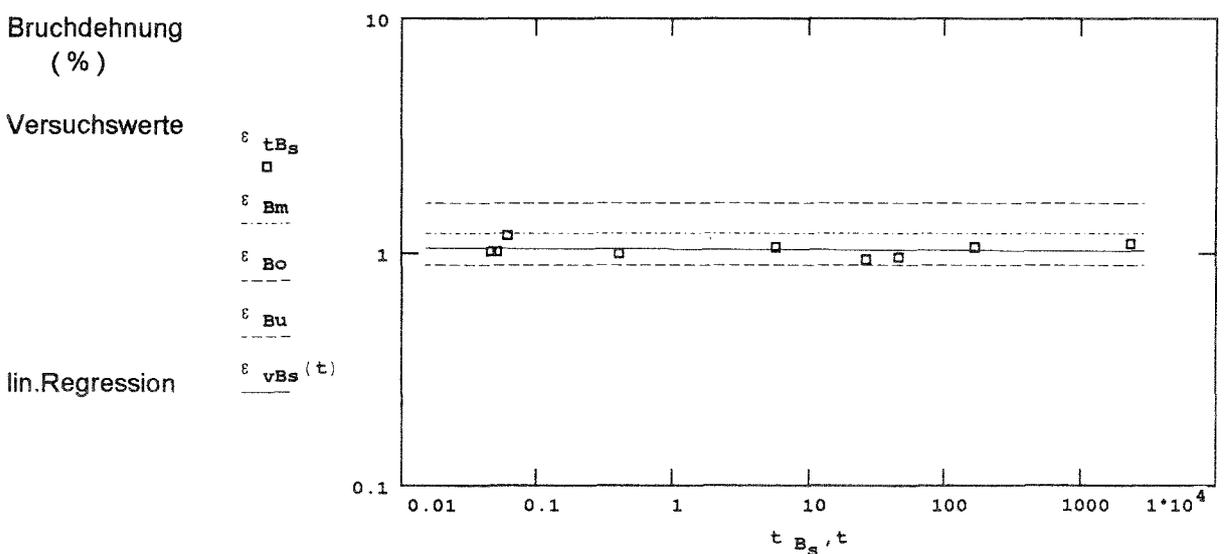
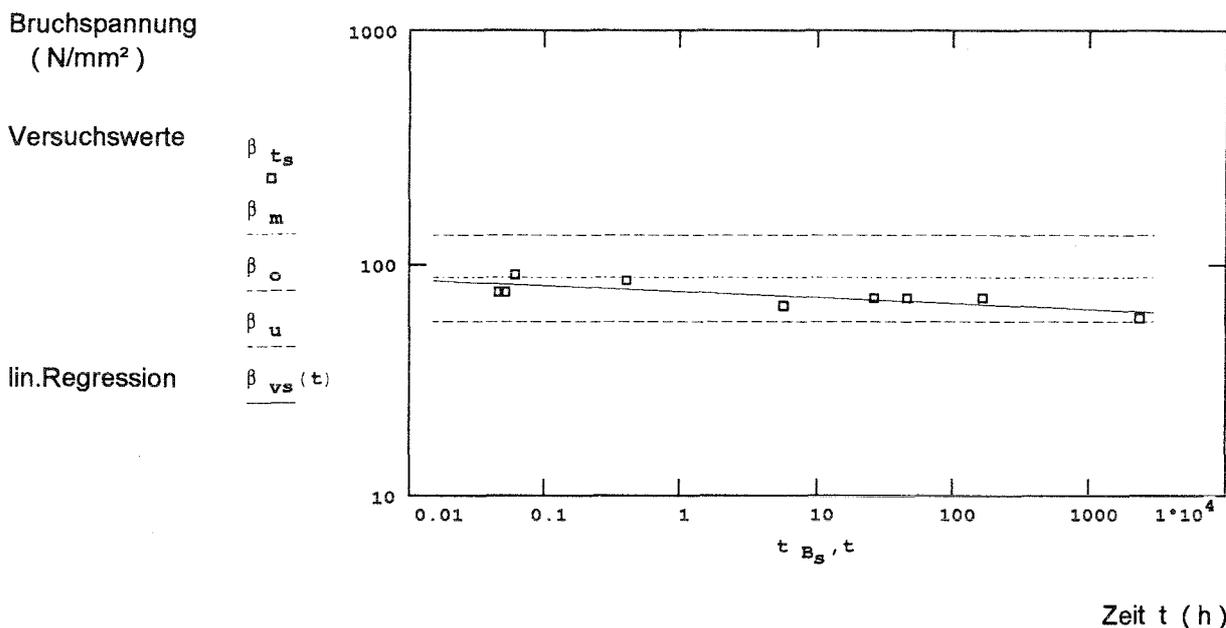
Die nach Höherbelastung gemessenen Bruchdehnungen stützen die theoretische Vermutung, daß der Werkstoff unabhängig von dem Belastungs - Zeit - Kollektiv bei der gleichen Dehnung bricht. In Bild 38 sind die zeitabhängigen Bruchdehnungen aller Versuche eingetragen und in der linearen Regression erfaßt.

Im Gegensatz zu den Dehnungen zeigen die Bruchspannungen nach Höherbelastung eine abfallende Tendenz (Bild 37) gegenüber den Kurzzeitwerten, wie ebenfalls theoretisch vermutet.

In den Bildern 39 und 40 werden die Meßwerte der Bruchspannungen mit den berechneten Zeitstandbruchlinien nach {49.1 bzw. 49.2} verglichen. Die gemessenen Werte ordnen sich nach Lage und Verlauf sehr gut in das berechnete Verhalten ein.

Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1%/min

Bruchspannung (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)
$\beta_m = 88.1$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$
$\beta_o = 133.1$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$
$\beta_u = 56.8$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$



Versuche Nr.:

SZ.0 - SZ.2
LZ.3 - LZ.8

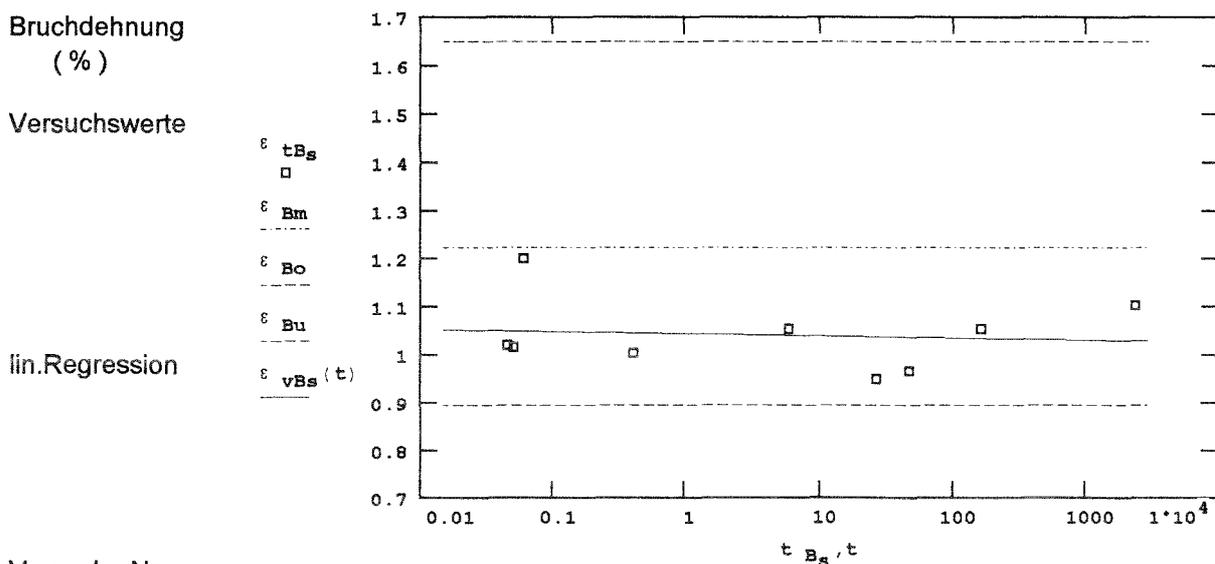
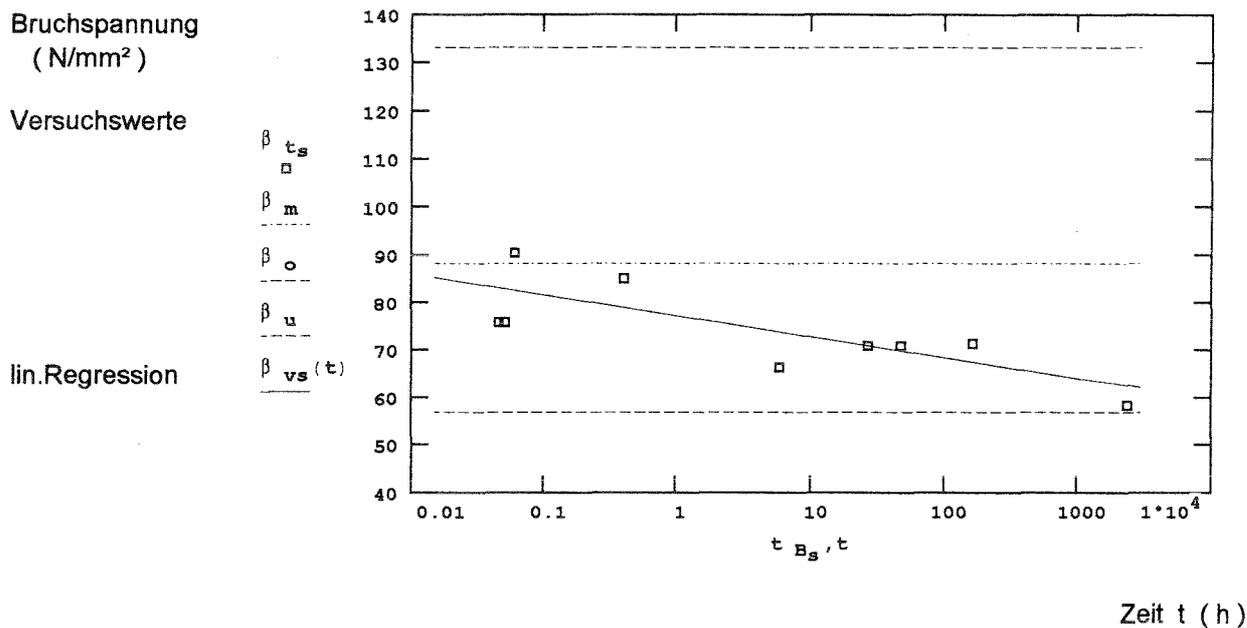
m : Mittelwert o,u : 95%-, 5%-Quantile

Zeit t (h)

Bild 34 : Zeitstandbruchverhalten (Spannung und Dehnung), Versuchsergebnisse doppel-logarithmische Darstellung

Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1%/min

Bruchspannung (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)
$\beta_m = 88.1$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$
$\beta_o = 133.1$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$
$\beta_u = 56.8$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$



Versuche Nr.:

SZ.0 - SZ.2
LZ.3 - LZ.8

m : o,u :
Mittelwert 95%-, 5%-Quantile

Zeit t (h)

Bild 35 : Zeitstandbruchverhalten (Spannung und Dehnung), Versuchsergebnisse
halb-logarithmische Darstellung

Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1%/min

Bruchspannung (N/mm²) Bruchdehnung (%)

Einzelwerte :

$\beta_m = 88.1$

$\epsilon_{Bm} = 1.222$

$\beta_{t_k}, \epsilon_{tB_k}$

$\beta_o = 133.1$

$\epsilon_{Bo} = 1.649$

$\beta_u = 56.8$

$\epsilon_{Bu} = 0.895$

Bruchspannung (N/mm²)

Versuchswerte

β_{t_s}

β_{t_k}

β_{t_h}

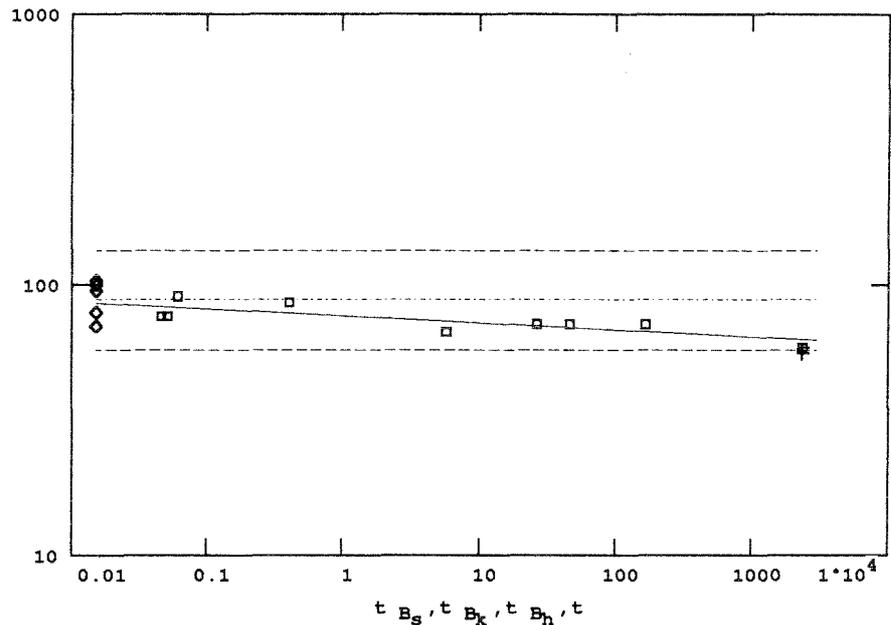
β_m

β_o

β_u

lin.Regression

$\beta_{vs}(t)$



Bruchdehnung (%)

Versuchswerte

ϵ_{tB_s}

ϵ_{tB_k}

ϵ_{tB_h}

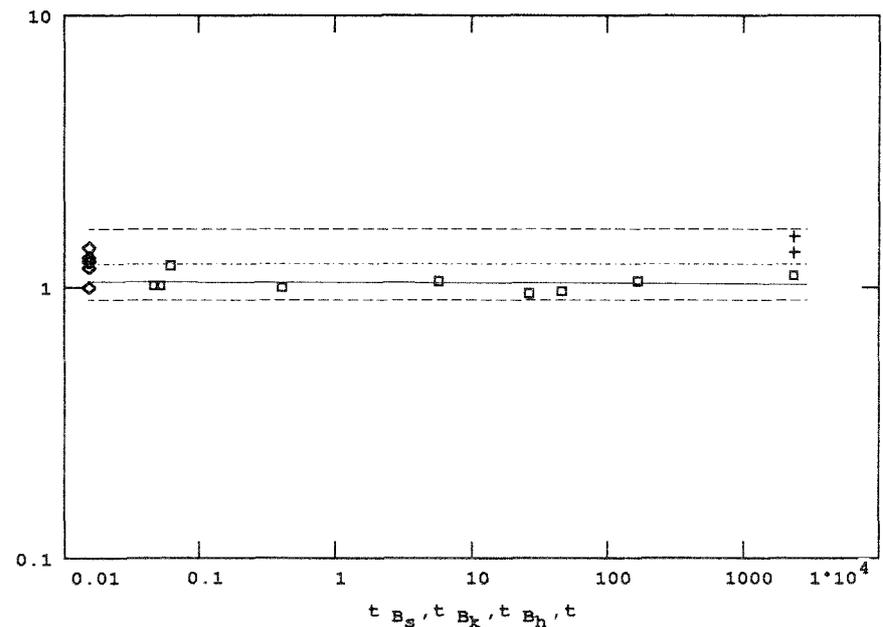
ϵ_{Bm}

ϵ_{Bo}

ϵ_{Bu}

lin.Regression

$\epsilon_{vBs}(t)$



Werte nach stufenförmiger Höherbelastung : $\beta_{t_h}, \epsilon_{tB_h}$

Zeit t (h)

Versuche Nr.: SZ.0 - SZ.2
LZ.3 - LZ.8

m : o,u :
Mittelwert 95%-, 5%-Quantile

Bild 36 : Zeitstandbruchverhalten (Spannung und Dehnung), Versuchsergebnisse einschließlich Kurzzeitversuche und Höherbelastung doppel-logarithmische Darstellung

Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1%/min

Bruchspannung (N/mm²) Bruchdehnung (%)

$\beta_m = 88.1$

$\epsilon_{Bm} = 1.222$

$\beta_o = 133.1$

$\epsilon_{Bo} = 1.649$

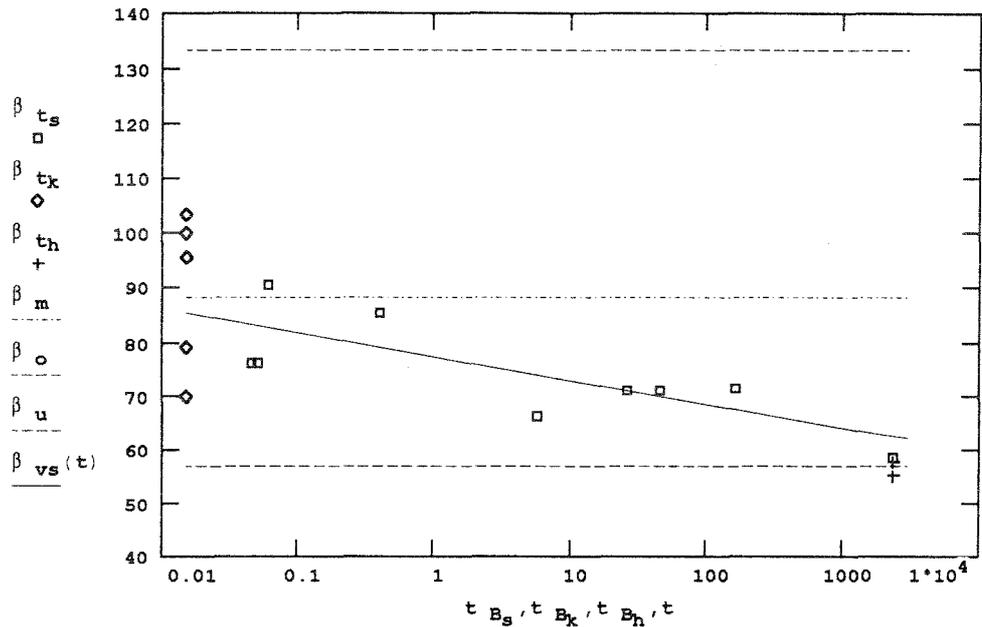
$\beta_u = 56.8$

$\epsilon_{Bu} = 0.895$

Bruchspannung
(N/mm²)

Versuchswerte

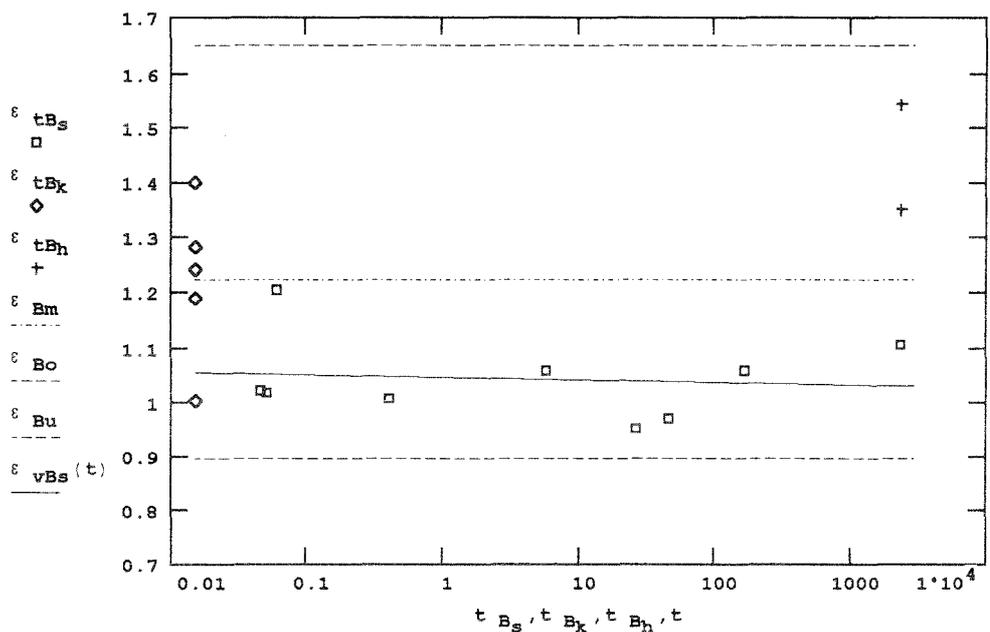
lin. Regression



Bruchdehnung
(%)

Versuchswerte

lin. Regression



Werte nach stufenförmiger Höherbelastung : $\beta_{t_h}, \epsilon_{tB_h}$

Zeit t (h)

Versuche Nr.: SZ.0 - SZ.2
LZ.3 - LZ.8

m : o, u :
Mittelwert 95%-, 5%-Quantile

Bild 37 : Zeitstandbruchverhalten (Spannung und Dehnung) Versuchsergebnisse einschließlich Kurzzeitversuche und Höherbelastung
halb-logarithmische Darstellung

Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1%/min

$\epsilon_{Bm} = 1.222$

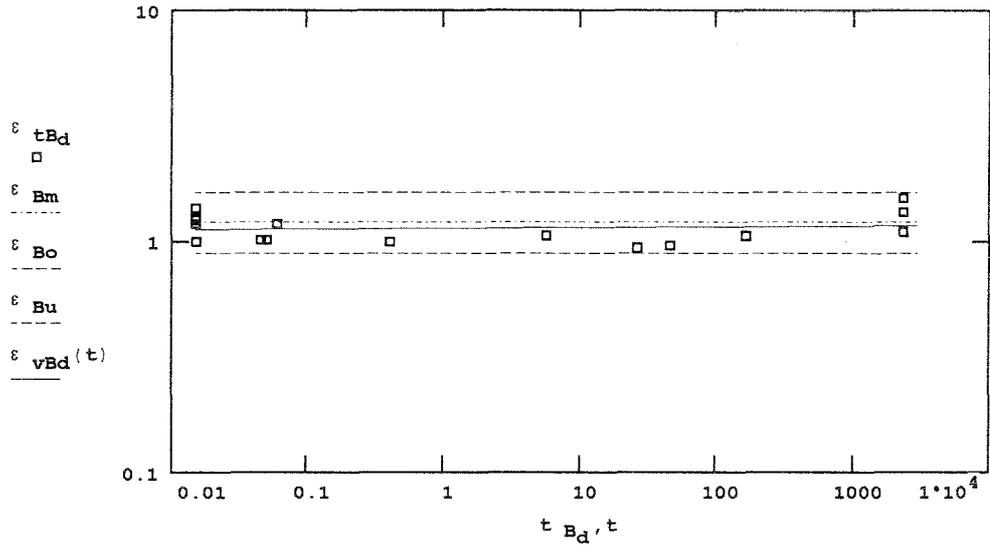
$\epsilon_{Bo} = 1.649$

$\epsilon_{Bu} = 0.895$

Bruchdehnung (%)

Versuchswerte

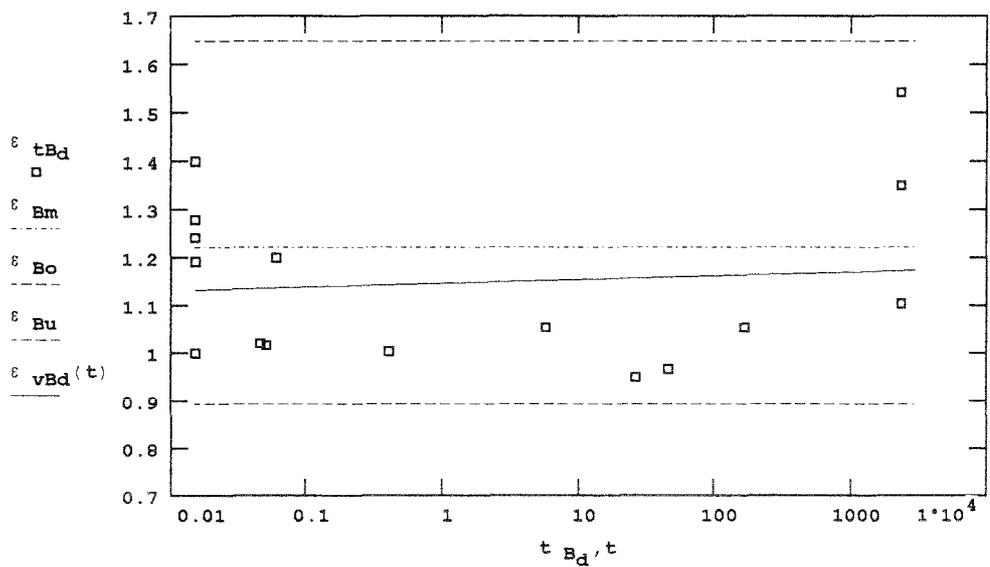
lin. Regression



Bruchdehnung (%)

Versuchswerte

lin. Regression



Versuche Nr.:

Z.0 - Z.4

SZ.0 - SZ.2

LZ.3 - LZ.10

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Zeit t (h)

Bild 38 : Zeitabhängige Bruchdehnungen, Versuchsergebnisse Kurzzeitversuche, Zeitstandversuche und Versuche mit Höherbelastung halb- und doppelt-logarithmische Darstellung

Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1%/min

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Bruchspannung (N/mm ²)	
$E_{om} := 8492$	$\epsilon_{Bm} = 1.222$	$f_{Rm} = 0.84939$	$\beta_m = 88.1$	Einzelwerte
$E_{oo} := 10744$	$\epsilon_{Bo} = 1.649$	$f_{Ro} = 0.74909$	$\beta_o = 133.1$	β_{t_x}
$E_{ou} := 6663$	$\epsilon_{Bu} = 0.895$	$f_{Ru} = 0.9522$	$\beta_u = 56.8$	

Zeitbruchlinien, Anstieg aus lin. Regression der Bruchwerte (doppelt-logarithmisch)

$$K_{vt} := \left(\frac{2 \cdot 10^5}{0.015} \right)^{-x \beta_s} \quad k_{\beta_s} = -0.02597 \quad K_{vt} = 1.531$$

Berechnete Zeitbruchlinien

Zeitexponent

Kriechfaktor

$$\beta_c(t) := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot \frac{f_R}{c_t(t)} \cdot E_o$$

$$k_{tm} = 0.02598$$

$$c_t(t) := \left(\frac{t}{0.015} \right)^{k_t}$$

$$k_{tu} = 0.02462$$

$$k_{to} = 0.02741$$

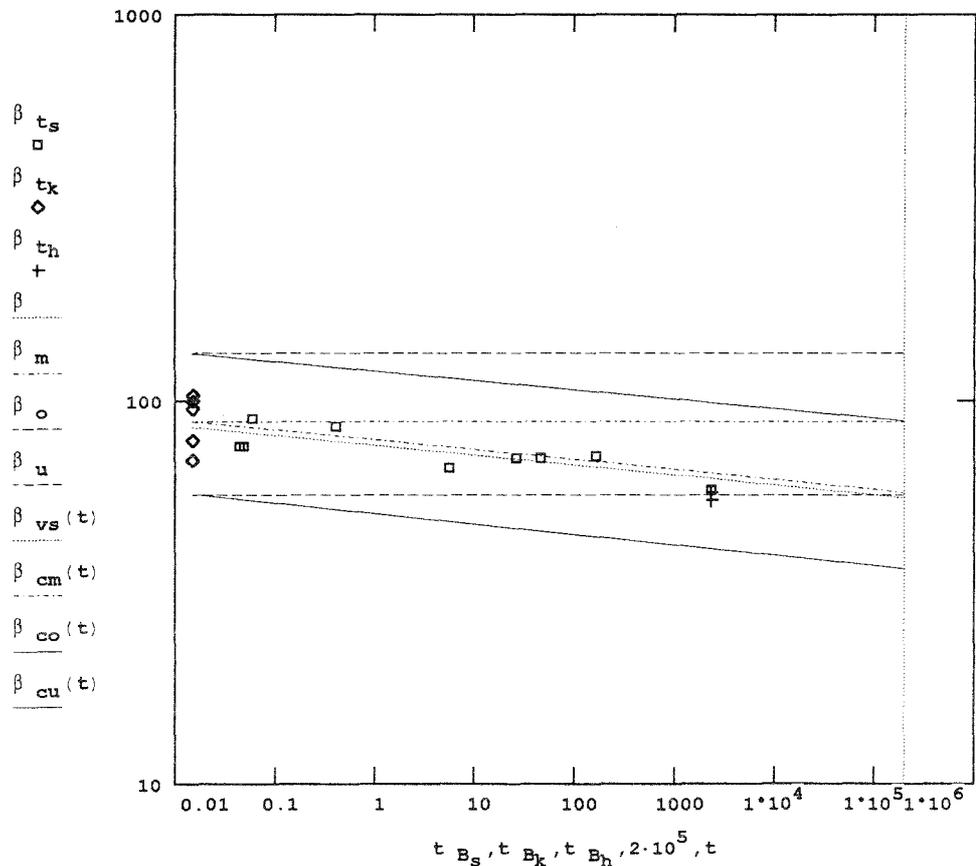
$$c_{tu}(2 \cdot 10^5) = 1.568$$

Bruchspannung
(N/mm²)

Versuchswerte

lin. Regression

berechnete Zeit-
standbruchlinien



Zeit t (h)

Werte nach stufenförmiger Höherbelastung : β_{t_h}

Versuche Nr.: SZ.0 - SZ.2
LZ.3 - LZ.8

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Bild 39 : Berechnete Zeitstandbruchlinie (Spannung) im Vergleich zu Meßwerten
doppelt-logarithmische Darstellung

Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit 1%/min

Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Bruchdehnung (%)	Bruchdehnungsfaktor	Bruchspannung (N/mm ²)	
E _{om} := 8492	ε _{Bm} = 1.222	f _{Rm} = 0.84939	β _m = 88.1	Einzelwerte
E _{oo} := 10744	ε _{Bo} = 1.649	f _{Ro} = 0.74909	β _o = 133.1	β _{t_k}
E _{ou} := 6663	ε _{Bu} = 0.895	f _{Ru} = 0.9522	β _u = 56.8	

Zeitbruchlinien, Anstieg aus lin. Regression der Bruchwerte (doppelt-logarithmisch)

$$K_{vt} := \left(\frac{2 \cdot 10^5}{0.015} \right)^{-k_{\beta s}} \quad k_{\beta s} = -0.02597 \quad K_{vt} = 1.531$$

Berechnete Zeitbruchlinien

Zeitexponent

Kriechfaktor

$$\beta_{c(t)} := \epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot \frac{f_R}{C_t(t)} \cdot E_o$$

$$k_{tm} = 0.02598$$

$$C_t(t) := \left(\frac{t}{0.015} \right)^{k_t}$$

$$k_{tu} = 0.02462$$

$$k_{to} = 0.02741$$

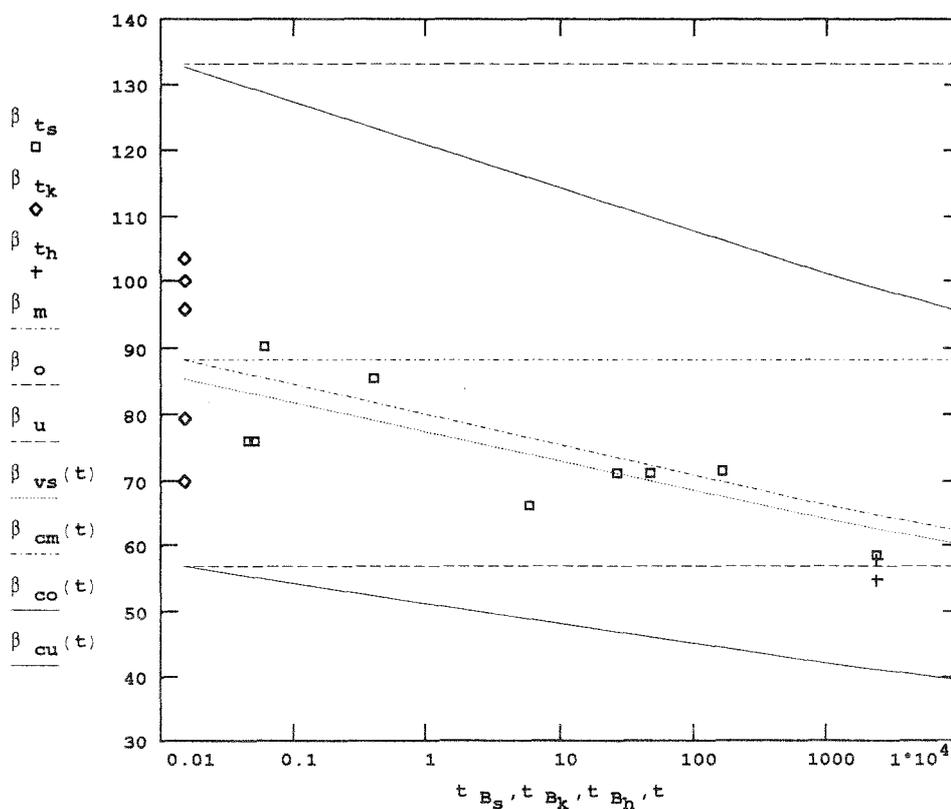
$$C_{tu}(2 \cdot 10^5) = 1.568$$

Bruchspannung
(N/mm²)

Versuchswerte

lin. Regression

berechnete Zeit-
standbruchlinien



Zeit t (h)

Werte nach stufenförmiger Höherbelastung : β_{t_h}

Versuche Nr.: SZ.0 - SZ.2
LZ.3 - LZ.8

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Bild 40 : Berechnete Zeitstandbruchlinie (Spannung) im Vergleich zu Meßwerten
halb-logarithmische Darstellung

Die Zeitlinie für die übliche Bemessungszeit von $2 \cdot 10^5$ h ist in Bild 40 hervorgehoben. Der gemessene Abminderungsfaktor $K_{vt} = 1,531$ unterscheidet sich praktisch nicht von dem der Berechnung zugrunde gelegten Kriechfaktor $C_{tu} = 1,568$ aus Zeitdehnlagen ohne Schädigungen (mit dem ungünstigsten Zeitexponenten k_{to} ermittelt).

2.4 Traglastversuche

Mit dem Aufbau nach Bild 41 wurde weitgehend entsprechend DIN 18807, Teil 2 im Versuch "Feld" das aufnehmbare Biegemoment M_d bestimmt.

Die Prüfkörper nach Bild 9 wurden als Einfeldträger mit 4 gleichen Linienlasten beansprucht (Bilder 42 bis 47). Die Last wurde stufenförmig in möglichst gleichen Zeitabständen entweder bis zum Bruch (Versuche KP.0 bis KP.2) oder bis zur geplanten Zeitstandlast gesteigert (LP.0 bis LP.6). Bei zwei Prüfkörpern (LP.4 und LP.5) wurde nach 78 h bzw. 118 h Dauer die Beanspruchung bis zum Versagen erhöht, einer (LP.6) nach 531 h entlastet.

Nach den jeweiligen Last - Stufen bzw. - Zeiten wurden die vertikalen Verschiebungen an den Meßstellen nach den Bildern 48 und 49 gemessen. Zusätzlich wurde bei ausgewählten Laststufen das Verformungsbild in dem Raster nach Bild 50 relativ zu einer Normalen erfaßt. Gemessen wurde mit Meßuhren (1/100 mm Genauigkeit), die sowohl unterhalb als auch oberhalb des Prüfkörpers angebracht waren (Bilder 51 und 52). Das Raster wurde mit einer Vorrichtung, die auf horizontalen Schienen verschiebbar war, abgetastet.

Mit etwa dem 0,3 - fachen aufnehmbaren Moment wurden alle Prüfkörper vorbelastet und das entstehende Beulmuster beobachtet. Entsprechend dem Verlauf der Beulwellen in Gurtmitte wurden Dehnungsmeßstreifen wie bei den Zugversuchen nach dem Plan in Bild 53 aufgeklebt.

2.4.1 Beulmuster

Schon bei Biegemomenten $M_F < 0,25 M_d$ unter 25 % des übertragbaren Momentes beginnen sich Beulen auszubilden. In den Bildern 54 und 55 ist am Beispiel des Versuchs LP.0 das Verhalten mit zunehmendem Moment in Gurtmitte in Längs - und Querrichtung dargestellt.

In Längsrichtung entsprechen die Beulen ziemlich genau einer Sinuswelle, die ihre Lage bis zum Versagen nicht ändert. Ebenso bleibt der Abstand zwischen Hoch- und Tiefpunkt etwa gleich. Der Abstand u_T lag unterhalb der rechnerischen Gurtbreite b_0 . Bei den Vorbelastungen wurden (Genauigkeit der Erfassung unter ± 5 mm) Werte des Abstandes u_T zwischen 90 und 100 mm gemessen. Berücksichtigt man die aussteifende Wirkung der Krümmungsradien zwischen Gurt und Steg (Bild 9) von 10 mm, so stimmt das Verhalten sehr gut mit der theoretischen Annahme eines quadratischen Beulmusters überein.

In Querrichtung konnten aus versuchstechnischen Gründen die Verschiebungen nur bis zum Biegemoment $M_F = 180$ Nm verfolgt werden.

Es zeigt sich eine vergleichsweise flache Kurve an der gemessenen Stelle. Ab Lasten, die etwa dem theoretischen Beginn des Beulens in den Stegen entsprechen, bilden sich von den Rändern her leicht gegenläufige Verformungen.

Die einzelnen Beulen benachbarter Gurte traten sowohl an gleicher Stelle als auch versetzt zueinander auf, woraus zu schließen ist, daß benachbarte Rippen sich gegenseitig vernachlässigbar gering beeinflussen (Bild 52).

Das Versagen tritt am Druckgurtrand im Bereich der größten Druckdehnungen etwa in der Nähe der Hochpunkte der Beulwellen ein. Ausgelöst wurde das Versagen sowohl im gemessenen mittleren Druckgurt als auch in den daneben liegenden Gurten (Bilder 56 bis 59).

Brüche im Bereich der Lasteinleitung wurden nur beobachtet, wenn vorher der Prüfkörper in Feldmitte versagt hatte.



Bild 42: Traglastversuche
Prüfkörper ohne Last

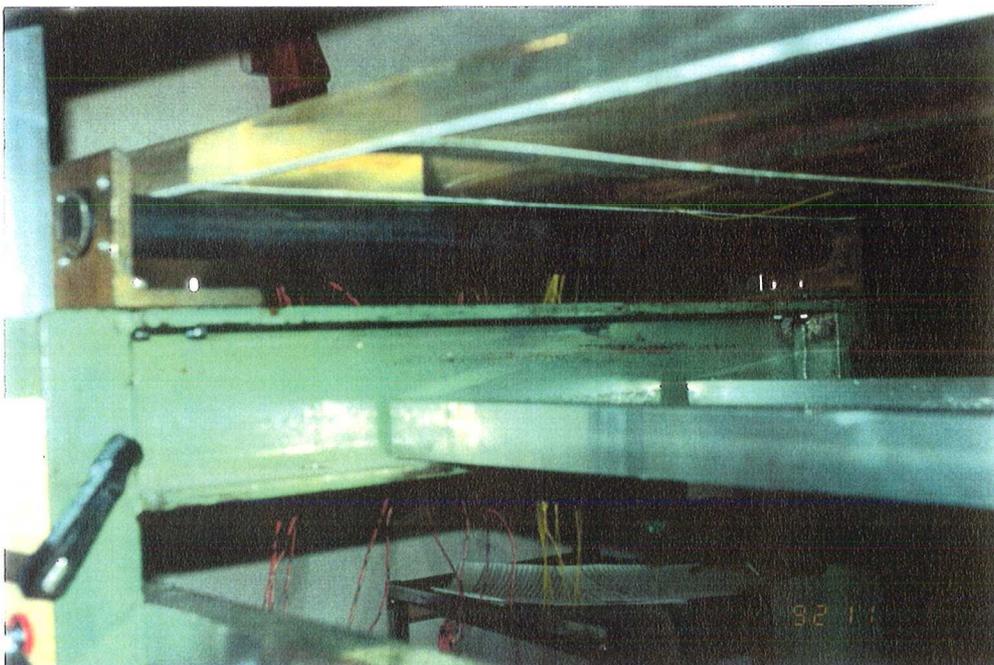


Bild 43: Traglastversuche
Rollen - Kipp - Auflager

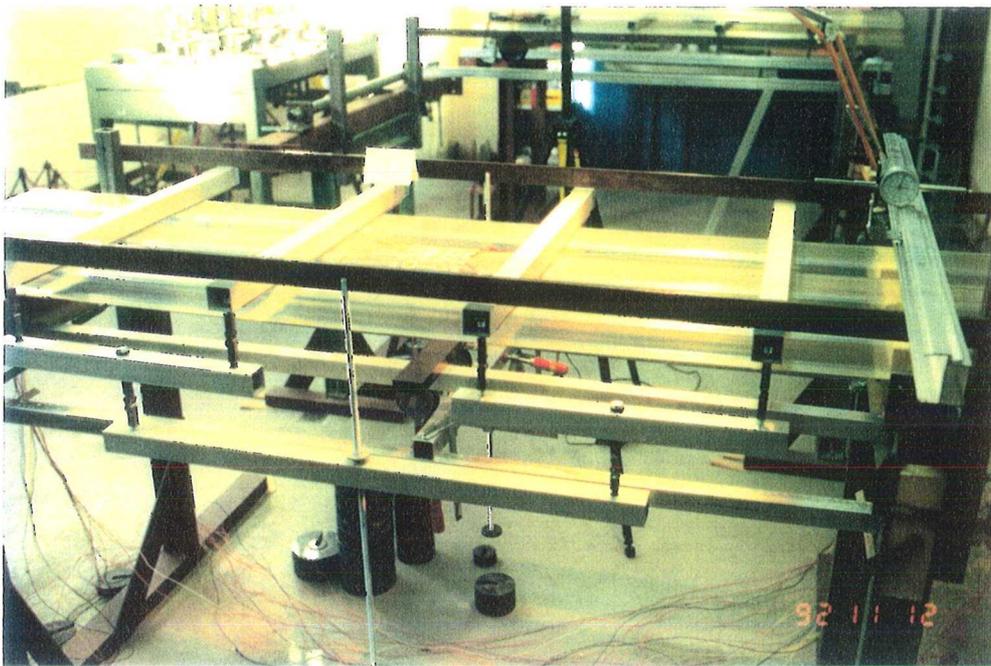


Bild 44: Traglastversuche
Lasteinleitungskonstruktion



Bild 45: Zeitstandversuche
geringe Belastung

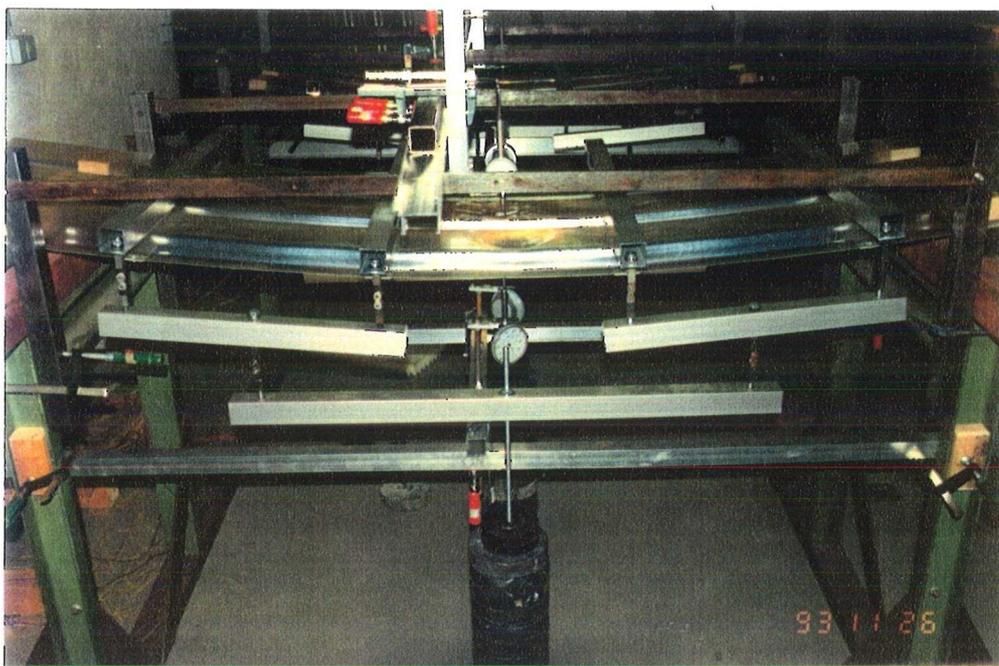


Bild 46: Zeitstandversuch
hohe Belastung

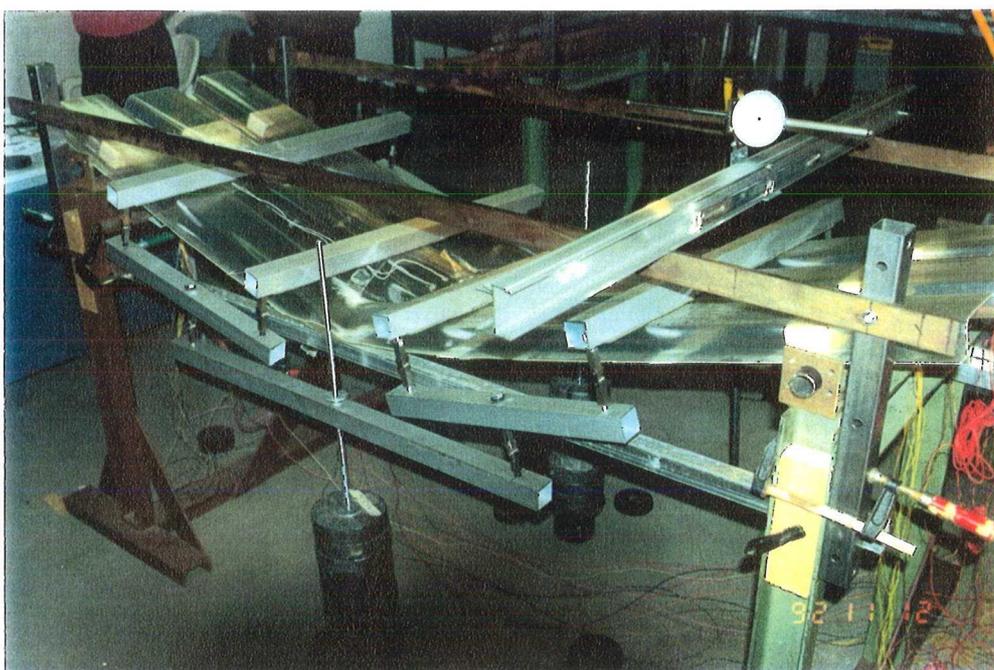
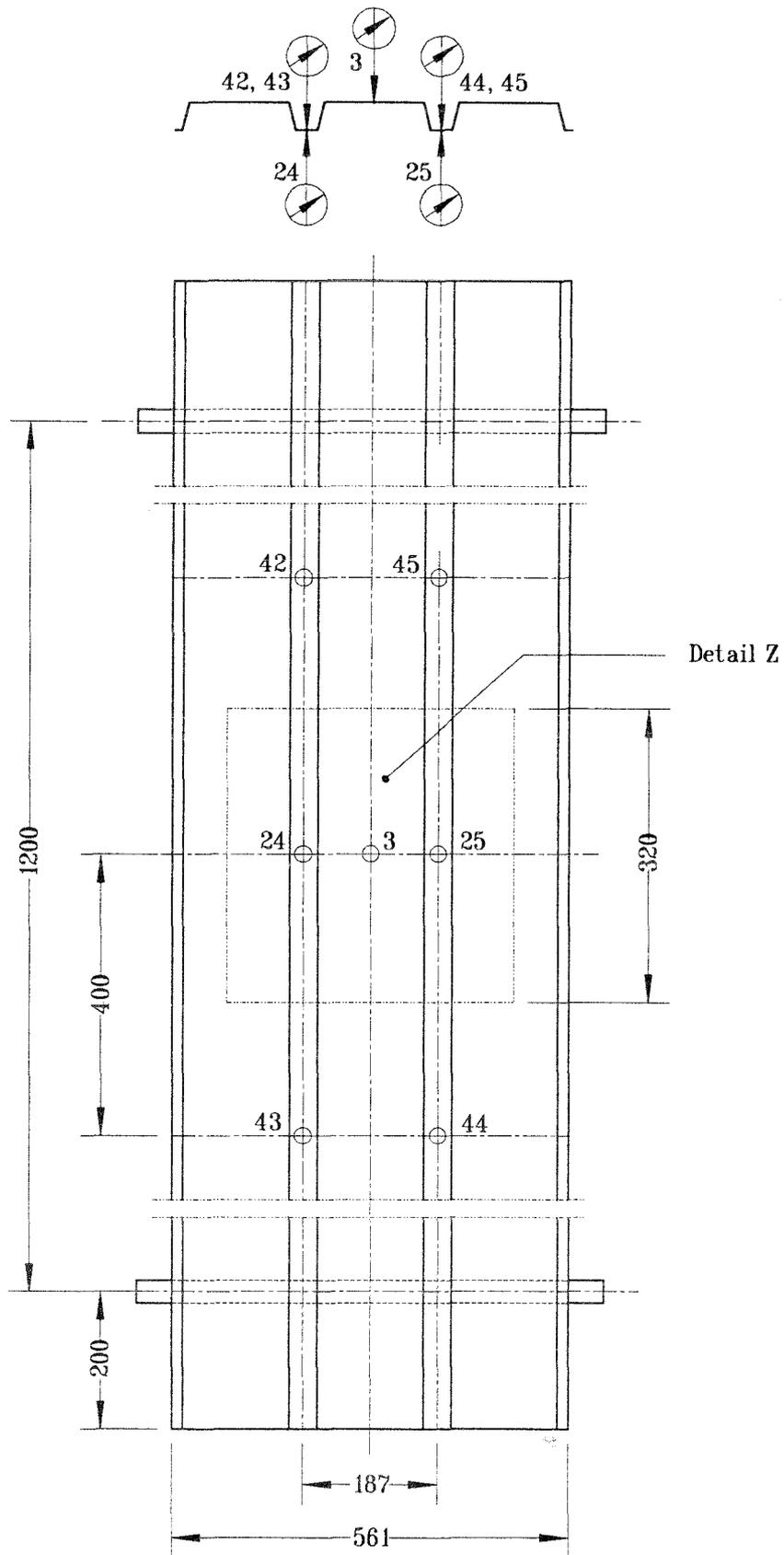
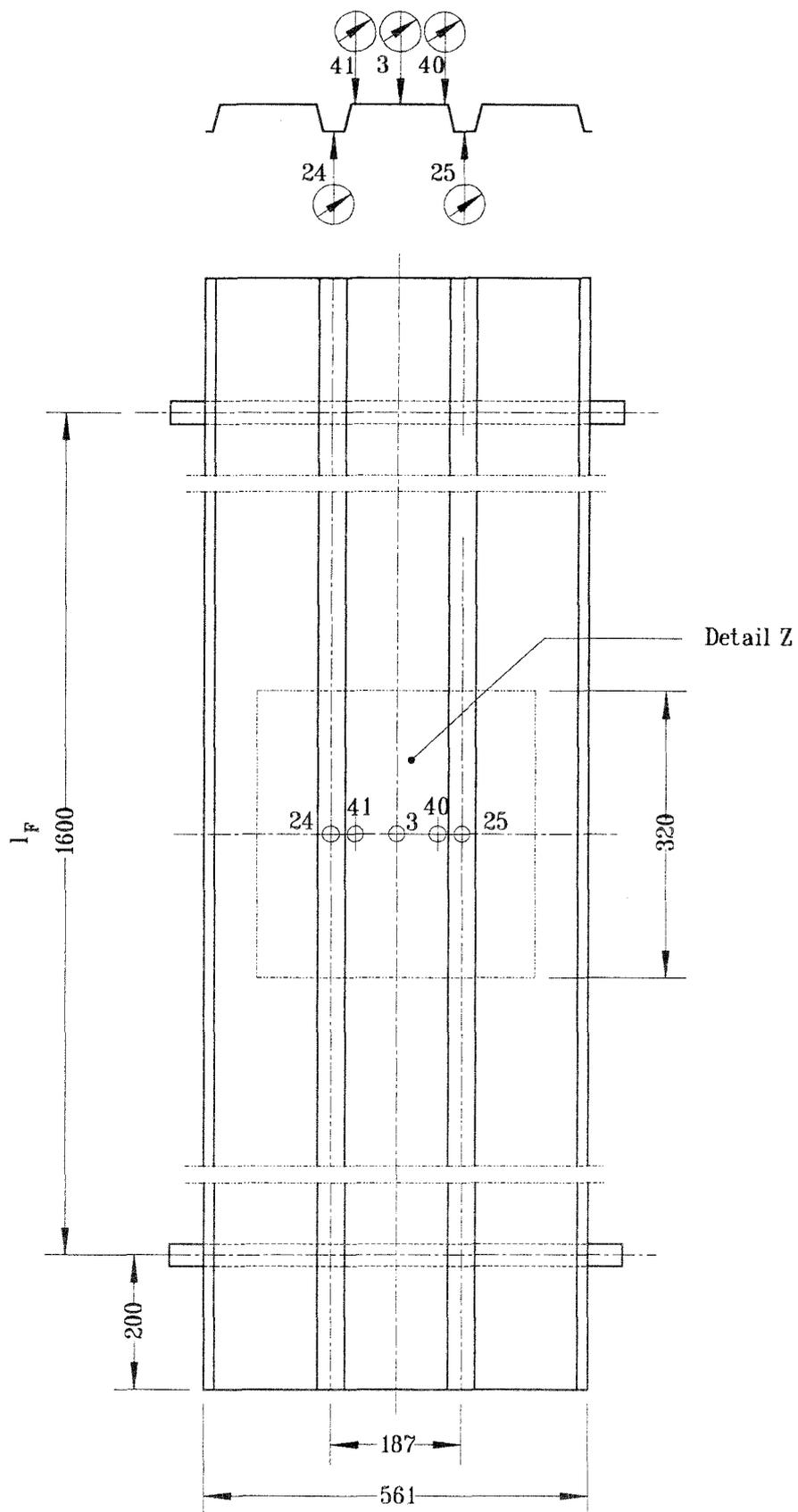


Bild 47: Traglastversuch
nach dem Versagen



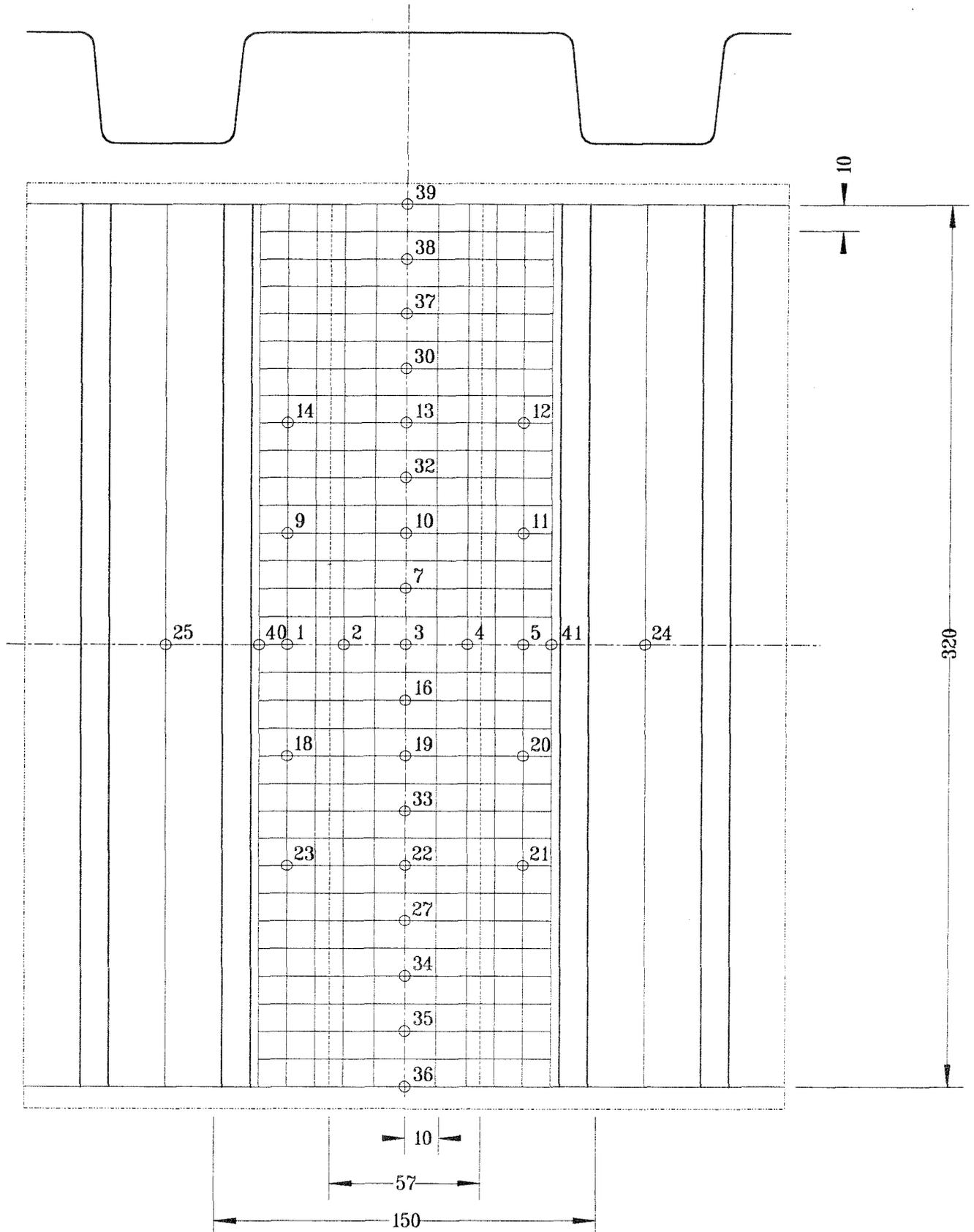
Vers.-Nr.:
 KP.0 - KP.2

Bild 48 : Meßstellenplan, Verschiebungen



Vers.-Nr.:
LP.0 - LP.6

Bild 49 : Meßstellenplan, Verschiebungen



Meßstellen 40 und 41 nur bei Versuch LP.0 - LP.6 gemessen

Vers.-Nr.:

KP.0 - KP.2
LP.0 - LP.6

Bild 50 : Meßstellenplan, Detail Z, Verschiebungen

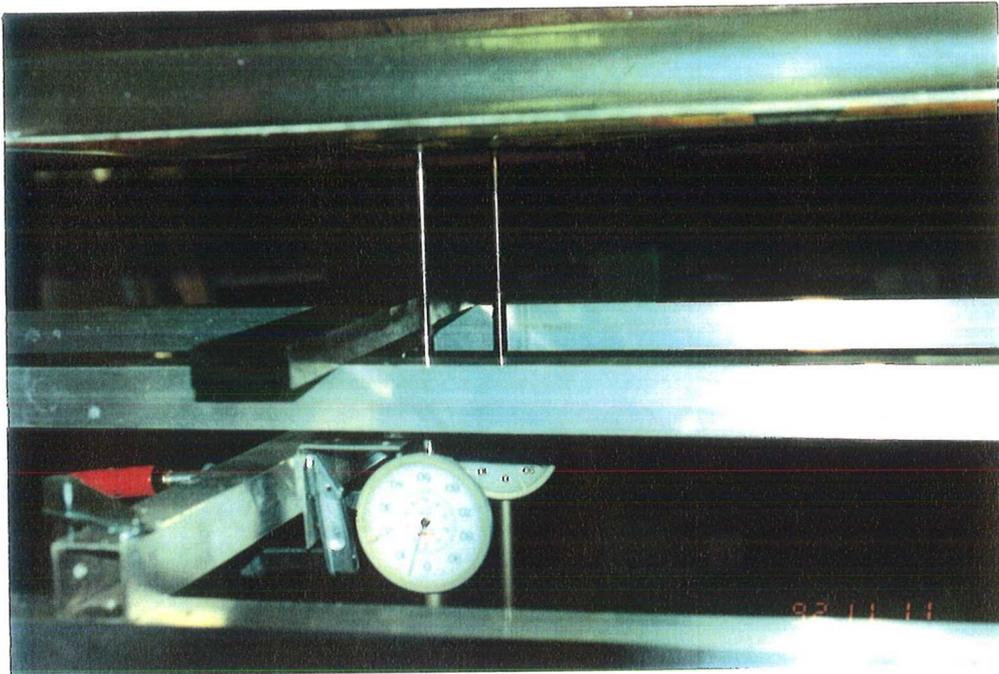


Bild 51: Traglastversuche
Meßuhren unterhalb des Prüfkörpers

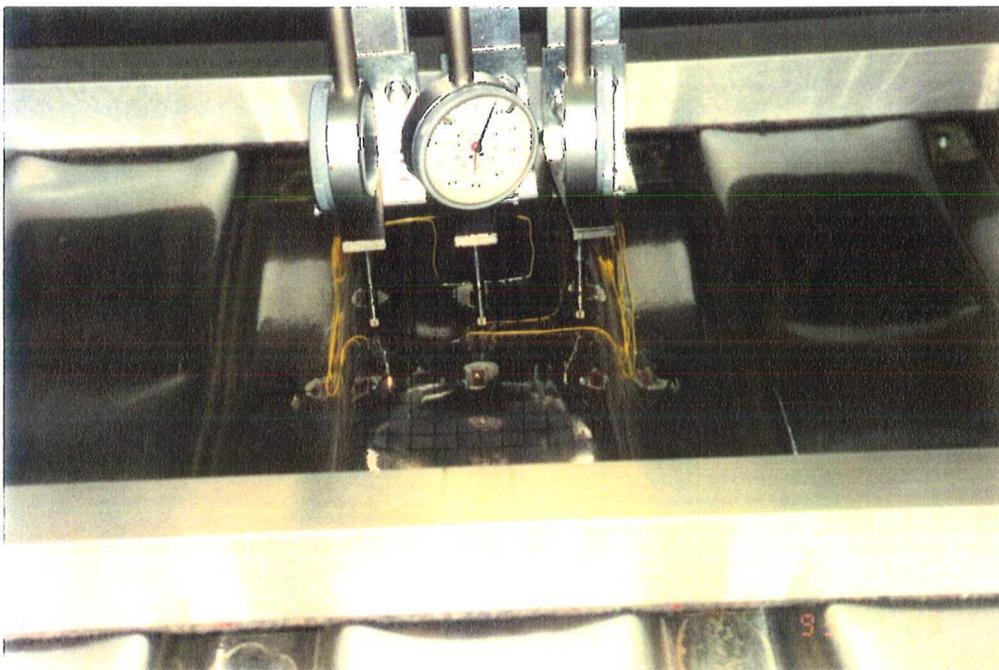
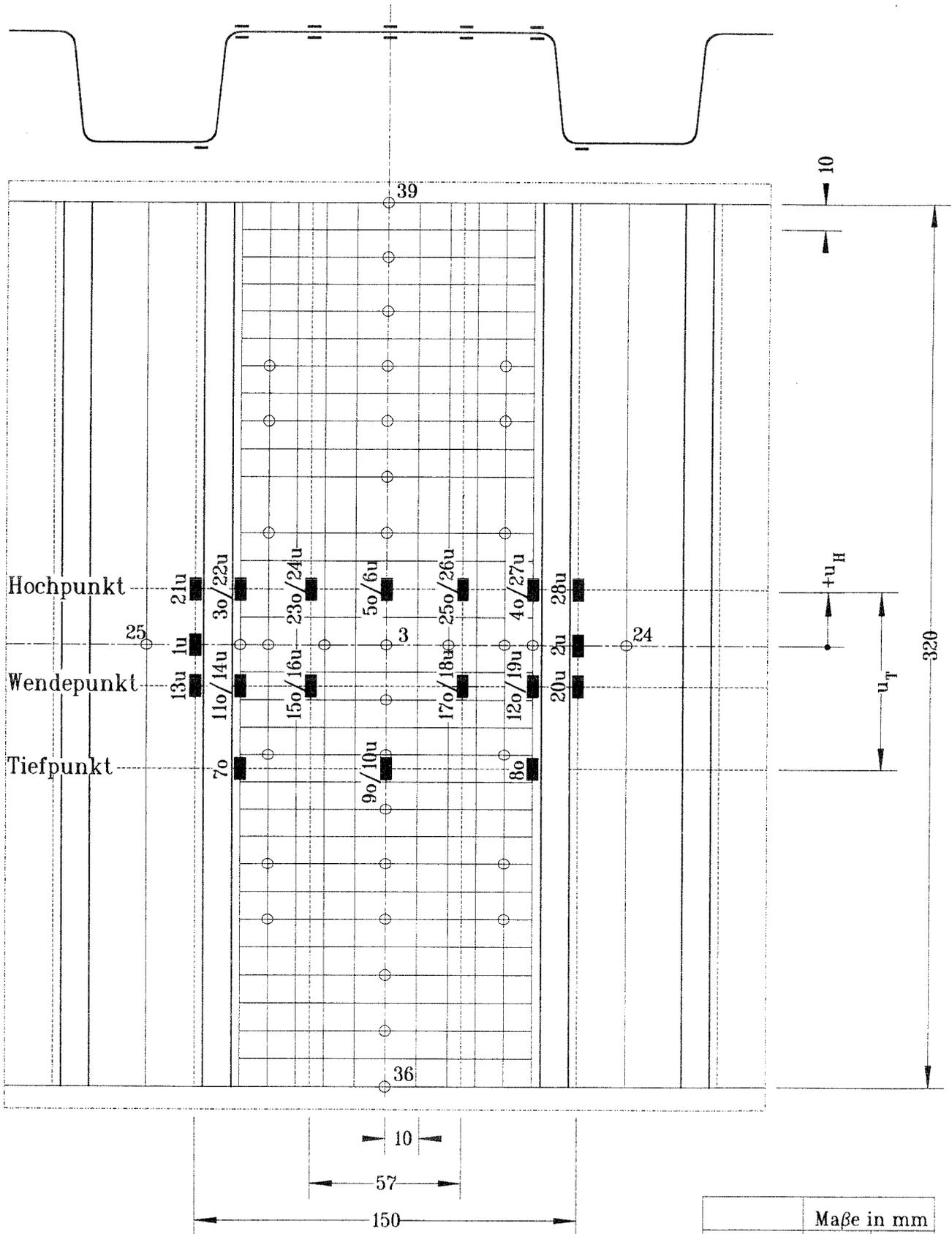


Bild 52: Traglastversuche
Meßuhren oberhalb des Prüfkörpers



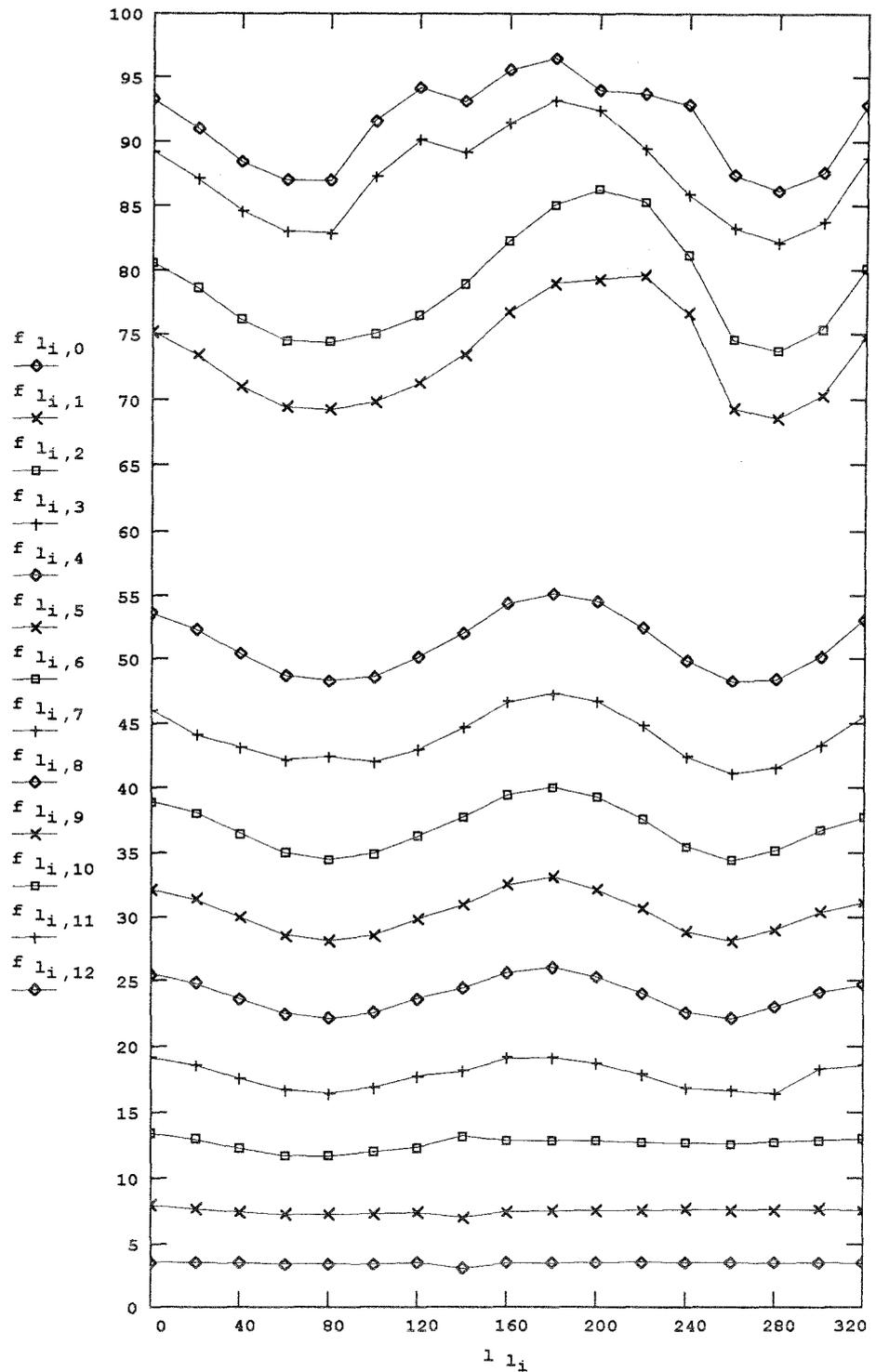
Meßstellen 7 - 10 nur bei Versuch KP.2 gemessen

Bild 53 : Meßstellenplan, Detail Z, Dehnungsmeßstreifen

Verschiebung
(mm)

Moment
(Nm)

j	M F _j
0	17.6
1	37.6
2	57.6
3	77.6
4	97.6
5	117.6
6	137.6
7	157.6
8	177.6
9	229.6
10	237.6
11	253.6
12	257.6



Versuch Nr.:

LP.0

Feldmitte bei Gurtlänge 160

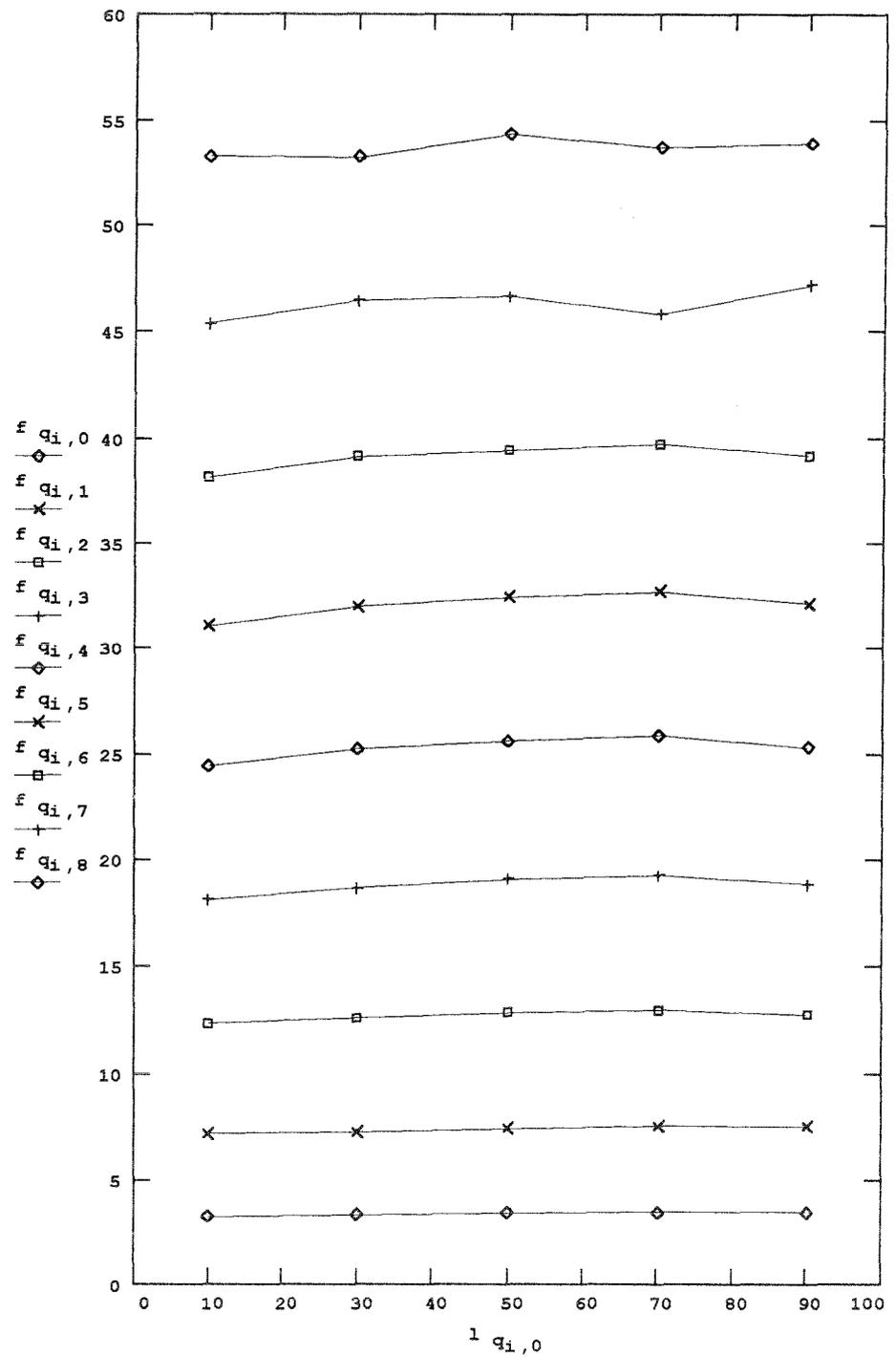
Gurtlänge (mm)

Bild 54 : Verlauf der vertikalen Verschiebungen in Gurtmitte (Längsrichtung) bei steigenden Biegemomenten

Verschiebungen
(mm)

Moment
(Nm)

j	M _{Fj}
0	17.6
1	37.6
2	57.6
3	77.6
4	97.6
5	117.6
6	137.6
7	157.6
8	177.6



Versuch Nr.:

LP.0

Gurtmitte bei Breite 50

Gurtbreite (mm)

Bild 55 : Verlauf der vertikalen Verschiebungen in Feldmitte (Querrichtung) bei steigenden Biegemomenten

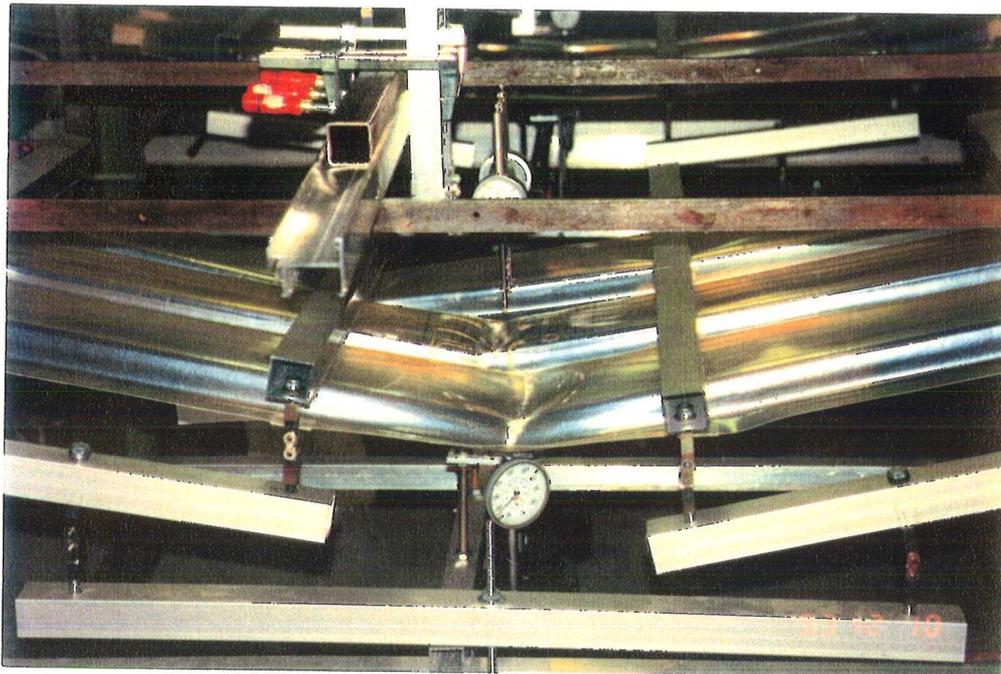


Bild 56: Zeitstandversuch
nach dem Versagen

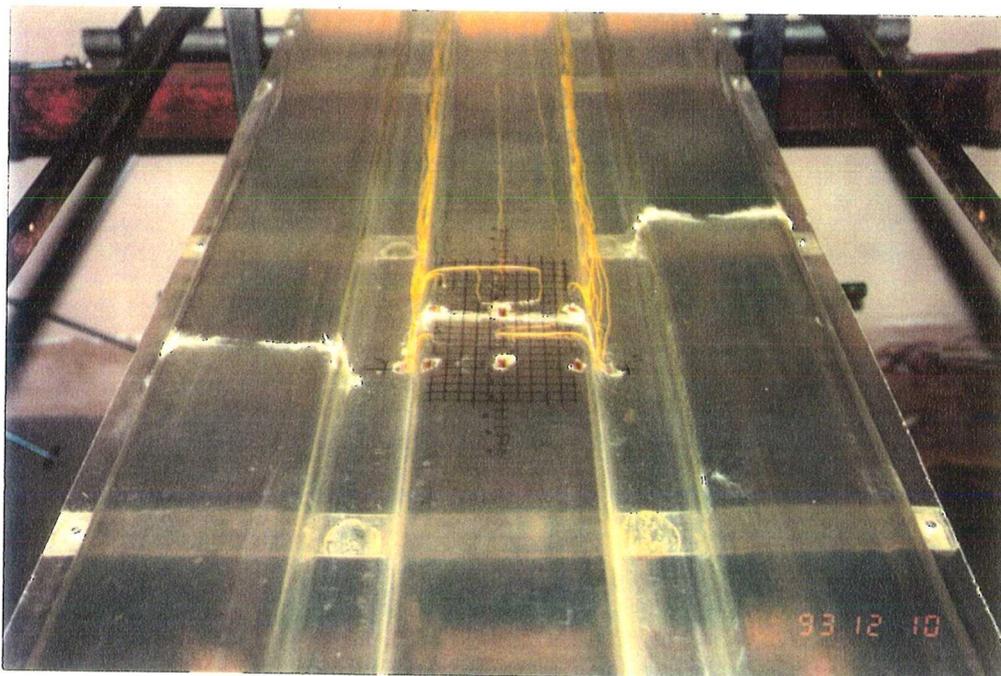


Bild 57: Zeitstandversuch
Prüfkörper nach Versagen

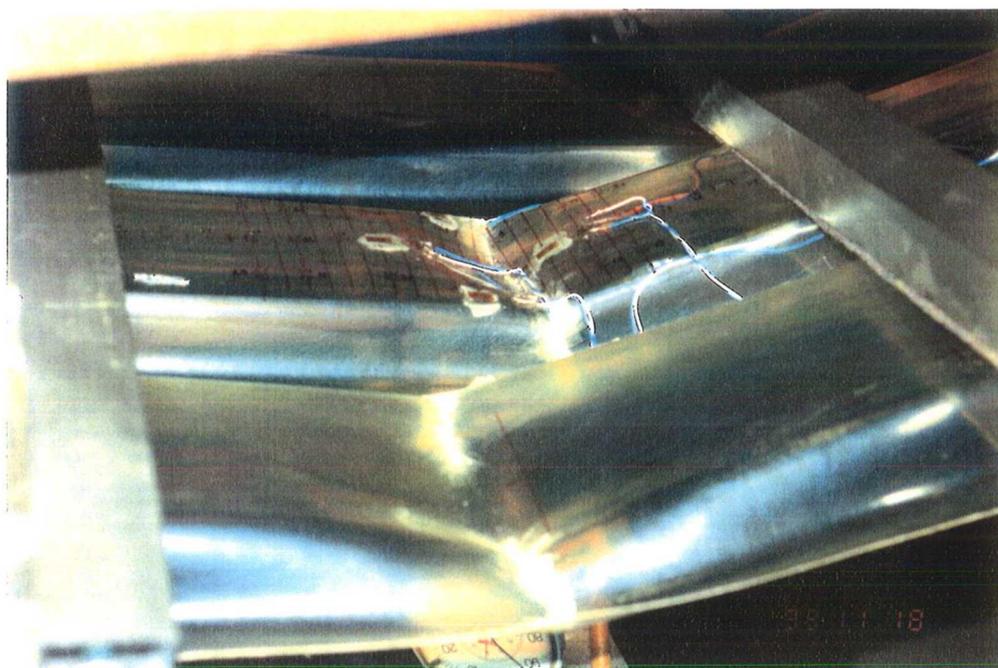


Bild 58: Zeitstandversuch
nach Versagen

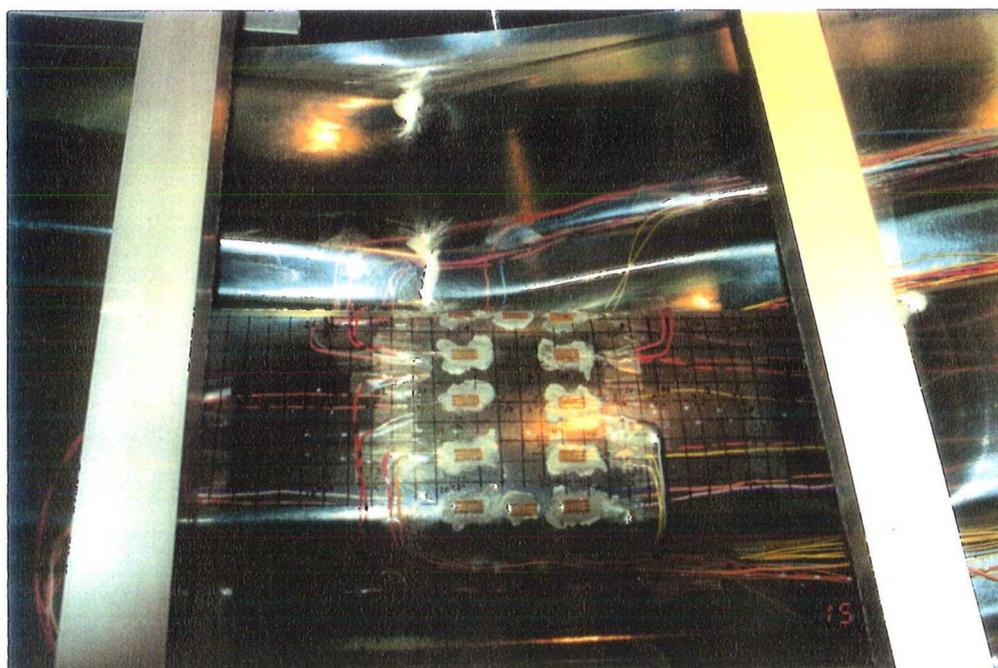


Bild 59: Traglastversuch
nach Versagen

2.4.2 Theoretische Querschnittswerte

Für die mittleren Abmessungen des Prüfkörpers nach Bild 9 wurden entsprechend den Rechnungsschritten A und B (Abschnitt 1.3.1) mit {54.1} bis {54.5} die wirksamen Querschnittsflächen in Druckgurt und Steg ermittelt (siehe auch Bild 3) und daraus nach der Bedingung {55} mit der Annahme eines konstanten Verformungsmoduls über dem gesamten Profilquerschnitt das wirksame Trägheitsmoment I_{cw} abhängig von der Dehnung am Druckgurtrand ε_f ermittelt.

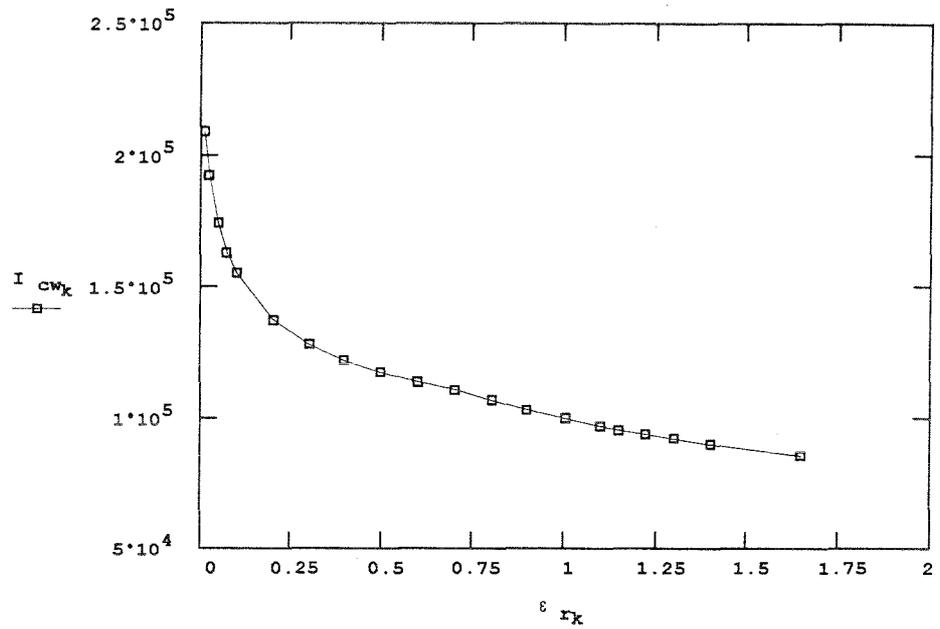
Für die Darstellung in Bild 60 der wirksamen Querschnittsflächen im Druckgurt A_{wo} und im Steg A_{ws} sowie deren Auswirkung auf das Trägheitsmoment wurde als maximale rechnerische Dehnung die 95 % - Quantile der Werkstoff - Bruchdehnung ε_{Bo} gewählt. Die berechneten Werte sind für das Profil unabhängig vom Werkstoff. Nach der Theorie war ja nur vorausgesetzt, daß der Verformungsmodul für den jeweiligen Verformungszustand über dem Gesamtquerschnitt gleich groß ist.

Um den Einfluß der Dehnungsabhängigkeit des Verformungsmodul abschätzen zu können, wurden in einem weiteren Rechnungsschritt für Dehnungen im Druckgurt bis zur mittleren Bruchdehnung ε_{Bm} bzw. 5 % - Quantile ε_{Bu} das Verformungsmodulverhältnis ν_E zwischen den Dehnungen ε_f im Druckgurt und den Dehnungen ε_{cu} im gezogenen Gurt berücksichtigt. Hierbei wurden die Beziehungen {51.1 bzw. 51.2} zur Ermittlung von ν_E verwendet (siehe hierzu auch die Bilder 69 und 70). Die Dehnungen ε_{cu} an der Unterseite wurden aus dem Verhältnis der Schwerpunktabstände e_{co} zu e_{cu} nach den beiden ersten Rechnungsschritten bestimmt. Wegen der relativ schwach gekrümmten Spannungs - Dehnungs - Linie (Bild 13) unterscheiden sich die Querschnittswerte und Dehnungen an der Elementunterseite bei den vorhandenen Profilmäßen nur wenig.

Die Ergebnisse des dritten Rechnungsschrittes mit dehnungsabhängigem Verformungsmodul $I_{vwm} \hat{=} I_{wvm}$, $e_{ovm} \hat{=} e_{vom}$ und $\varepsilon_{vum} \hat{=} \varepsilon_{uvm}$ sind im Vergleich zu den Werten mit konstantem Verformungsmodul in den Bildern 61 und 62 wiedergegeben.

Wirksames
Trägheitsmoment

I_{cw}
(mm^4)

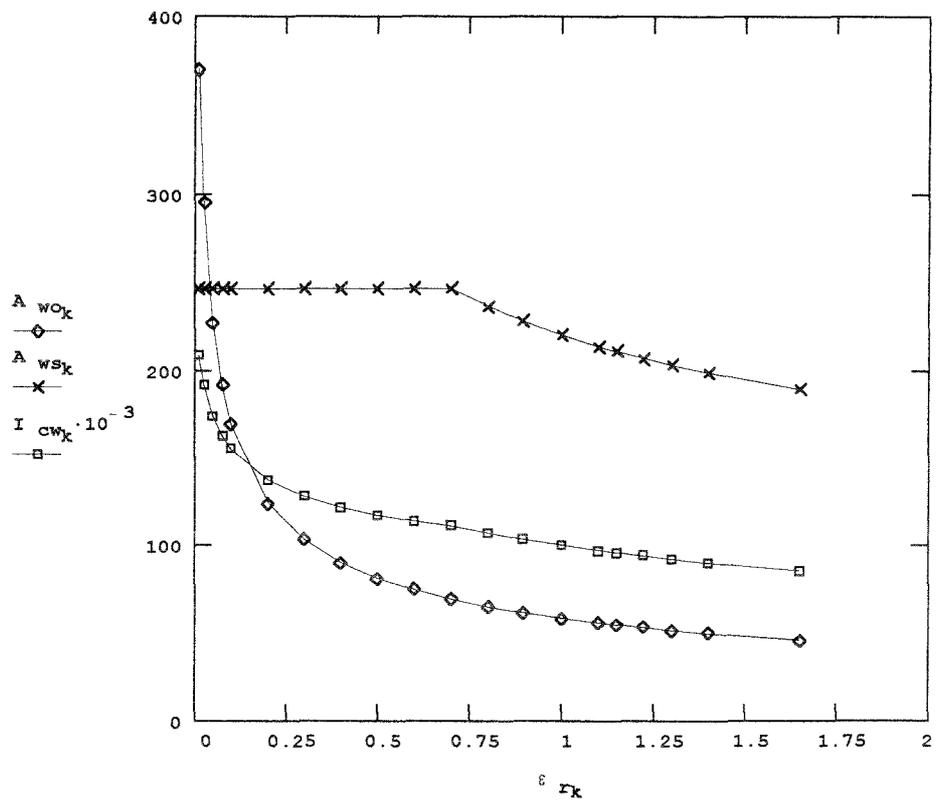


Wirksame
Querschnittsflächen

A_{wo}
 A_{ws}
(mm^2)

Wirksames
Trägheitsmoment

I_{cw}
(mm^4)



Positivlage

Dehnung ϵ_r (%)

Bild 60 : Wirksames Trägheitsmoment und wirksame Querschnittsflächen in Druckgurt und Steg in Abhängigkeit von der Dehnung am Druckgurtrand
Verformungsmodul über Querschnitt konstant angenommen

Verformungsmodul
über Querschnitt
dehnungsabhängig

$$I_{wvm}(\epsilon_{Bm}) = 96598$$

$$e_{vom}(\epsilon_{Bm}) = 26.36$$

$$e_{vum}(\epsilon_{Bm}) = 14.59$$

über Querschnitt
konstant

$$I_{wc}(\epsilon_{Bm}) = 93901$$

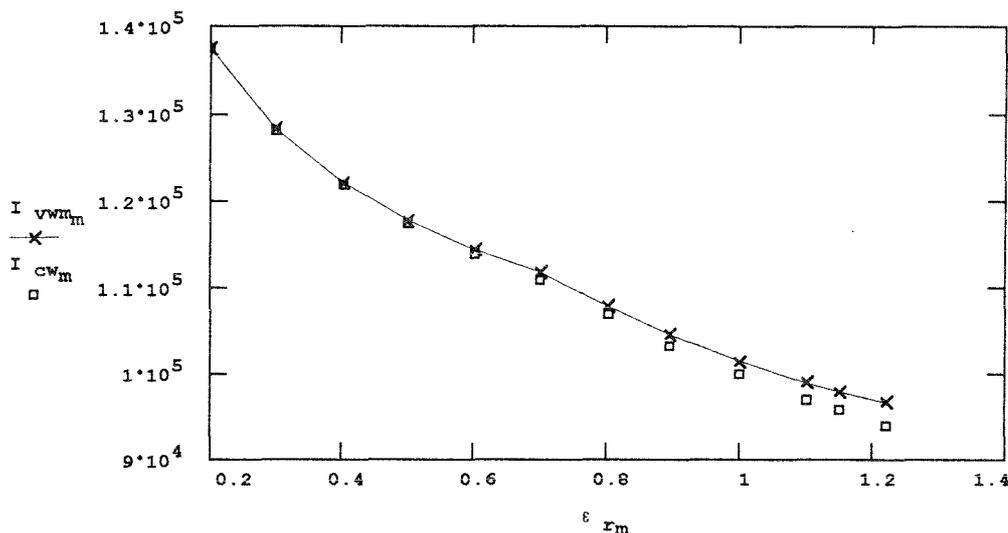
$$e_{oc}(\epsilon_{Bm}) = 25.87$$

$$e_{uc}(\epsilon_{Bm}) = 15.08$$

Bruchdehnung : $\epsilon_{Bm} = 1.222$

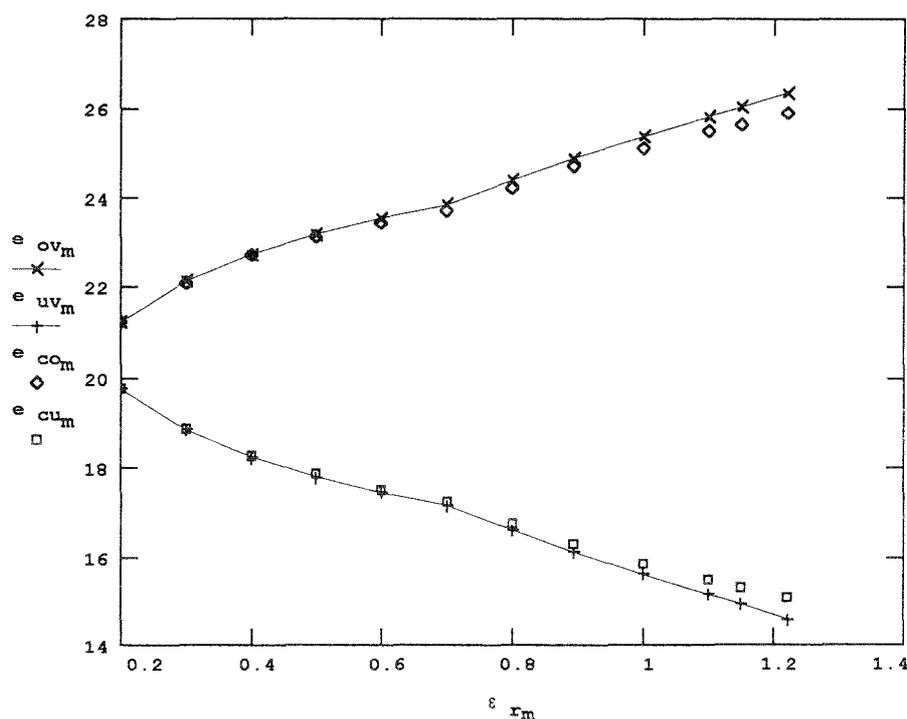
Wirksames
Trägheits-
moment

I_w
(mm^4)



Schwerpunkt-
abstände

e
(mm)



m :
Mittelwert

Positivlage

Dehnung ϵ_r (%)

Bild 61 : Vergleich zwischen unterschiedlich berechneten wirksamen Trägheitsmomenten und Schwerpunktabständen
Verformungsmodul (Mittelwert) über Querschnitt dehnungsabhängig oder konstant

Verformungsmodul
über Querschnitt
dehnungsabhängig

$$\epsilon_{vum}(\epsilon_{Bm}) = 0.68$$

$$v_{Em}(0.01) = 0.999$$

$$v_{Em}(\epsilon_{Bm}) = 1.076$$

$$v_{Eu}(0.01) = 1.002$$

$$v_{Eu}(\epsilon_{Bu}) = 1.019$$

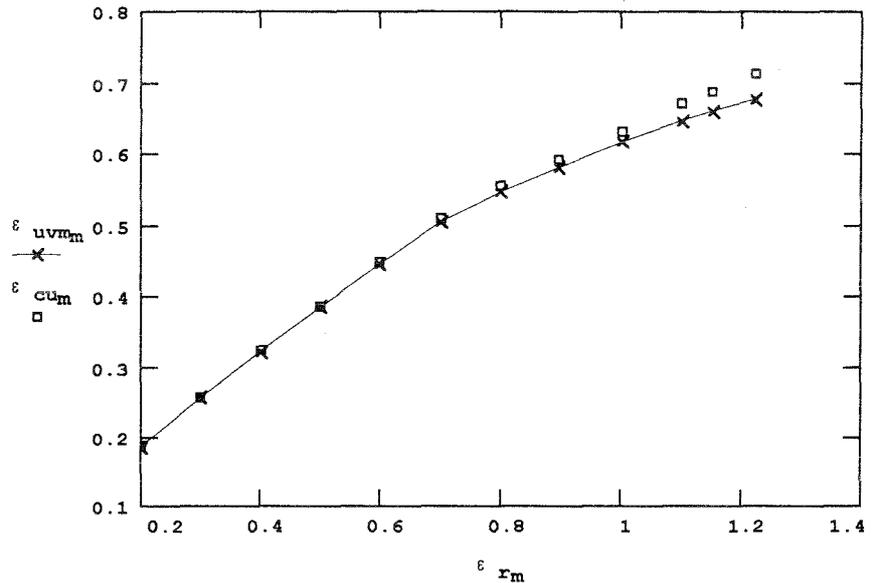
über Querschnitt
konstant

$$\epsilon_{uc}(\epsilon_{Bm}) = 0.71$$

Bruchdehnung : $\epsilon_{Bm} = 1.222$

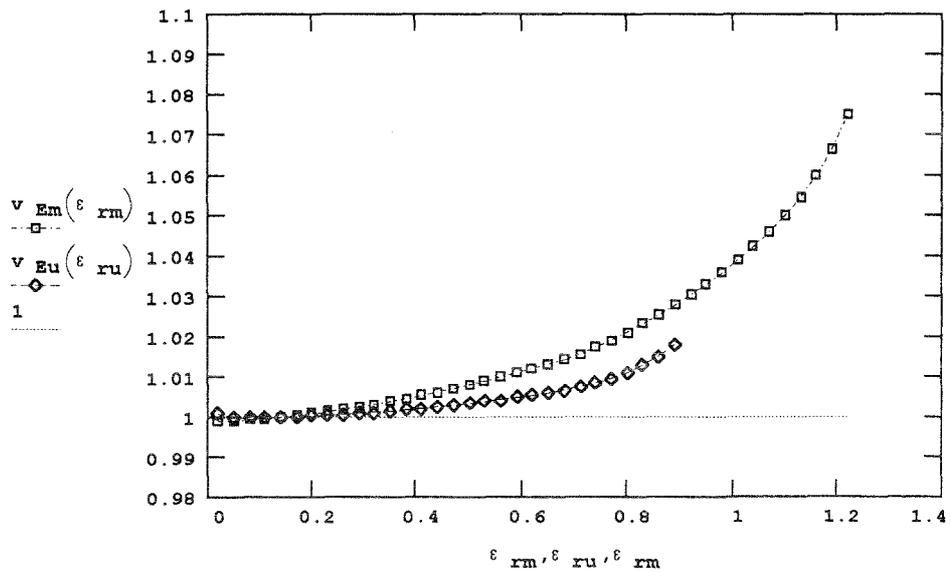
$$\epsilon_{Bu} = 0.895$$

Dehnung
Elementunterseite
(%)



Verformungsmodul-
verhältnis

v_E



m :
Mittelwert

u :
5%-Quantile

Positivlage

Dehnung ϵ_r (%)
Elementoberseite

Bild 62 : Vergleich zwischen unterschiedlich berechneten Dehnungen an der Unterseite
Verformungsmodul (Mittelwert) über Querschnitt dehnungsabhängig oder konstant
Verhältnis der Verformungsmoduln von Unter- zu Oberseite
Mittelwert und 5%-Quantile

2.4.3 Stufenförmige Laststeigerung bis Bruch

In den Bildern 63 bis 65 sind die Dehnungen in Feldmitte an Unter- und Oberseite sowie die Durchbiegungen an dieser Stelle abhängig von den Laststufen aufgetragen, dargestellt sind die jeweils größten Werte der DMS 1u und 2u bzw. 3o und 4o sowie die Mittelwerte der Verschiebungen an den Stellen 24 und 25 (Bilder 48 und 53).

2.4.3.1 Dehnung an der Unterseite

Bild 66 zeigt die einzelnen Meßwerte als Funktion des Biegemomentes M_F in Feldmitte, außerdem sind die aufnehmbaren Momente M_d , die Dehnungen bei Bruch sowie die Ergebnisse der statistischen Auswertung angegeben.

Den Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und rechnerischen Werten unter verschiedenen Annahmen für das Verformungsverhalten veranschaulichen die Bilder 67 bis 72.

Jeweils für Mittelwert und 5 % - Quantile der Werkstoffkennwerte wurden die Vergleichskurven berechnet.

Bei den Kurven, die mit dem Verformungsmodul (Bilder 69 bis 72) ermittelt wurden, ist näherungsweise die Lastdauer abhängig von der rechnerischen Dehnung am Druckrand berücksichtigt worden. Der entsprechende Kriechfaktor steigt von $C_t(\epsilon) = 1$ bei der Dehnung 0,01 % auf $C_t(\epsilon) = 1,12$ bei der 5 % - Quantile der Bruchdehnung ϵ_{BU} und auf $C_t(\epsilon) = 1,13$ beim Mittelwert an.

Auch wenn der Zeiteinfluß noch erfaßt würde, ist offensichtlich, daß die Berechnung mit dem Elastizitätsmodul E_0 im gesamten Verformungsbereich die Ergebnisse überschätzt.

Mit dem Sekantenmodul bei der Bruchdehnung werden die übertragbaren Momente M_d ebenso gut erfaßt wie mit dem Verformungsmodul nach $\{50.1\}$, wenn die Versuchsdauer berücksichtigt wird. Der Verlauf der Momente M_F wird jedoch zu gering ermittelt, da der Sekantenmodul nur im Bruchzustand mit dem Verformungsmodul übereinstimmt.

Die beste Annäherung an die Versuchswerte im gesamten Verlauf der Kurve gelingt mit dem Verformungsmodul, wenn er dehnungsabhängig über dem Querschnitt eingerechnet wird (Bilder 71 und 72).

Die Versuchswerte liegen insbesondere hinsichtlich der 5 % - Quantile über den rechnerischen Werten. Dafür ist neben dem zu hoch erfaßten Zeiteinfluß (siehe Abschnitt 2.3.2.3) in erster Linie maßgeblich, daß in den Prüfkörpern als Flächentragwerke die vergleichsweise große Streuung des Werkstoffs ausgeglichen wird.

Traglasten

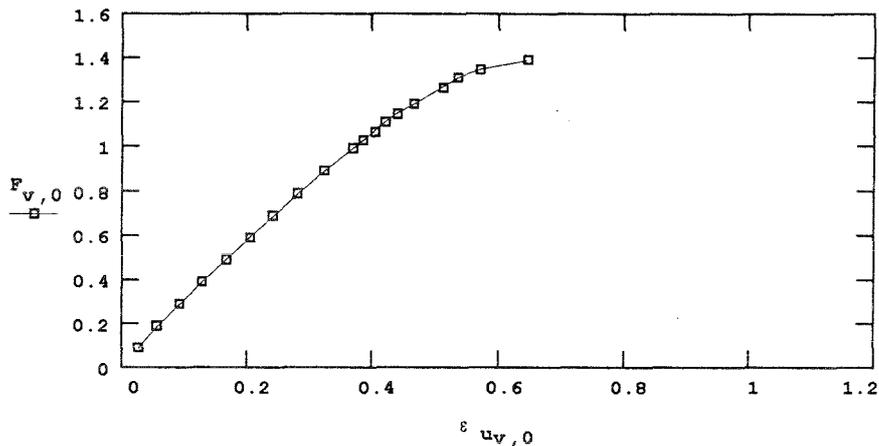
F_{B_j}
1.388
1.368
1.464

Dehnungen bei Bruch

ϵ_{uB_j}
0.645
0.675
0.655

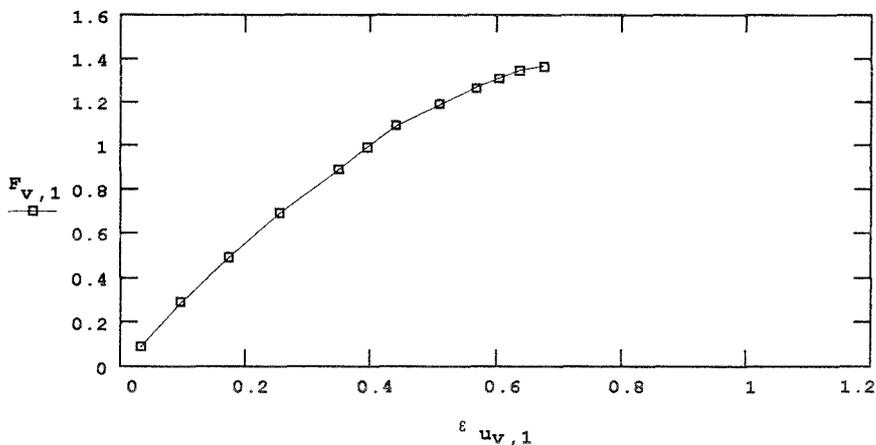
Versuch Nr.: KP0

Last
(kN)



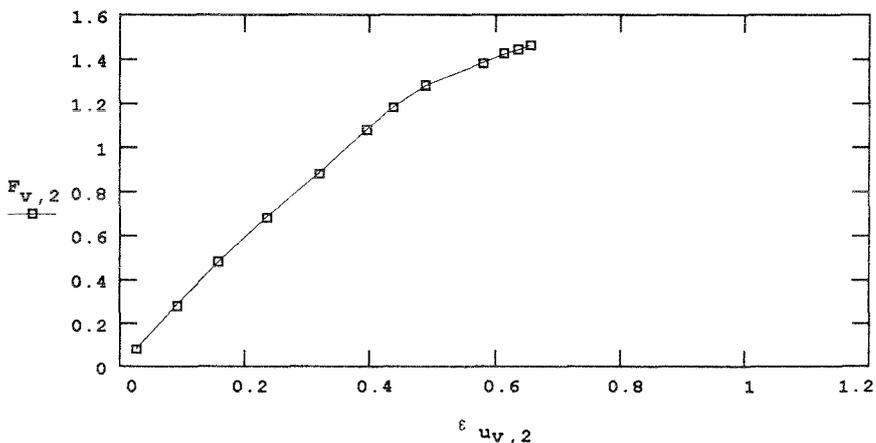
Versuch Nr.: KP1

Last
(kN)



Versuch Nr.: KP2

Last
(kN)



Positivlage

Dehnung ϵ_u (%)

Elementunterseite

Bild 63 : Last und Dehnung an der Unterseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

Traglasten

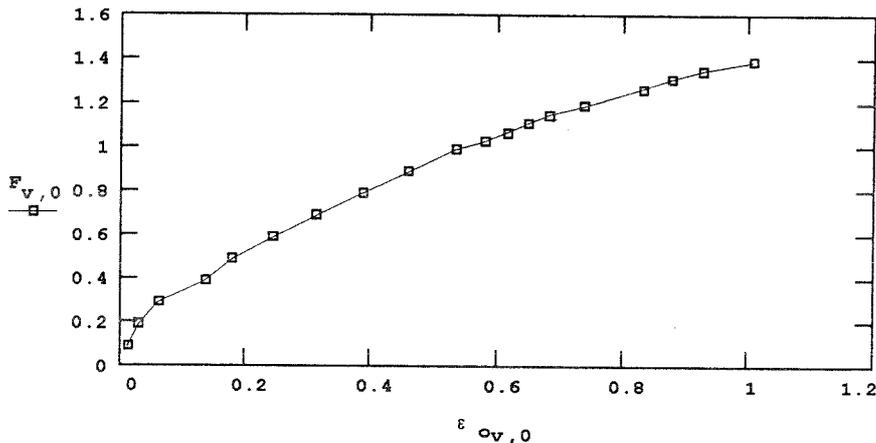
F_{B_j}
1.388
1.368
1.464

Dehnungen bei Bruch

$\epsilon_{\sigma B_j}$
1.007
0.973
0.932

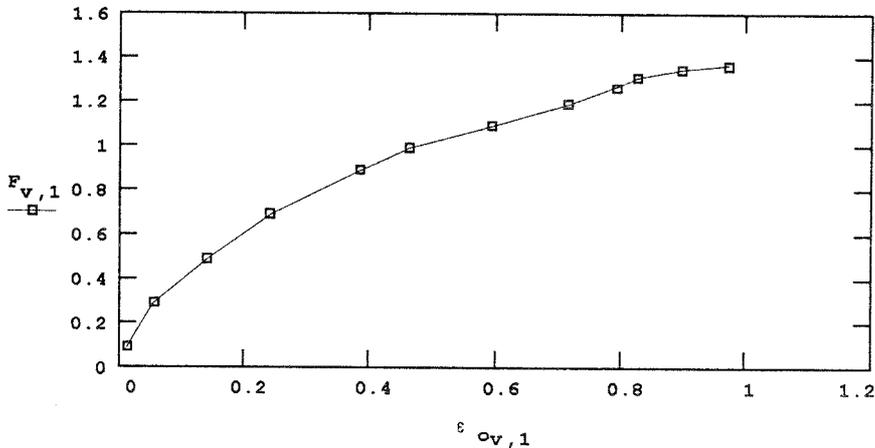
Versuch Nr.: KP0

Last
(kN)



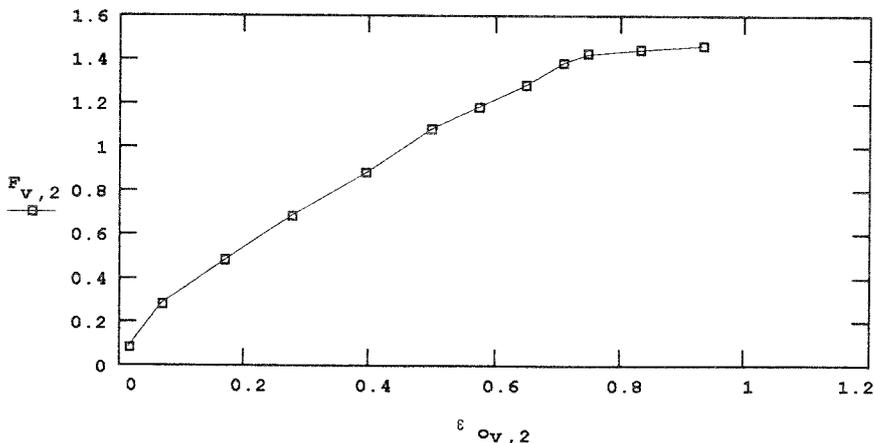
Versuch Nr.: KP1

Last
(kN)



Versuch Nr.: KP2

Last
(kN)



Positivlage

Dehnung ϵ_{σ} (%)

Elementoberseite

Bild 64 : Last und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

Traglasten

F_{B_j}
1.388
1.368
1.464

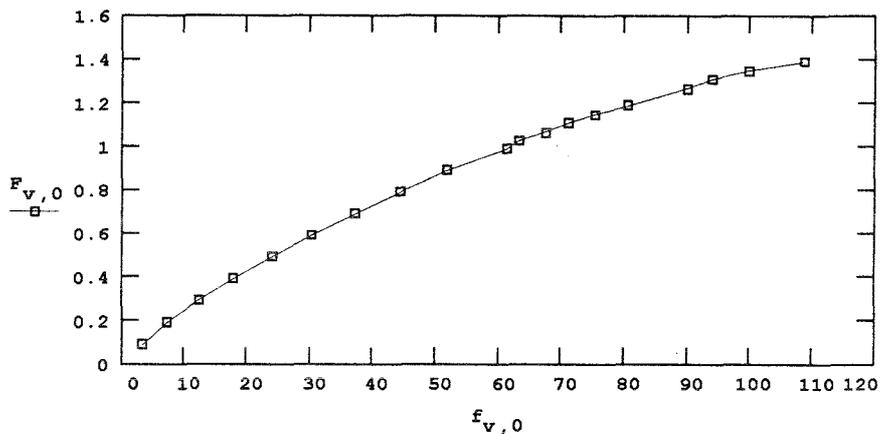
Durchbiegung bei Bruch

f_{B_j}
108.43
99.25
94.64

Versuch Nr.: KP0

Last
(kN)

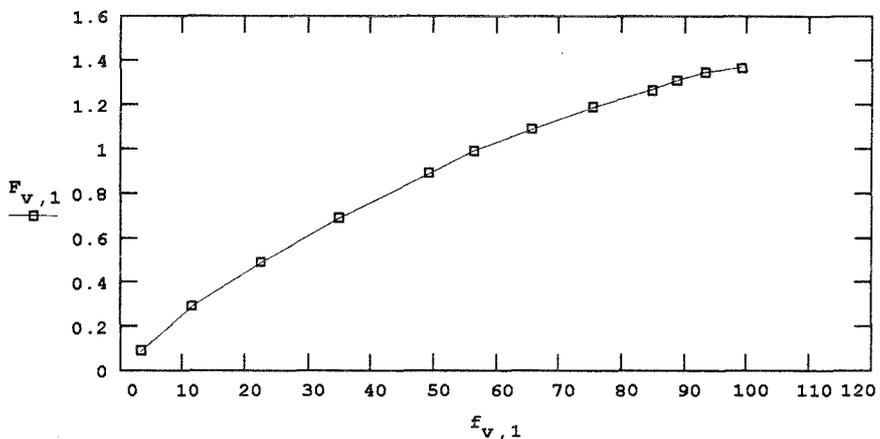
Dauer bis Bruch: 4.8 h



Versuch Nr.: KP1

Last
(kN)

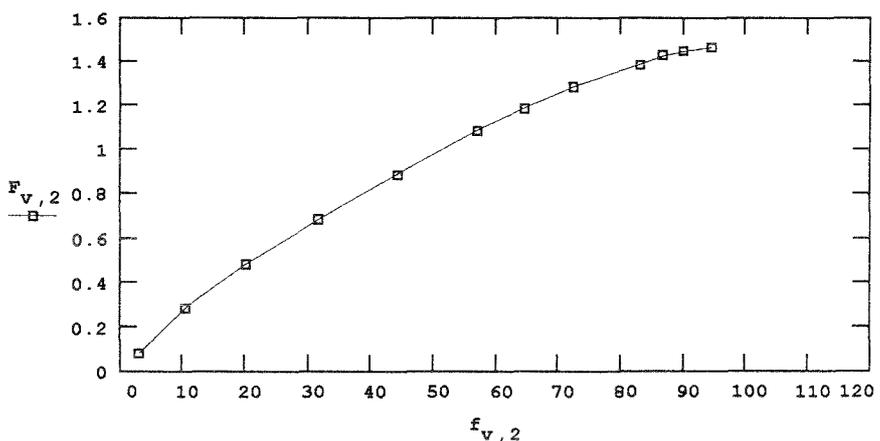
Dauer bis Bruch: 3.0 h



Versuch Nr.: KP2

Last
(kN)

Dauer bis Bruch: 0.6 h



Positivlage

Durchbiegung f (mm)

Bild 65 : Last und Durchbiegung in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

Einzelwerte

Dehnung
bei Bruch

Einzelwerte

$$M_{dm} = 281$$

$$M_{d_j}$$

$$\epsilon_{uBm} = 0.658$$

$$\epsilon_{uB_j}$$

$$M_{du} = 251$$

277.6

$$\epsilon_{uBu} = 0.612$$

0.645

$$M_{do} = 315$$

273.6

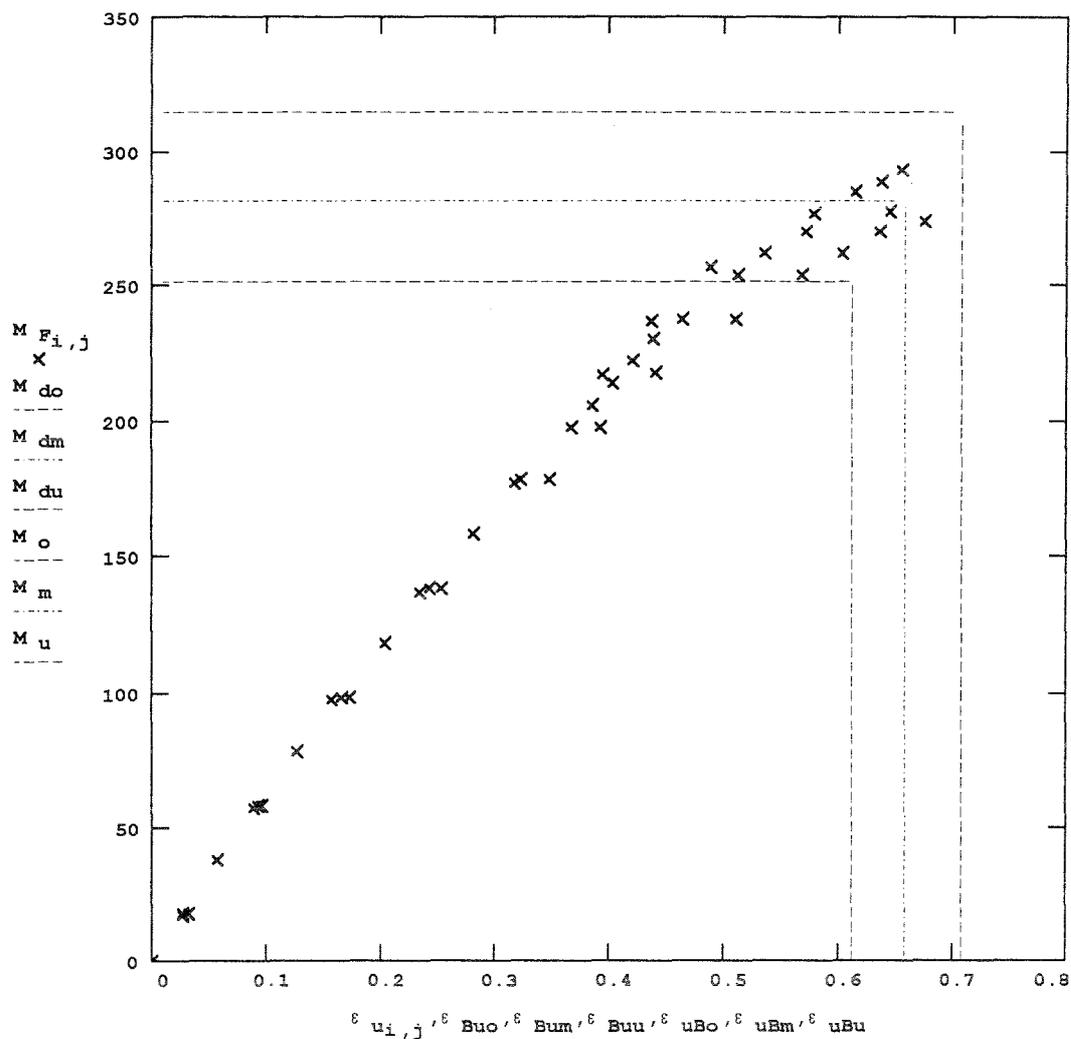
$$\epsilon_{uBo} = 0.708$$

0.675

0.655

Moment
(Nm)

Meßwerte



Versuche Nr.:

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Dehnung ϵ_u (%)

Elementunterseite

KP.0 - KP.2

Versuchsdauer bis Bruch: 0,6 h bis 4,8 h

Positivlage

Bild 66 : Biegemoment und Dehnung an der Unterseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft Einzelwerte

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

M_{d_j}
277.6
273.6
292.8

Dehnung
bei Bruch

$\epsilon_{uBm} = 0.658$
 $\epsilon_{uBu} = 0.612$
 $\epsilon_{uBo} = 0.708$

Einzelwerte

ϵ_{uB_j}
0.645
0.675
0.655

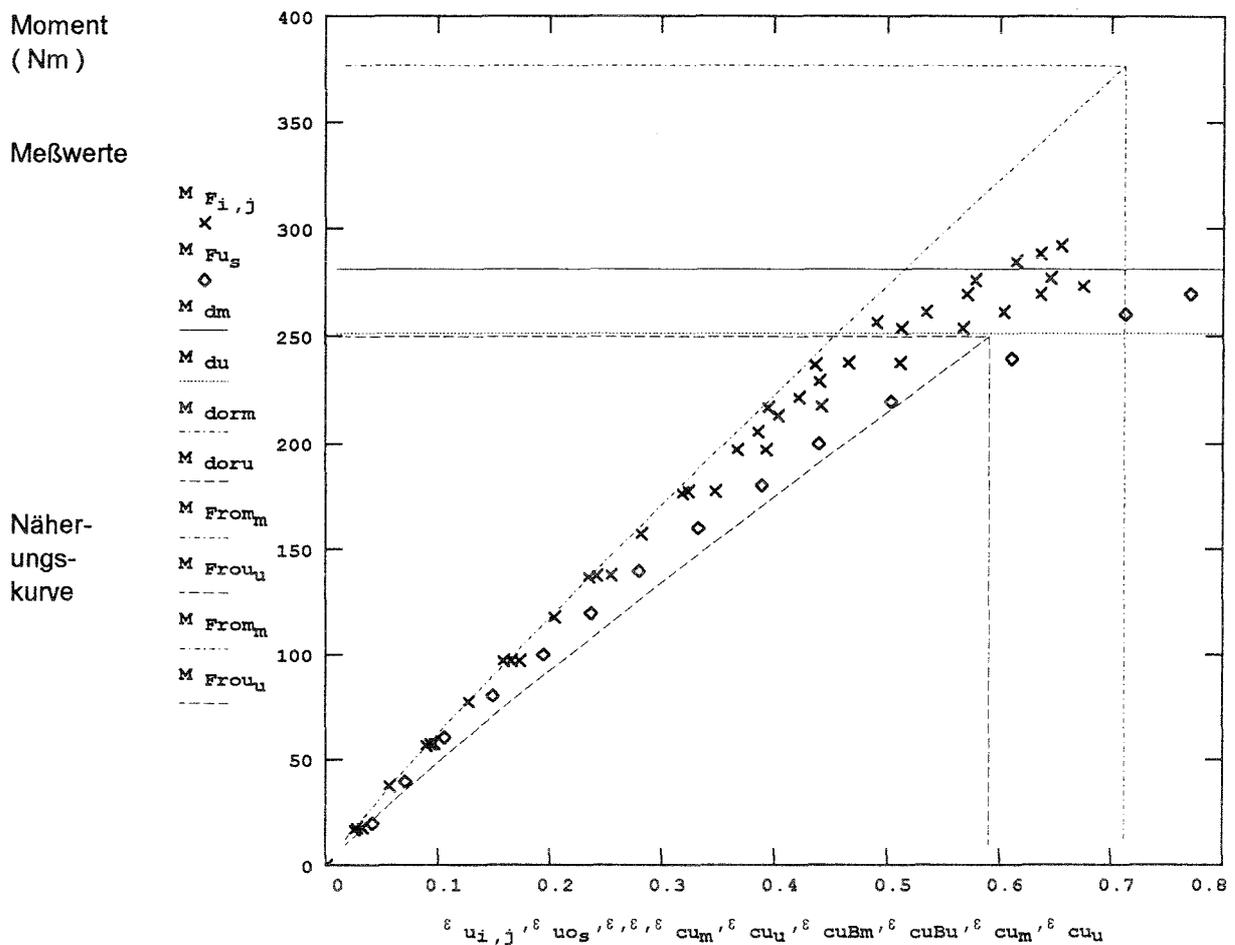
Berechnete Werte

$M_{dorm} = 377$
 $M_{doru} = 250$

$\epsilon_{cuBm} = 0.712$
 $\epsilon_{cuBu} = 0.591$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

$E_{om} = 8492$
 $E_{ou} = 6663$



Versuche Nr.:
KP.0 - KP.2

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Dehnung ϵ_u (%)
Elementunterseite

Bild 67 : Biegemoment und Dehnung an der Unterseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten
Elastizitätsmodul über Querschnitt konstant angenommen

Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft Einzelwerte

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

M_{d_j}
277.6
273.6
292.8

Dehnung bei Bruch

$\epsilon_{uBm} = 0.658$
 $\epsilon_{uBu} = 0.612$
 $\epsilon_{uBo} = 0.708$

Einzelwerte

ϵ_{uB_j}
0.645
0.675
0.655

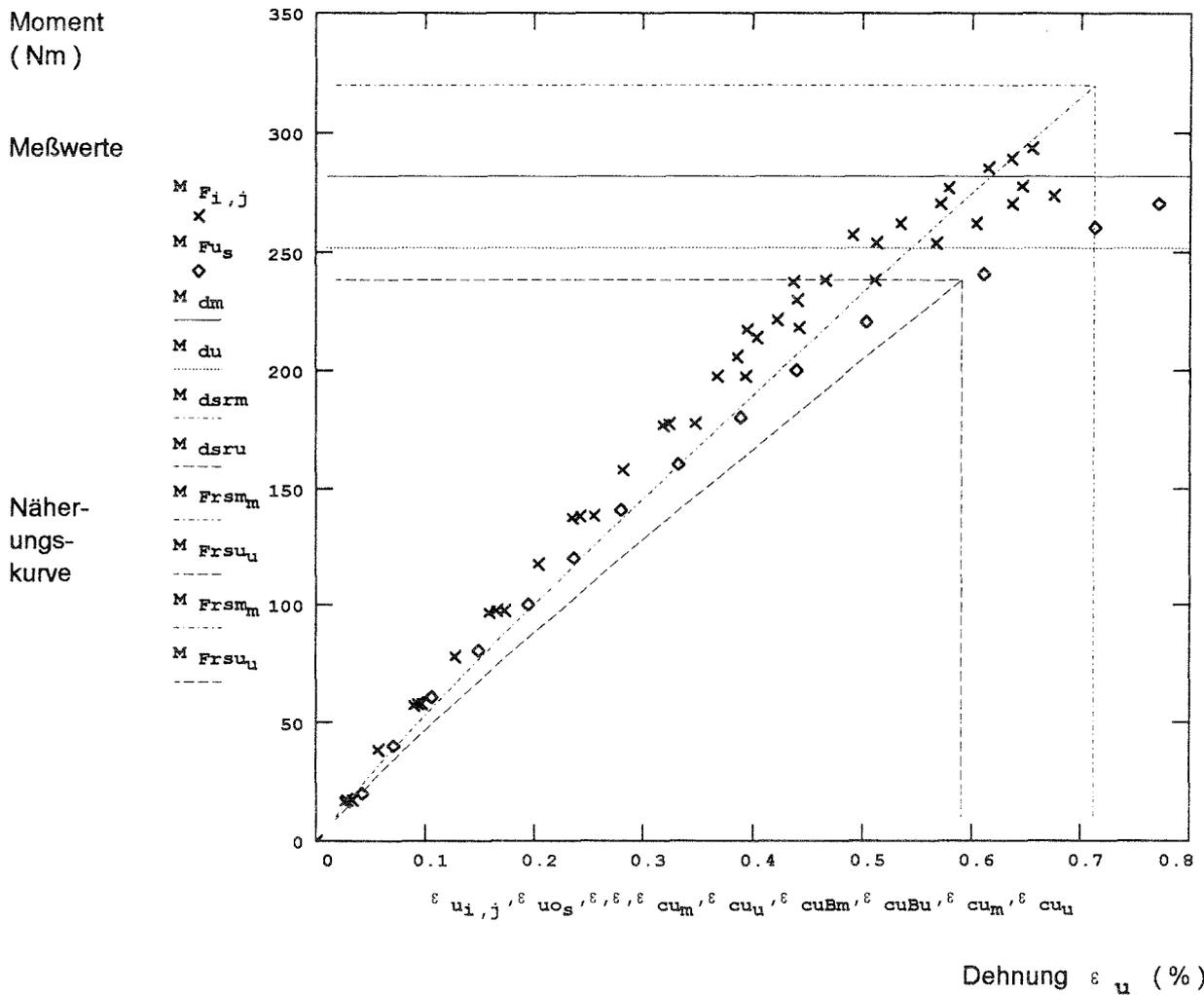
Berechnete Werte

$M_{dsrm} = 320$
 $M_{dsru} = 238$

$\epsilon_{cuBm} = 0.712$
 $\epsilon_{cuBu} = 0.591$

Sekantenmodul (N/mm²)

$E_{om} \cdot f_{Rm} = 7213$
 $E_{ou} \cdot f_{Ru} = 6345$



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Dehnung ϵ_u (%)

Elementunterseite

Bild 68 :

Biegemoment und Dehnung an der Unterseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten
 Sekantenmodul bei Bruch über Querschnitt konstant angenommen

Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft Einzelwerte

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

M_{d_j}

277.6
273.6
292.8

Dehnung bei Bruch

$\epsilon_{uBm} = 0.658$
 $\epsilon_{uBu} = 0.612$
 $\epsilon_{uBo} = 0.708$

Einzelwerte

ϵ_{uB_j}

0.645
0.675
0.655

Berechnete Werte

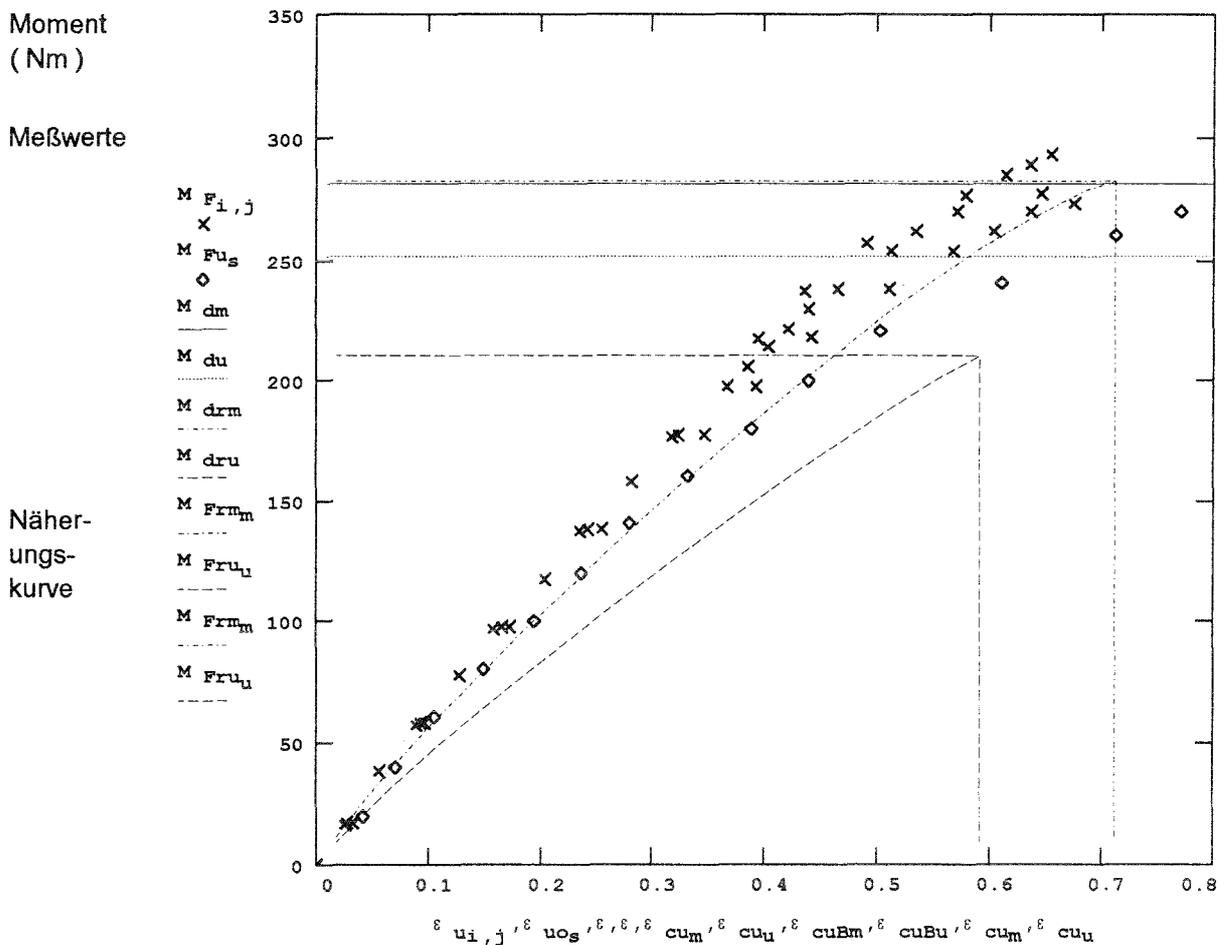
$M_{drm} = 282$
 $M_{dru} = 210$

$\epsilon_{cuBm} = 0.712$
 $\epsilon_{cuBu} = 0.591$

Verformungsmodul (N/mm²)

$$E_v(\epsilon) := \frac{E_v(\epsilon)}{C_t(\epsilon)}$$

$$C_t(\epsilon) := \left(\frac{\epsilon}{0.01} \right)^{k_t}$$



Versuche Nr.:
 KP.0 - KP.2

m : Mittelwert
 o,u : 95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Dehnung ϵ_u (%)
 Elementunterseite

Bild 69 : Biegemoment und Dehnung an der Unterseite in Feldmitte
 Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
 im Vergleich zu rechnerischen Werten
 Verformungsmodul über Querschnitt konstant angenommen
 Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

Dehnung
bei Bruch

$M_{dm} = 281$ $M_{du} = 251$

$\epsilon_{uBm} = 0.658$ $\epsilon_{uBu} = 0.612$

$M_{dvm} = 285$ $M_{dru} = 210$ Berechnete Werte

$\epsilon_{vuBm} = 0.677$ $\epsilon_{cuBu} = 0.591$

Verformungsmodul

Zeitfaktor

$$E_v(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot C_t(\epsilon)}$$

$$C_t(\epsilon) := \left(\frac{\epsilon_r}{0.01} \right)^{k_t}$$

Zeitexponent

$k_{tm} = 0.02598$

$k_{to} = 0.02741$

Rißfaktor

$$f_r(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot E_o}$$

Bruchdehnungsfaktor

$f_{Rm} = 0.84939$

$f_{Ru} = 0.9522$

Verformungsmodul-
verhältnis

$$v_E(\epsilon) := \frac{f_r(\epsilon_r)}{f_r(\epsilon_{ru})}$$

Grenzdehnung

$\epsilon_G = 0.4$

Beiwerte

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Elastizitätsmodul

$E_{om} = 8492$ $E_{ou} = 6663$

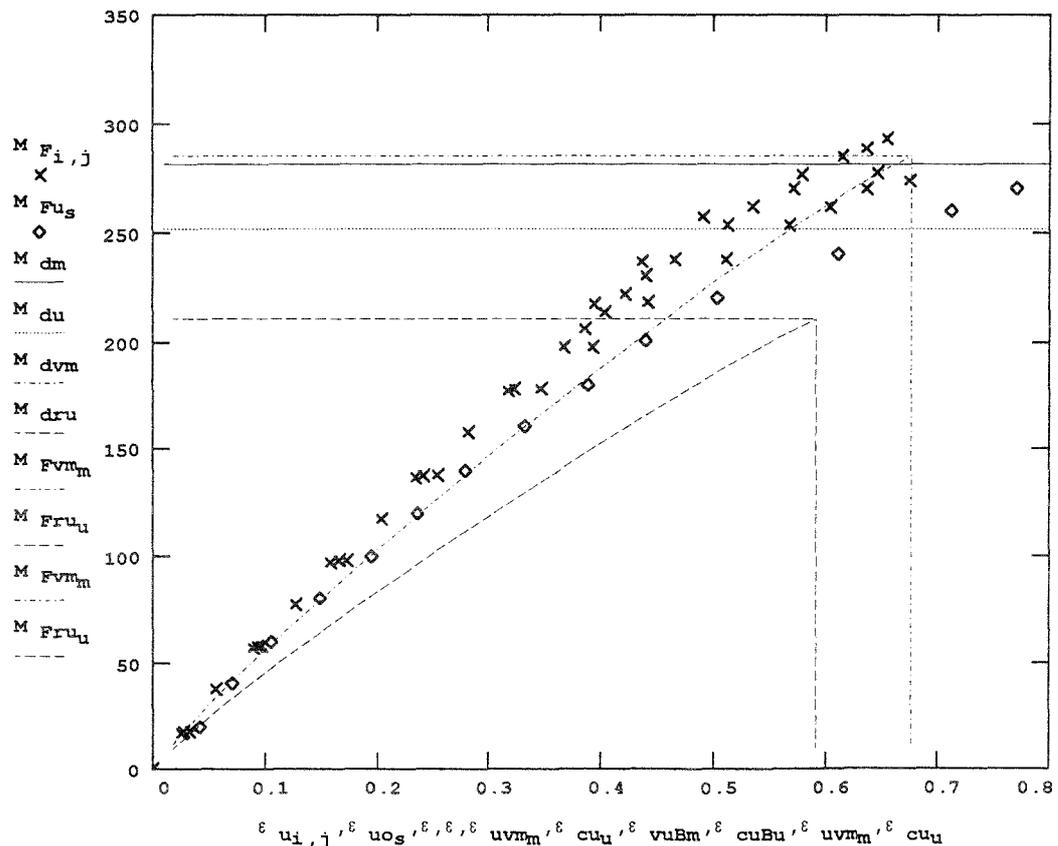
Bruchdehnung $\epsilon_{Bm} = 1.222$ $\epsilon_{Bu} = 0.895$

Moment
(Nm)

Meßwerte

Näherungs-
kurve

Positivlage



Versuche Nr.:

m :

u :

Dehnung ϵ_u (%)

KP.0 - KP.2

Mittelwert

5%-Quantile

Elementunterseite

Bild 71 :

Biegemoment und Dehnung an der Unterseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten

Verformungsmodul, Mittelwert über Querschnitt dehnungsabhängig, 5%-Quantile
konstant angenommen. Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

Dehnung
bei Bruch

$M_{dm} = 281$ $M_{du} = 251$
 $M_{dvm} = 285$ $M_{dru} = 210$

$\epsilon_{uBm} = 0.658$ $\epsilon_{uBu} = 0.612$
 $\epsilon_{vuBm} = 0.677$ $\epsilon_{cuBu} = 0.591$

Berechnete Werte

Verformungsmodul

Zeitfaktor

$$E_v(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot C_t(\epsilon)}$$

$$C_t(\epsilon) := \left(\frac{\epsilon_r}{0.01} \right)^{k_t}$$

Zeitexponent

Rißfaktor

$k_{tm} = 0.02598$

$$f_r(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot E_o}$$

$k_{to} = 0.02741$

Verformungsmodul-
verhältnis

$$v_E(\epsilon) := \frac{f_r(\epsilon_r)}{f_r(\epsilon_{ru})}$$

Grenzdehnung
 $\epsilon_G = 0.4$

Bruchdehnungsfaktor

$f_{Rm} = 0.84939$

$f_{Ru} = 0.9522$

Beiwerte

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Elastizitätsmodul

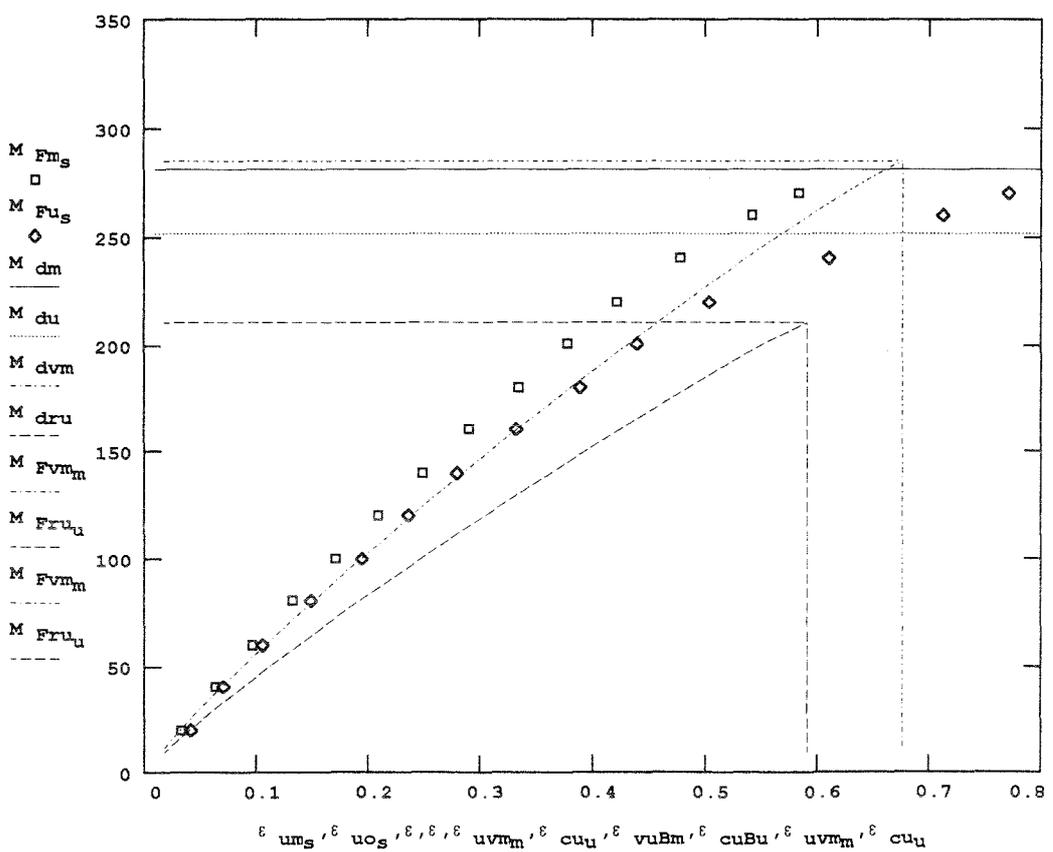
$E_{om} = 8492$ $E_{ou} = 6663$

Bruchdehnung $\epsilon_{Bm} = 1.222$ $\epsilon_{Bu} = 0.895$

Moment
(Nm)

Meßwerte

Näher-
ungs-
kurve



Positivlage

Versuche Nr.:
KP.0 - KP.2

m : Mittelwert
u : 5%-Quantile

Dehnung ϵ_u (%)
Elementunterseite

Bild 72 : Biegemoment und Dehnung an der Unterseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten

Verformungsmodul, Mittelwert über Querschnitt dehnungsabhängig, 5%-Quantile
konstant angenommen. Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

2.4.3.2 Dehnung an der Oberseite

Die einzelnen Meßwerte der Dehnung und der zugehörigen Biegemomente M_F in Feldmitte sind mit den aufnehmbaren Momenten M_d und Dehnungen beim Versagen in Bild 73 dargestellt.

Wie im vorhergehenden Abschnitt zeigen die Bilder 74 bis 79 den Vergleich zwischen Versuch und Berechnung, dabei sind die gleichen Verhältnisse festzustellen.

Bezüglich der Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Werten ist zusätzlich zu den vorher genannten Gründen zu berücksichtigen, daß natürlich der reale Bruch im Querschnitt praktisch nie an genau der Stelle eintrat, an der ein DMS angebracht war. Außerdem ist zu erwähnen, daß die rechnerischen Gurtbreiten und Steghöhen (Bild 9) mit den aussteifend wirkenden Eckradien angesetzt wurden. Die Wellenlänge des Beulmusters, Abschnitt 2.1.1, verdeutlicht diesen Effekt.

2.4.3.3 Durchbiegung in Feldmitte

Das Bild 80 gibt die Einzelwerte der Durchbiegung in Feldmitte für die jeweiligen Biegemomente M_F an, ebenso die aufnehmbaren Biegemomente und Durchbiegungen bei Bruch.

Die Ergebnisse der Vergleichsberechnung sind in den Bildern 81 bis 86 zusammengestellt. Wegen des geringen Einflusses wurde darauf verzichtet, die Dehnungsabhängigkeit des Verformungsmoduls über dem Profilquerschnitt zu berücksichtigen.

Die rechnerisch ermittelten Traggmomente unterscheiden sich nicht von den vorher ermittelten, da die Querschnittswerte in Feldmitte maßgeblich sind (Bilder 81 bis 83).

Beim Last - Durchbiegungs - Verhalten ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Beanspruchung im Profilquerschnitt von der Feldmitte bis zu den Auflagern abnimmt. Dadurch werden die Dehnungen kleiner und als Folge sowohl die wirksamen Trägheitsmomente als auch die Verformungsmoduln größer.

Im Versuch waren die vier Linienlasten so angeordnet, daß ihre Momentenlinie aus Tangenten an der Momentenlinie einer Gleichstreckenlast mit gleichem Maximalmoment besteht. Daher kann davon ausgegangen werden, daß der Momentverlauf über die Stützweite z parabelförmig ist.

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

Einzelwerte

Dehnung
bei Bruch

Einzelwerte

$$M_{dm} = 281$$

$$M_{d_j}$$

$$\epsilon_{oBm} = 0.971$$

$$\epsilon_{oB_j}$$

$$M_{du} = 251$$

277.6

$$\epsilon_{oBu} = 0.859$$

1.007

$$M_{do} = 315$$

273.6

$$\epsilon_{oBo} = 1.096$$

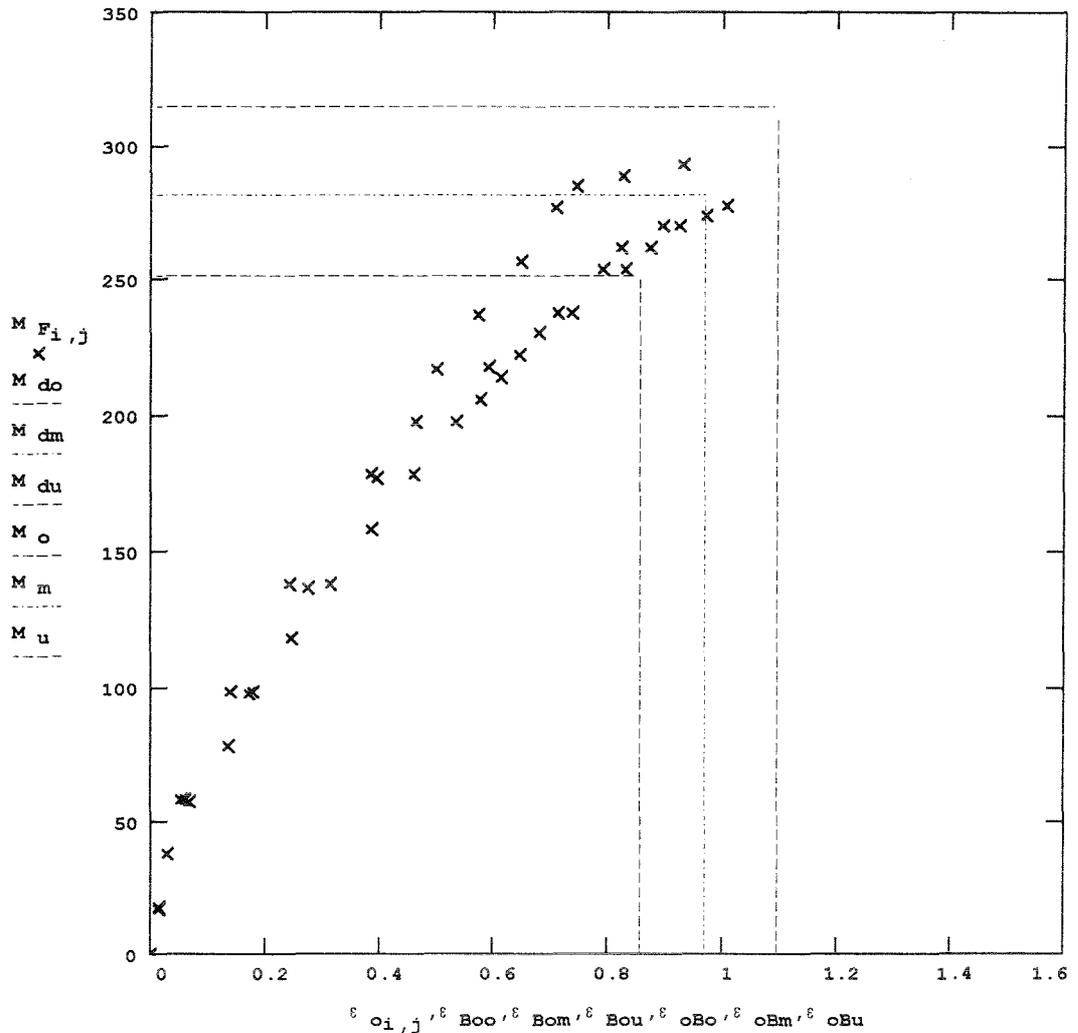
0.973

292.8

0.932

Moment
(Nm)

Meßwerte



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Dehnung ϵ_o (%)

Elementoberseite

Versuchsdauer bis Bruch: 0,6 h bis 4,8 h

Positivlage

Bild 73 :

Biegemoment und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft Einzelwerte

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

M_{d_j}
277.6
273.6
292.8

Dehnung
bei Bruch

$\epsilon_{oBm} = 0.971$
 $\epsilon_{oBu} = 0.859$
 $\epsilon_{oBo} = 1.096$

Einzelwerte

ϵ_{oB_j}
1.007
0.973
0.932

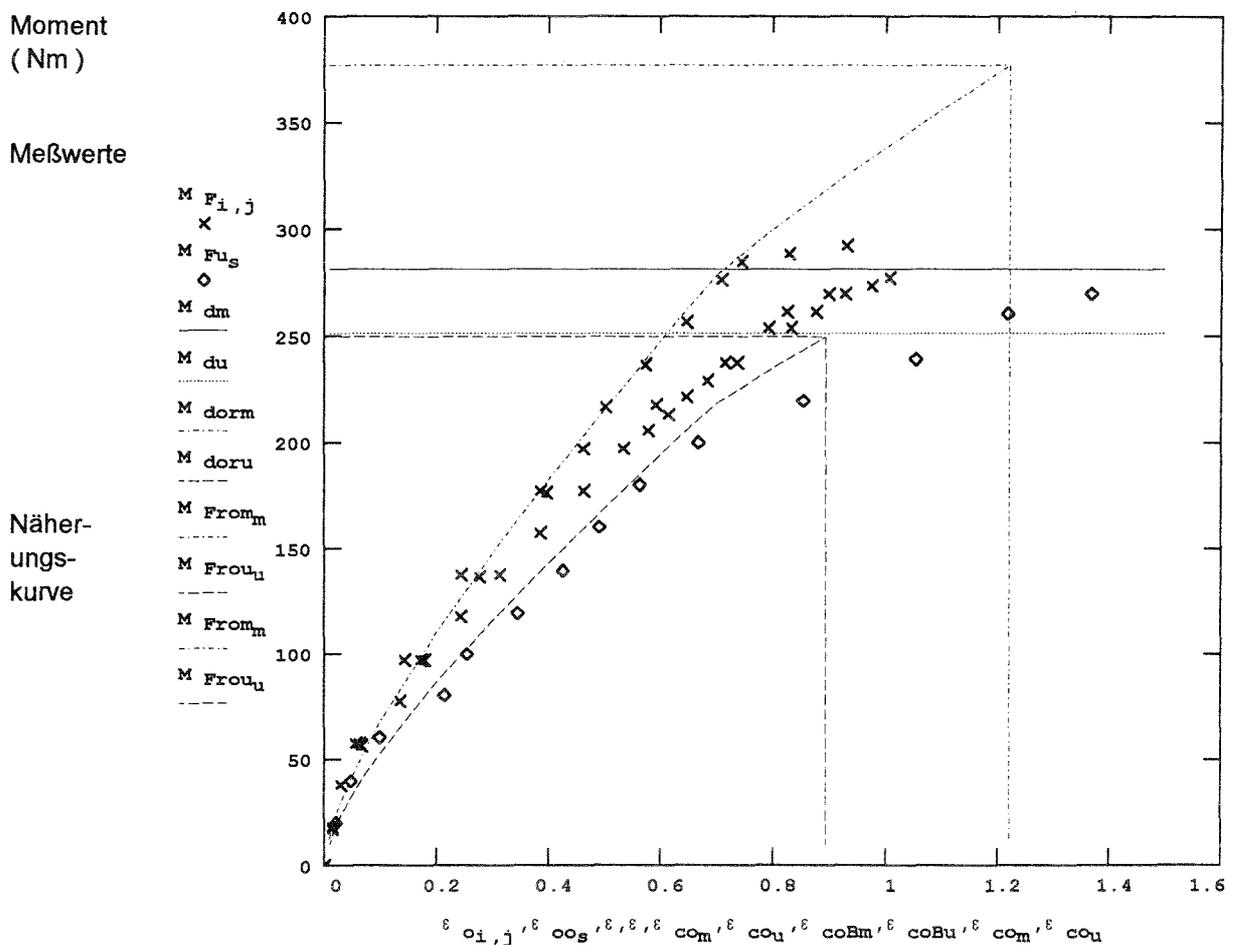
Berechnete Werte

$M_{dorm} = 377$
 $M_{doru} = 250$

$\epsilon_{coBm} = 1.222$
 $\epsilon_{coBu} = 0.895$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

$E_{om} = 8492$
 $E_{ou} = 6663$



Versuche Nr.:
KP.0 - KP.2

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Dehnung ϵ_o (%)
Elementoberseite
Positivlage

Bild 74 : Biegemoment und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten
Elastizitätsmodul über Querschnitt konstant angenommen

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft Einzelwerte

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

M_{d_j}
277.6
273.6
292.8

Dehnung
bei Bruch

$\epsilon_{oBm} = 0.971$
 $\epsilon_{oBu} = 0.859$
 $\epsilon_{oBo} = 1.096$

Einzelwerte

ϵ_{oB_j}
1.007
0.973
0.932

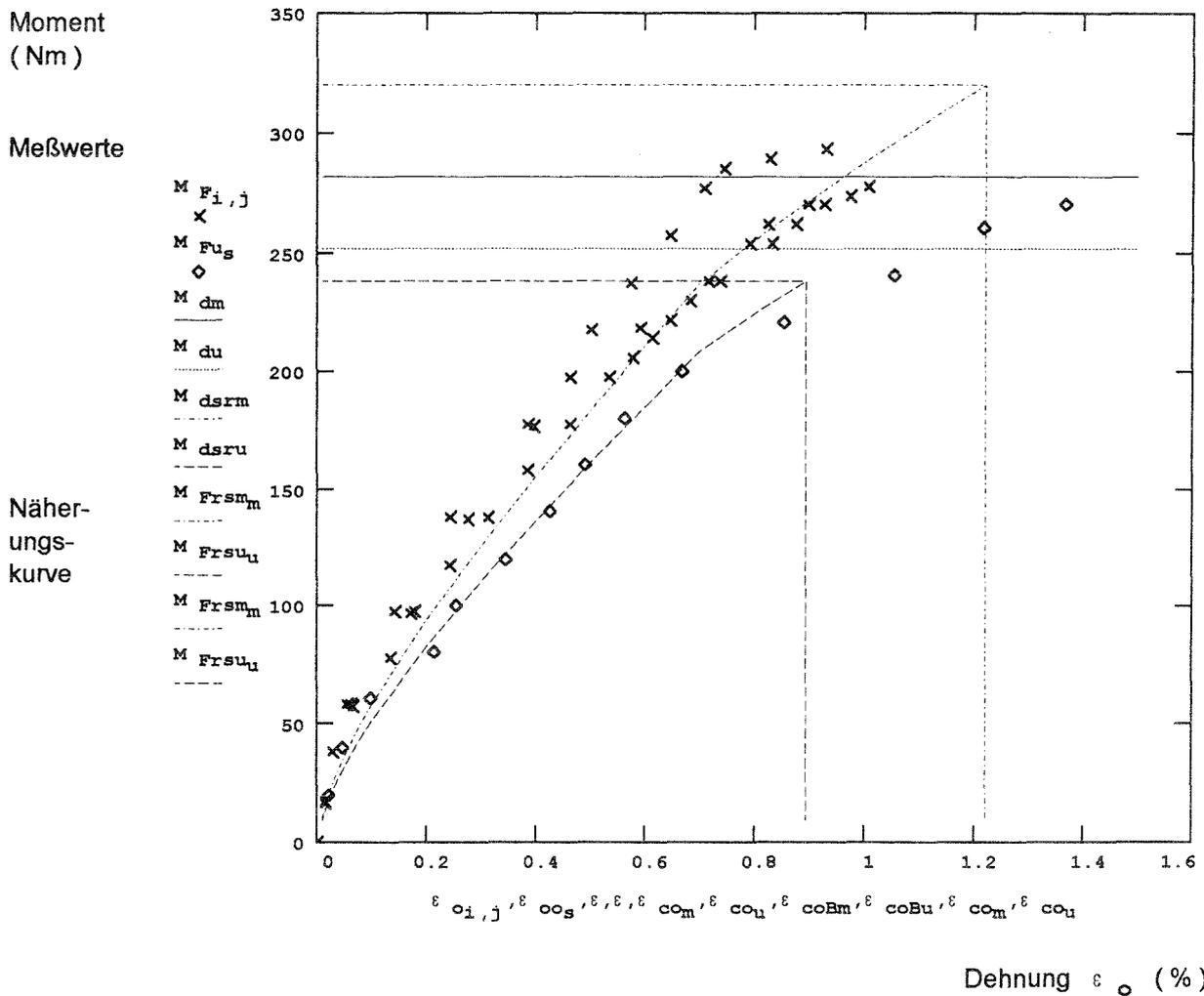
Berechnete Werte

$M_{dsrm} = 320$
 $M_{dsru} = 238$

$\epsilon_{coBm} = 1.222$
 $\epsilon_{coBu} = 0.895$

Sekantenmodul (N/mm²)

$E_{om} \cdot f_{Rm} = 7213$
 $E_{ou} \cdot f_{Ru} = 6345$



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Dehnung ϵ_o (%)

Elementoberseite

Bild 75 :

Biegemoment und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten
Sekantenmodul bei Bruch über Querschnitt konstant angenommen

Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft Einzelwerte

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

M_{d_j}
277.6
273.6
292.8

Dehnung bei Bruch

$\epsilon_{oBm} = 0.971$
 $\epsilon_{oBu} = 0.859$
 $\epsilon_{oBo} = 1.096$

Einzelwerte

ϵ_{oB_j}
1.007
0.973
0.932

Berechnete Werte

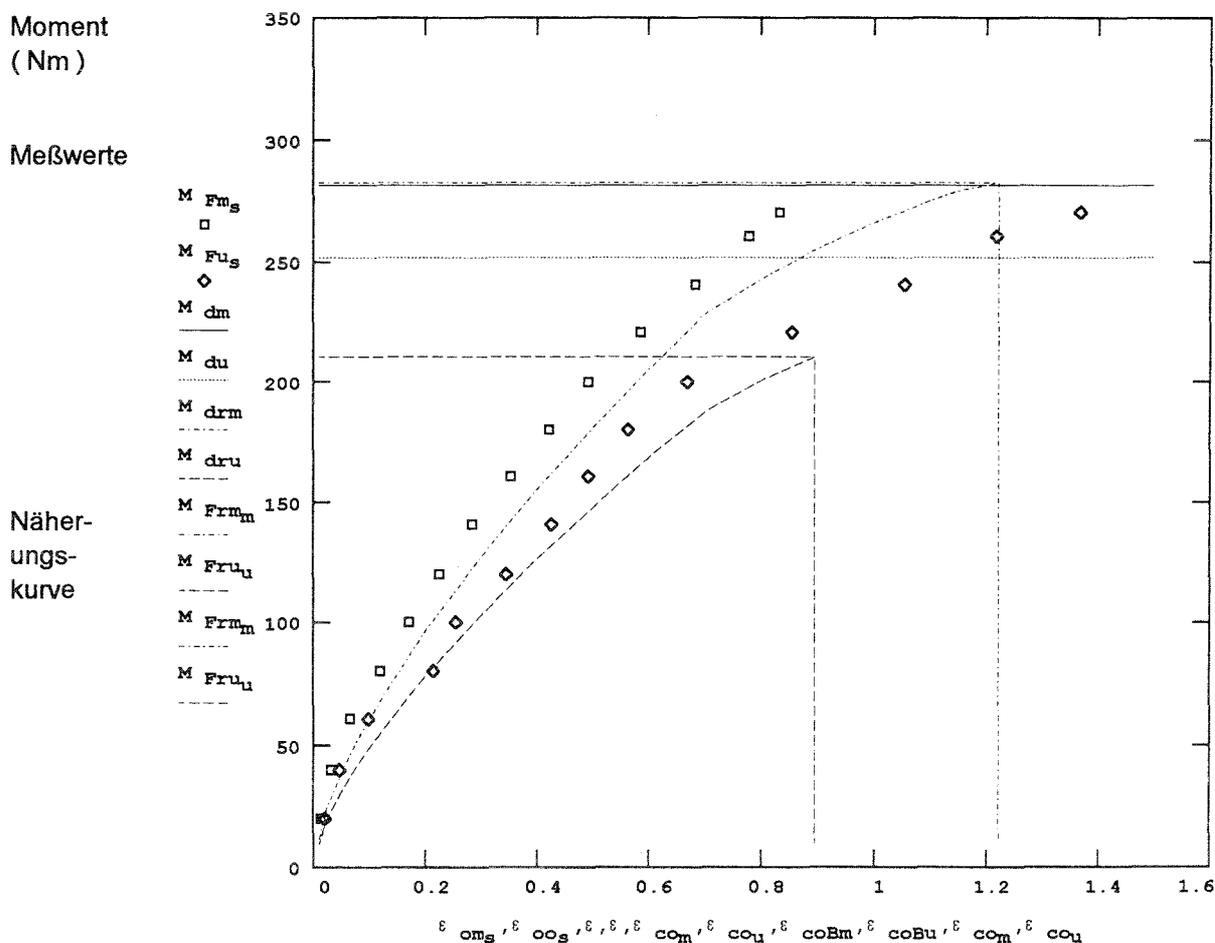
$M_{drm} = 282$
 $M_{dru} = 210$

$\epsilon_{coBm} = 1.222$
 $\epsilon_{coBu} = 0.895$

Verformungsmodul (N/mm²)

$$E_v(\epsilon) := \frac{E_v(\epsilon)}{C_t(\epsilon)}$$

$$C_t(\epsilon) := \left(\frac{\epsilon}{0.01} \right)^{k_t}$$



Versuche Nr.:
 KP.0 - KP.2

m :
 Mittelwert

o,u :
 95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Dehnung ϵ_o (%)
 Elementoberseite

Bild 76 : Biegemoment und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
 Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
 im Vergleich zu rechnerischen Werten
 Verformungsmodul über Querschnitt konstant angenommen
 Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft Einzelwerte

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

M_{d_j}
277.6
273.6
292.8

Dehnung
bei Bruch

$\epsilon_{oBm} = 0.971$
 $\epsilon_{oBu} = 0.859$
 $\epsilon_{oBo} = 1.096$

Einzelwerte

ϵ_{oB_j}
1.007
0.973
0.932

Berechnete Werte

$M_{drm} = 282$
 $M_{dru} = 210$

$\epsilon_{coBm} = 1.222$
 $\epsilon_{coBu} = 0.895$

Verformungsmodul (N/mm²)

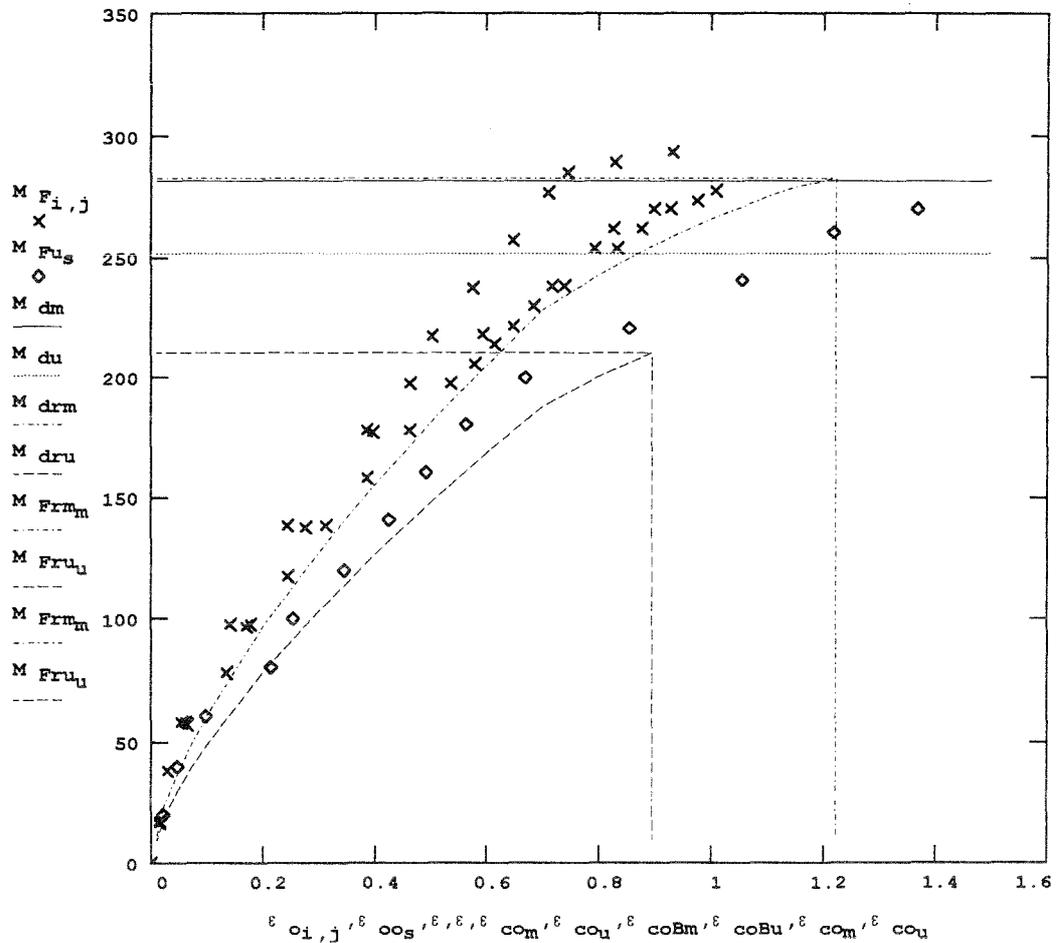
$$E_v(\epsilon) = \frac{E_v(\epsilon)}{C_t(\epsilon)}$$

$$C_t(\epsilon) = \left(\frac{\epsilon}{0.01} \right)^{k_t}$$

Moment
(Nm)

Meßwerte

Näherungs-
kurve



Dehnung ϵ_o (%)

Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Elementoberseite

Bild 77 :

Biegemoment und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten
Verformungsmodul über Querschnitt konstant angenommen
Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

Dehnung
bei Bruch

$M_{dm} = 281$ $M_{du} = 251$

$\epsilon_{oBm} = 0.971$ $\epsilon_{oBu} = 0.859$

$M_{dvm} = 285$ $M_{dru} = 210$ Berechnete Werte

$\epsilon_{voBm} = 1.222$ $\epsilon_{coBu} = 0.895$

Verformungsmodul

Zeitfaktor

$$E_v(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot C_t(\epsilon)}$$

$$C_t(\epsilon) := \left(\frac{\epsilon_r}{0.01}\right)^{k_t}$$

Zeitexponent

$k_{tm} = 0.026$

$k_{to} = 0.027$

Rißfaktor

$$f_r(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot E_o}$$

Bruchdehnungsfaktor

$f_{Rm} = 0.84939$

$f_{Ru} = 0.9522$

Verformungsmodul-
verhältnis

$$v_E(\epsilon) := \frac{f_r(\epsilon_r)}{f_r(\epsilon_{ru})}$$

Grenzdehnung

$\epsilon_G = 0.4$

Beiwerte

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Elastizitätsmodul

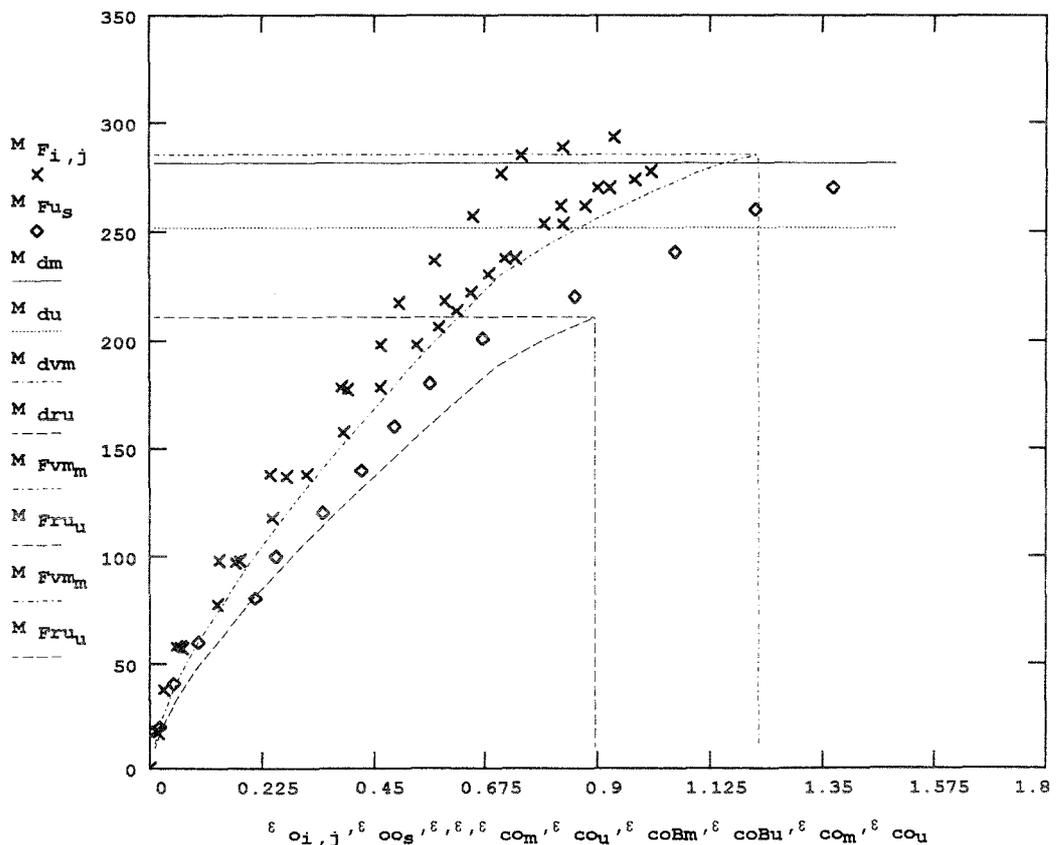
$E_{om} = 8492$ $E_{ou} = 6663$

Bruchdehnung $\epsilon_{Bm} = 1.222$ $\epsilon_{Bu} = 0.895$

Moment
(Nm)

Meßwerte

Näher-
ungs-
kurve



Positivlage

Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

u :

5%-Quantile

Dehnung ϵ_o (%)

Elementoberseite

Bild 78 :

Biegemoment und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten

Verformungsmodul, Mittelwert über Querschnitt dehnungsabhängig, 5%-Quantile
konstant angenommen. Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

Dehnung
bei Bruch

$M_{dm} = 281$ $M_{du} = 251$

$\epsilon_{oBm} = 0.971$ $\epsilon_{oBu} = 0.859$

$M_{dvm} = 285$ $M_{dru} = 210$ Berechnete Werte

$\epsilon_{voBm} = 1.222$ $\epsilon_{coBu} = 0.895$

Verformungsmodul

Zeitfaktor

$$E_v(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot C_t(\epsilon)}$$

$$C_t(\epsilon) := \left(\frac{\epsilon_r}{0.01} \right)^{k_t}$$

Zeitexponent

Rißfaktor

$k_{tm} = 0.026$

$$f_r(\epsilon) := \frac{\epsilon_B \cdot 10^{-2} \cdot E_o \cdot f_R - a \cdot [(\epsilon_B - \epsilon_r) \cdot 10^{-2}]^n}{\epsilon_r \cdot 10^{-2} \cdot E_o}$$

$k_{to} = 0.027$

Bruchdehnungsfaktor

Verformungsmodul-
verhältnis

$$v_E(\epsilon) := \frac{f_r(\epsilon_r)}{f_r(\epsilon_{ru})}$$

Grenzdehnung

$f_{Rm} = 0.84939$

$\epsilon_G = 0.4$

$f_{Ru} = 0.9522$

Beiwerte

$$n := \frac{\epsilon_B + \epsilon_G}{f_R \cdot \epsilon_B + \epsilon_G} \quad a := E_o \cdot f_R \cdot (\epsilon_B \cdot 10^{-2})^{1-n}$$

Elastizitätsmodul

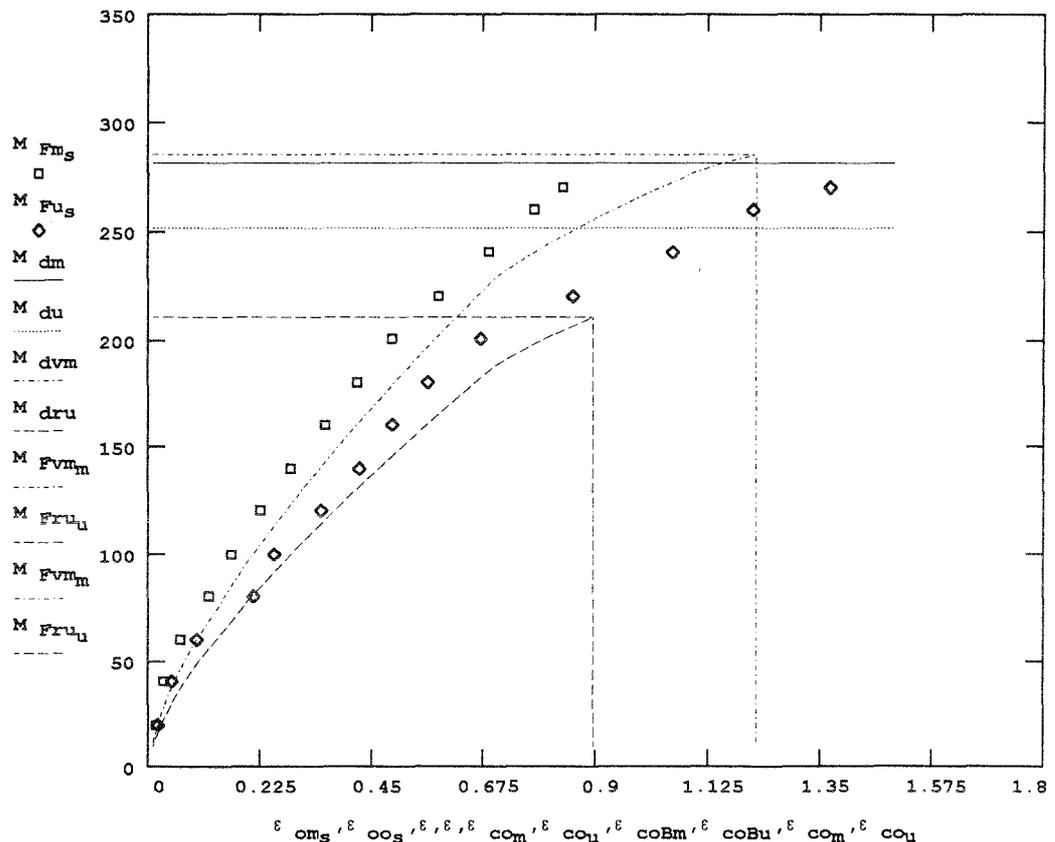
$E_{om} = 8492$ $E_{ou} = 6663$

Bruchdehnung $\epsilon_{Bm} = 1.222$ $\epsilon_{Bu} = 0.895$

Moment
(Nm)

Meßwerte

Näherungs-
kurve



Positivlage

Versuche Nr.:

m : Mittelwert u : 5%-Quantile

Dehnung ϵ_o (%)

KP.0 - KP.2

Elementoberseite

Bild 79 :

Biegemoment und Dehnung an der Oberseite in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu rechnerischen Werten

Verformungsmodul, Mittelwert über Querschnitt dehnungsabhängig, 5%-Quantile
konstant angenommen. Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Das maximale Moment (M_F) in Feldmitte ist

$$M_{\max}(\varepsilon) = \frac{I_{w \min}}{e_0} \cdot \varepsilon \cdot E_v(\varepsilon) \quad \{64\}$$

Das Trägheitsmoment in Feldmitte und der Schwerpunktabstand e_0 sind wie beschrieben mit der Bemessungsdehnung am Druckgurtrand zu ermitteln, der zugehörige Verformungsmodul mit {52}.

Das Biegemoment, abhängig von der Stützlänge z und der Stützweite l_F , ist

$$M(z) = M_{\max}(\varepsilon) \cdot \eta(z) \quad \{65\}$$

mit

$$\eta(z) = \frac{4}{l_F} \cdot z(l_F - z) \quad \{65.1\}$$

Da am Auflager die Beanspruchung des Druckgurtes mit dem Biegemoment verschwindet, die Dehnungen am Druckrand also $\varepsilon = 0$ gesetzt werden können, ist am Auflager das wirksame Trägheitsmoment I_A bekannt und der Verformungsmodul entspricht dem Elastizitätsmodul E_0 . Die Stauchung am Druckrand und das Biegemoment hängen direkt voneinander ab, es liegt also nahe, Trägheitsmoment und Verformungsmodul in gleicher Weise zu beschreiben wie das Biegemoment:

$$I_w(z) = I_A - (I_A - I_{w \min}) \cdot \eta(z) \quad \{66\}$$

und

$$E_v(z) = E_0 - [E_0 - E_v(\varepsilon)] \cdot \eta(z) \quad \{67\}$$

In Bild 84 sind die Zusammenhänge von Biegemoment, wirksames Trägheitsmoment und Verformungsmodul für mittlere Werkstoffkennwerte dargestellt. Es werden zwei Grenzzustände für die Bemessung betrachtet, das Erreichen der Bruchdehnung oder der Grenzdehnung in Feldmitte.

Die rechnerische Durchbiegung in Feldmitte ergibt sich aus nachstehendem Integral

$$f = 2 \cdot \int_0^{\frac{l_F}{2}} \frac{M(z) \cdot \frac{z}{2}}{I_w(z) \cdot E_v(z)} \cdot dz \quad \{68\}$$

Die mit vorstehenden Beziehungen ermittelten Moment - Durchbiegungs - Linien sind im Vergleich zu den Meßwerten in den Bildern 85 und 86 aufgetragen, zusätzlich ist der Zeiteinfluß näherungsweise erfaßt. Wie zu sehen ist, kann auf dem vorgeschlagenen Wege das Last - Durchbiegungs - Verhalten sehr gut beschrieben werden. Hinsichtlich der Abweichungen zwischen Versuch und Rechnung gelten die gleichen Gründe wie schon ausgeführt.

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

$$M_{dm} = 281$$

$$M_{du} = 251$$

$$M_{do} = 315$$

Einzelwerte

$$M_{d_j}$$

277.6
273.6
292.8

Durchbiegung
bei Bruch

$$f_{Bm} = 101$$

$$f_{Bu} = 81$$

$$f_{Bo} = 125$$

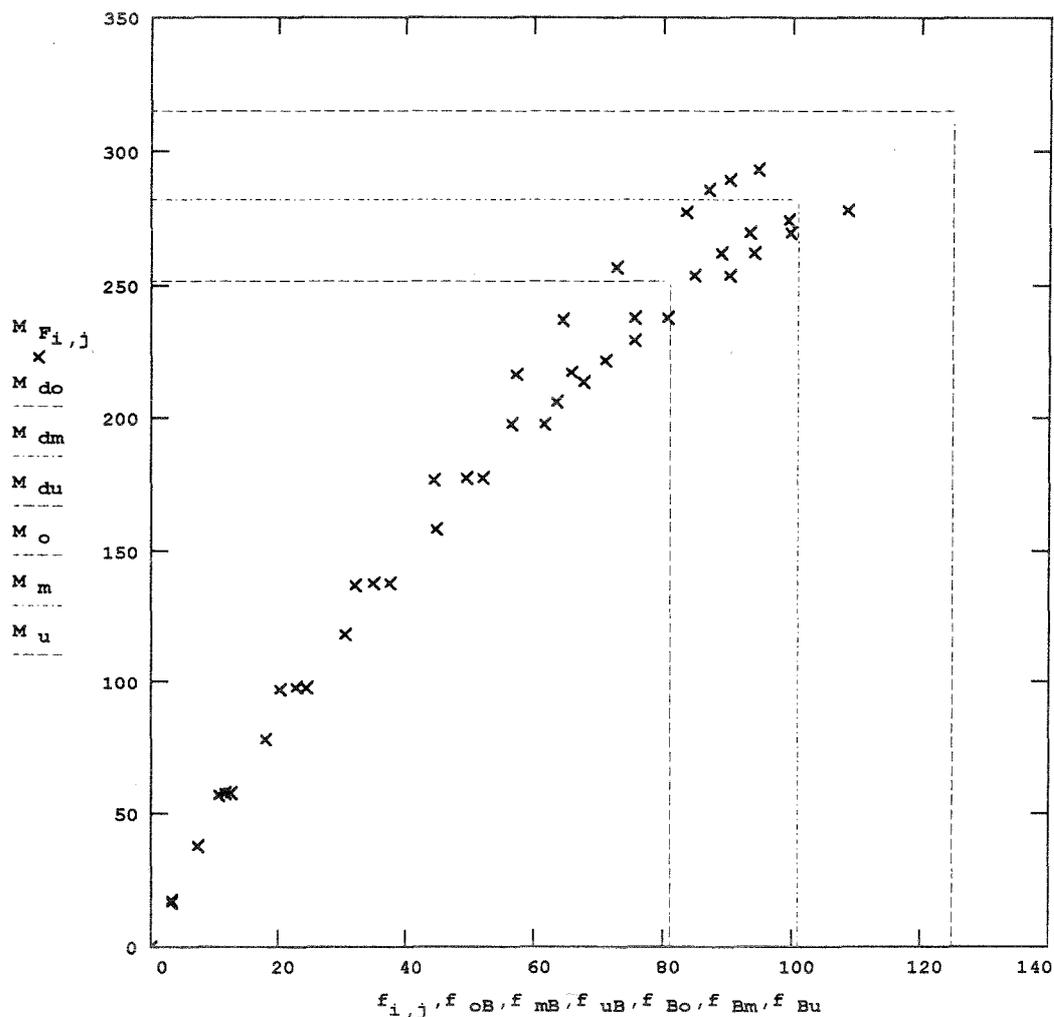
Einzelwerte

$$f_{B_j}$$

108.4
99.3
94.6

Moment
(Nm)

Meßwerte



Durchbiegung f (mm)

Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Versuchsdauer bis Bruch: 0.6 h bis 4.8 h

Positivlage

Bild 80 :

Biegemoment und Durchbiegung in Feldmitte

Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

$$M_{dm} = 281$$

$$M_{du} = 251$$

$$M_{do} = 315$$

Einzelwerte

$$M_{d_j}$$

277.6
273.6
292.8

Durchbiegung
bei Bruch

$$f_{Bm} = 101$$

$$f_{Bu} = 81$$

$$f_{Bo} = 125$$

Einzelwerte

$$f_{B_j}$$

108.4
99.3
94.6

Berechnete Werte $M_{dorm} = 377$

$$f_{Borm} = 129$$

$$M_{dorU} = 250$$

$$f_{Boru} = 99$$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

$$E_{om} = 8492$$

$$E_{ou} = 6663$$

Wirksames Trägheitsmoment (mm⁴)

$$I = I_{min} \quad I_{wc}(\epsilon_{Bm}) = 93901$$

$$I_{wc}(\epsilon_{Bu}) = 103287$$

Moment
(Nm)

Meßwerte

$$M_{F_{i,j}}$$

x

$$M_{F_{u,s}}$$

◇

$$M_{dm}$$

$$M_{du}$$

$$M_{dorm}$$

$$M_{dorU}$$

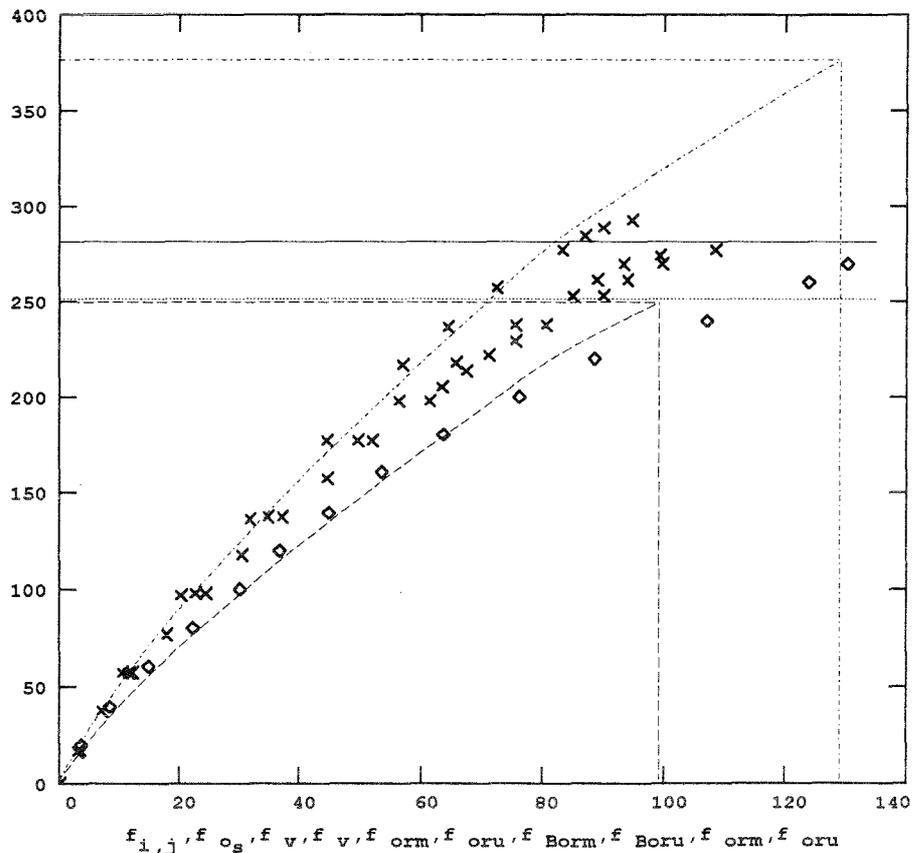
Näherungs-
kurven

$$M_{Form}(\epsilon_{orm})$$

$$M_{Foru}(\epsilon_{oru})$$

$$M_{Form}(\epsilon_{orm})$$

$$M_{Foru}(\epsilon_{oru})$$



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Durchbiegung f (mm)

Bild 81 :

Biegemoment und Durchbiegung in Feldmitte

**Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu berechneten Werten**

Elastizitätsmodul über Querschnitt und wirksames Trägheitsmoment über Stützweite
konstant angenommen

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft

$$M_{dm} = 281$$

$$M_{du} = 251$$

$$M_{do} = 315$$

Einzelwerte

$$M_{d_j}$$

277.6
273.6
292.8

Durchbiegung
bei Bruch

$$f_{Bm} = 101$$

$$f_{Bu} = 81$$

$$f_{Bo} = 125$$

Einzelwerte

$$f_{B_j}$$

108.4
99.3
94.6

Berechnete Werte $M_{dsrm} = 320$

$$f_{Bsrm} = 129$$

$$M_{dsru} = 238$$

$$f_{Bsru} = 99$$

Sekantenmodul (N/mm²)

$$E_{om} \cdot f_{Rm} = 7213$$

$$E_{ou} \cdot f_{Ru} = 6345$$

Wirksames Trägheitsmoment (mm⁴)

$$I = I_{min} \quad I_{wc}(\epsilon_{Bm}) = 93901$$

$$I_{wc}(\epsilon_{Bu}) = 103287$$

Moment
(Nm)

Meßwerte

$$M_{F_{i,j}}$$

x

$$M_{F_{u,s}}$$

◇

$$M_{dm}$$

$$M_{du}$$

$$M_{dsrm}$$

$$M_{dsru}$$

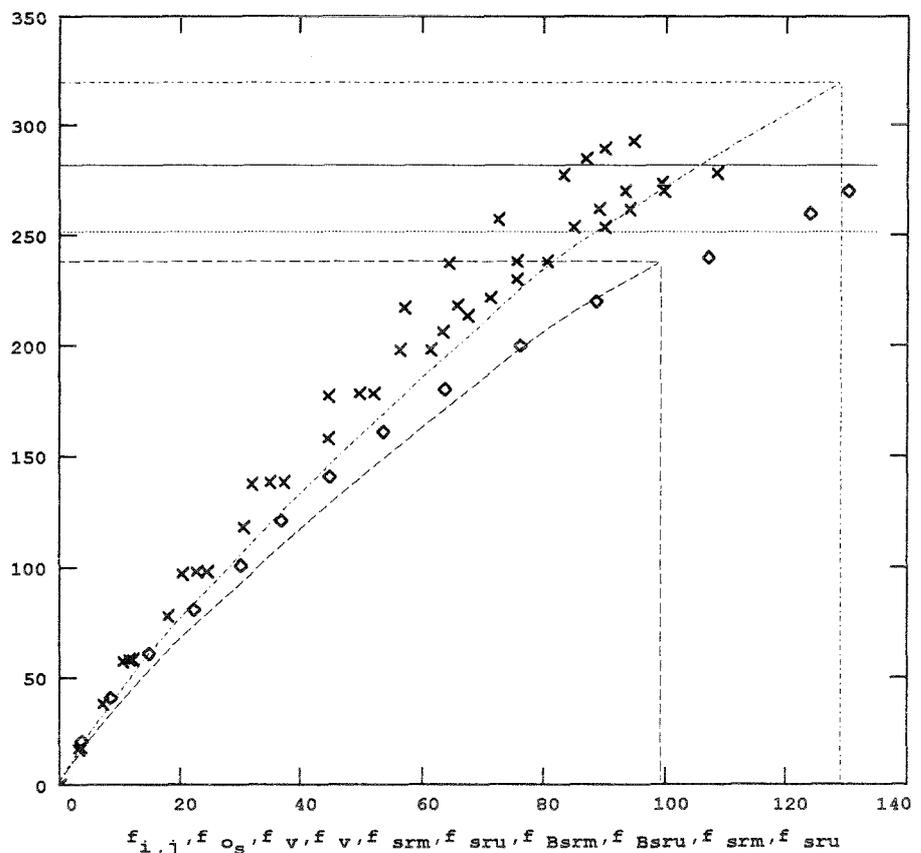
Näherungs-
kurven

$$M_{F_{srm}}(f_{srm})$$

$$M_{F_{sru}}(f_{sru})$$

$$M_{F_{srm}}(f_{srm})$$

$$M_{F_{sru}}(f_{sru})$$



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m:

Mittelwert

o,u:

95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Durchbiegung f (mm)

Bild 82 :

Biegemoment und Durchbiegung in Feldmitte

Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch im Vergleich zu berechneten Werten

Sekantenmodul bei Bruch über Querschnitt und wirksames Trägheitsmoment über Stützweite konstant angenommen

Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft

$M_{dm} = 281$
 $M_{du} = 251$
 $M_{do} = 315$

Einzelwerte

M_{d_j}
277.6
273.6
292.8

Durchbiegung bei Bruch

$f_{Bm} = 101$
 $f_{Bu} = 81$
 $f_{Bo} = 125$

Einzelwerte

f_{B_j}
108.4
99.3
94.6

Berechnete Werte $M_{dcrm} = 282$
 $M_{dcru} = 210$

$f_{cBrm} = 129$
 $f_{cBru} = 99$

Verformungsmodul (N/mm²)

$$E_{vt}(\epsilon) := \frac{E_v(\epsilon)}{C_t(\epsilon)} \quad C_t(\epsilon) := \left(\frac{\epsilon}{0.01} \right)^{k_t}$$

Wirksames Trägheitsmoment (mm⁴)

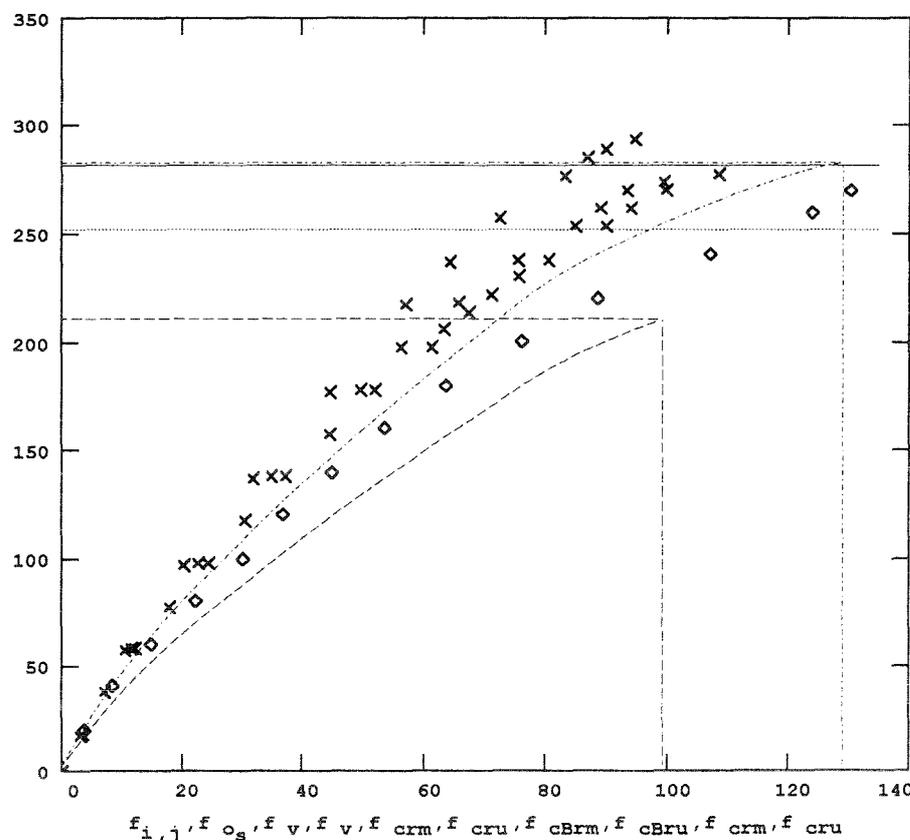
$$I := I_{min} \quad I_{wc}(\epsilon_{Bm}) = 93901$$

$$I_{wc}(\epsilon_{Bu}) = 103287$$

Moment (Nm)
 Meßwerte

Näherungskurven

- $M_{Fi,j}$ (x)
- M_{Fus} (◇)
- M_{dm} (—)
- M_{du} (---)
- M_{dcrm} (---)
- M_{dcru} (---)
- $M_{Fcrm}(f_{crm})$ (---)
- $M_{Fcru}(f_{cru})$ (---)
- $M_{Fcrm}(f_{crm})$ (---)
- $M_{Fcru}(f_{cru})$ (---)



Durchbiegung f (mm)

Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Positivlage

Bild 83 :

Biegemoment und Durchbiegung in Feldmitte

Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch im Vergleich zu berechneten Werten

Verformungsmodul über Querschnitt und wirksames Trägheitsmoment über Stützweite konstant angenommen, Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Verformungsmodul (N/mm²) Dehnung (%) Trägheitsmoment (mm⁴) Schwerpunktabstand (mm)

$E_{om} = 8492$ $\epsilon_A = 0.01$ $I_A = 208728$ $e_{oA} = 14.5$

$E_{mvB}(\epsilon_{Bm}) = 6366$ $\epsilon_{Bm} = 1.222$ $I_{minB}(\epsilon_{Bm}) = 93901$ $e_{oB}(\epsilon_{Bm}) = 25.9$

$E_{mvG}(\epsilon_G) = 7220$ $\epsilon_G = 0.4$ $I_{minG}(\epsilon_G) = 121731$ $e_{oG}(\epsilon_G) = 22.7$

$E_v(z) := E_o - (E_o - E_v(\epsilon)) \cdot \eta(z)$ $I_w(z) := I_A - (I_A - I_{wmin}) \cdot \eta(z)$

Biegemoment

Stützweite (mm) $l_F := 1600$

$M_{max}(\epsilon) := \frac{I_{wmin}}{e_o} \cdot \epsilon \cdot E_v(\epsilon)$

$M_{maxB}(\epsilon_{Bm}) = 282$

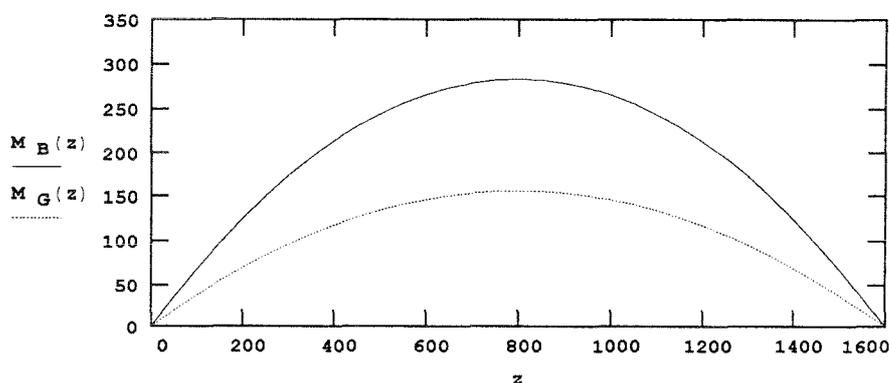
$z := 0,50 \dots 1_F$

$M(z) := M_{max}(\epsilon) \cdot \eta(z)$

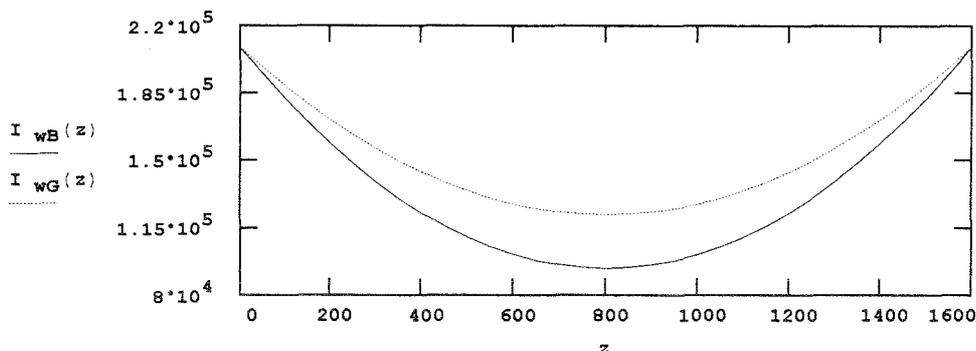
$M_{maxG}(\epsilon_G) = 155$

$\eta(z) := \frac{4}{l_F^2} \cdot z \cdot (l_F - z)$

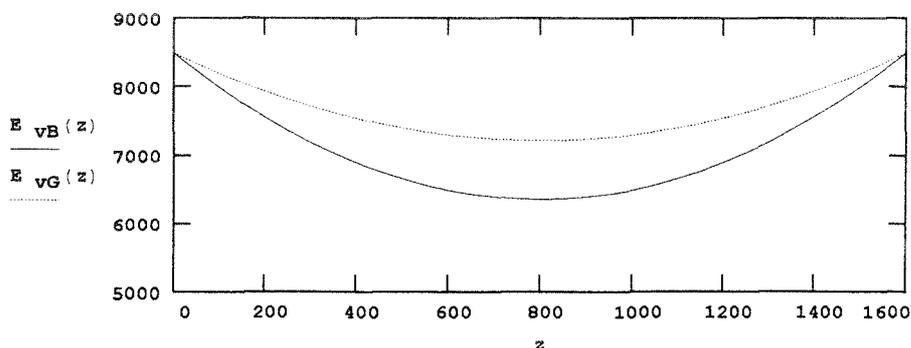
Biegemoment (Nm)



Wirksames Trägheitsmoment (mm⁴)



Verformungsmodul (N/mm²)



Positivlage

Stützweite z (mm)

Bild 84 : Parabelförmiger Verlauf des Biegemomentes über der Stützweite und entsprechende Näherung des wirksamen Trägheitsmomentes sowie Verformungsmoduls für Bruch- und Grenzdehnung am Rand des Druckgurtes in Feldmitte

Aufnehmbares Biegemoment	Berechnete Werte	Durchbiegung bei Bruch	Berechnete Werte	Stützweite (mm)
$M_{dm} = 281$	$M_{drm} = 282$	$f_{Bm} = 101$	$f_{Brm} = 109$	$l_F = 1600$
$M_{du} = 251$	$M_{dru} = 210$	$f_{Bu} = 81$	$f_{Bru} = 86$	Stützweite
Verformungsmodul (N/mm ²)				$z := 0 \dots l_F$

$$E_v(z) := E_o - (E_o - E_v(\epsilon)) \cdot \eta(z)$$

$$E_{vt}(z) := \frac{E_v(z)}{C_t(\epsilon)}$$

Durchbiegung

$$f_r(z) := 2 \cdot \int_0^{\frac{l_F}{2}} \frac{M(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot z}{I_w(z) \cdot E_{vt}(z)} dz$$

Wirksames Trägheitsmoment (mm⁴)

$$I_w(z) := I_A - (I_A - I_{wmin}) \cdot \eta(z)$$

Moment

$$M_{max}(\epsilon) := \frac{I_{wmin}}{e_o} \cdot \epsilon \cdot E_{vt}(\epsilon)$$

$$M(z) := M_{max}(\epsilon) \cdot \eta(z)$$

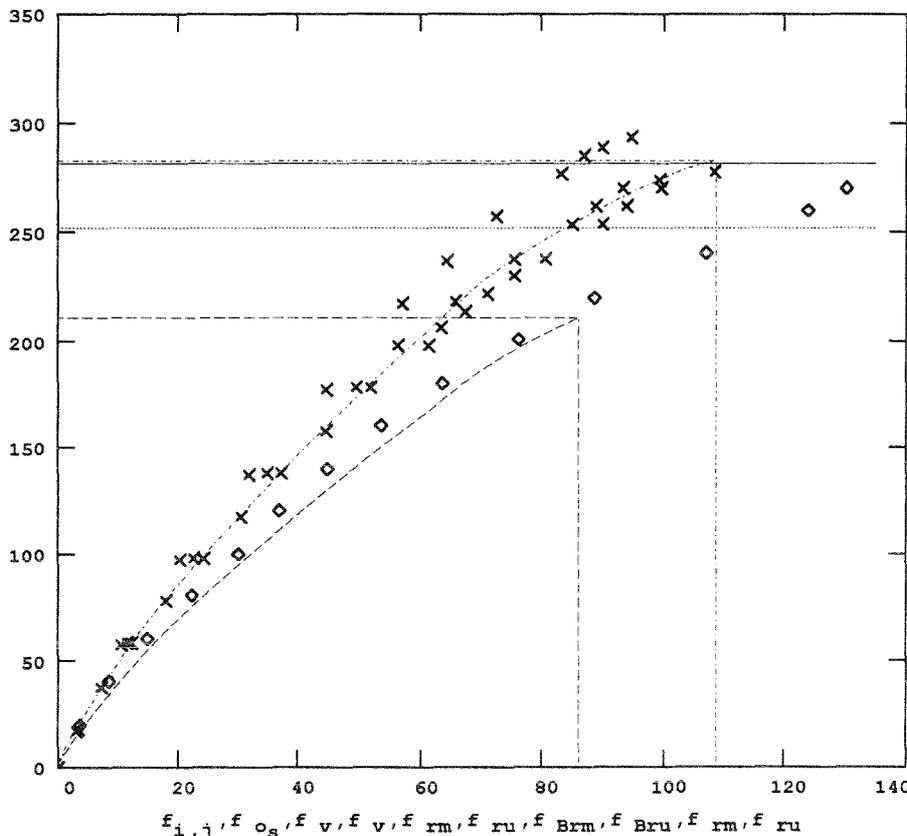
$$\eta(z) := \frac{4}{l_F^2} \cdot z \cdot (l_F - z)$$

Moment (Nm)

Meßwerte

Näherungskurven

- $M_{Fi,j}$ x
- M_{Fus} ◊
- M_{dm} —
- M_{du} - - -
- M_{drm} - - -
- M_{dru} - - -
- $M_{Frm}(f_{rm})$ - - -
- $M_{Fru}(f_{ru})$ - - -
- $M_{Frm}(f_{rm})$ - - -
- $M_{Fru}(f_{ru})$ - - -



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

u :

5%-Quantile

Positivlage

Durchbiegung f (mm)

Bild 85 :

Biegemoment und Duchbiegung in Feldmitte
Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch
im Vergleich zu berechneten Werten

Verformungsmodul über Querschnitt jeweils konstant
 sonst wie wirksames Trägheitsmoment von der Stützweite z abhängig angenommen
 Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

Aufnehmbares Biegemoment	Berechnete Werte	Durchbiegung bei Bruch	Berechnete Werte	Stützweite (mm)
$M_{dm} = 281$	$M_{drm} = 282$	$f_{Bm} = 101$	$f_{Brm} = 109$	$l_F = 1600$
$M_{du} = 251$	$M_{dru} = 210$	$f_{Bu} = 81$	$f_{Bru} = 86$	Stützlänge

Verformungsmodul (N/mm²)

$$E_v(z) := E_o - (E_o - E_v(\epsilon)) \cdot \eta(z)$$

$$E_{vt}(z) := \frac{E_v(z)}{C_t(\epsilon)}$$

Durchbiegung

$$f_r(z) := 2 \cdot \int_0^{\frac{l_F}{2}} \frac{M(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot z}{I_w(z) \cdot E_{vt}(z)} dz$$

Wirksames

Trägheitsmoment (mm⁴)

$$I_w(z) := I_A - (I_A - I_{wmin}) \cdot \eta(z)$$

Moment

$$M_{max}(\epsilon) := \frac{I_{wmin}}{e_o} \cdot \epsilon \cdot E_{vt}(\epsilon)$$

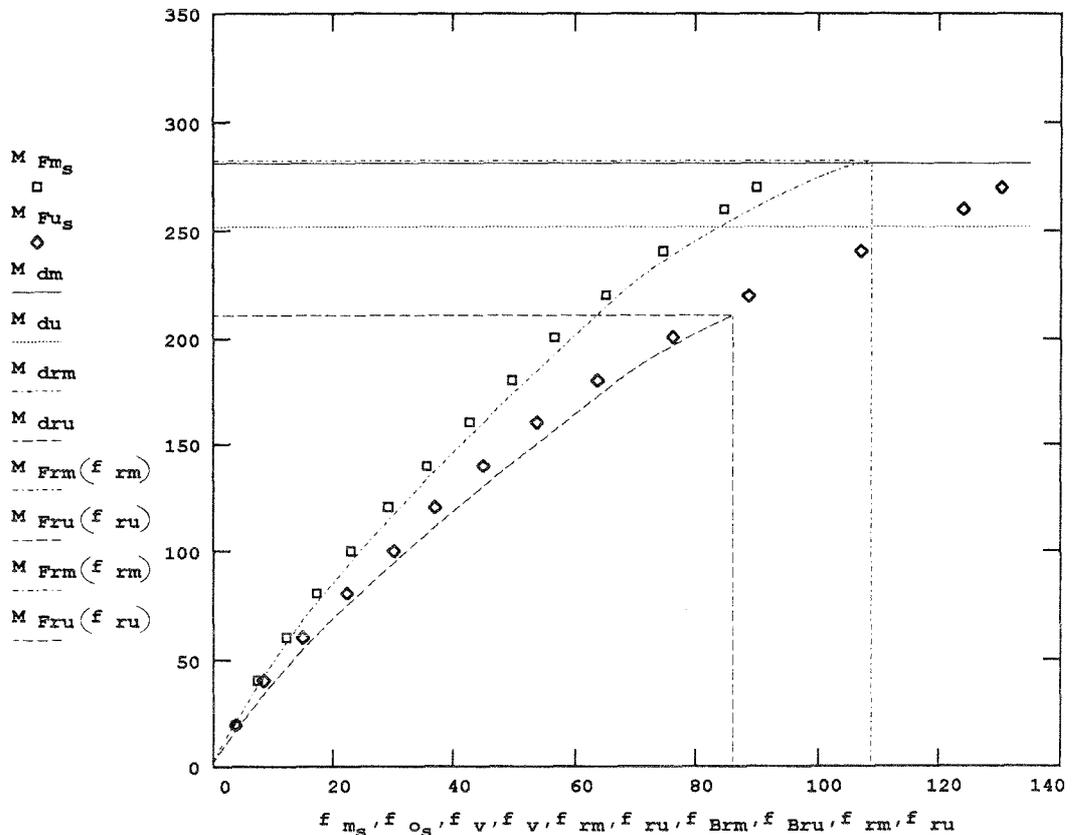
$$M(z) := M_{max}(\epsilon) \cdot \eta(z)$$

$$\eta(z) := \frac{4}{l_F^2} \cdot z \cdot (l_F - z)$$

Moment (Nm)

Meßwerte

Näherungskurven



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

m :

Mittelwert

u :

5%-Quantile

Durchbiegung f (mm)

Positivlage

Bild 86 :

Biegemoment und Durchbiegung in Feldmitte

Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis Bruch

im Vergleich zu berechneten Werten

Verformungsmodul über Querschnitt jeweils konstant

sonst wie wirksames Trägheitsmoment von der Stützweite z abhängig angenommen

Versuchszeit näherungsweise berücksichtigt

2.4.4 Dauerlast

Alle ermittelten Zeitdurchbiegungslinien sind in Bild 87 aufgetragen. Zusätzlich wurden die Durchbiegungen bei Bruch aller Traglastversuche angegeben. Die Werte mit stufenförmiger Laststeigerung (siehe Abschnitt 2.4.3.3) wurden mit einer rechnerischen Dauerlast von 45 % der Gesamtzeit für den jeweiligen Belastungsvorgang (vergleiche Abschnitt 2.3.2.3) berücksichtigt. Auch die Bruchwerte nach Höherbelastung aus dem Zeitstandversuch sind eingezeichnet.

2.4.4.1 Zeitdurchbiegungsverhalten

Ein Prüfkörper wurde nach 531 h Dauerbeanspruchung mit dem Biegemoment $M_{FC} = 197 \text{ Nm}$ entlastet, die Rückverformung wurde weitere 104 h lang gemessen. Die Durchbiegung stellte sich von 70,9 mm auf 0,7 mm nach dieser Entlastungszeit zurück. Da dieser Wert schon innerhalb der Genauigkeit des Bauteilversuchs lag, wurde auf eine weitere Beobachtung verzichtet. Der gleiche Prüfkörper wurde anschließend für den Versuch LP.3 verwendet und erneut belastet. Die praktisch vollständige Rückstellung ist in vergleichsweise kürzerer Zeit erfolgt als bei den Versuchen an Zug - Prüfkörpern (Abschnitt 2.3.2). Der Unterschied zwischen dem Kriechfaktor

$$C_t(531) = \left(\frac{531}{0,015} \right)^{k_{tm}} = 1,31$$

und einem in gleicher Weise definierten Rückkriechfaktor

$$C_{rt}(104) = \left(\frac{104}{0,015} \right)^{k_{tm}} = 1,26$$

ist bei der Belastungs - und Entlastungszeit des Versuchs nur noch gering.

Durch das Ergebnis dieses Bauteilversuchs wird ebenso wie von den Ergebnissen der Zugversuche mit Entlastung die theoretische Vermutung gestützt, daß Entlastungen mit dem gleichen Zeitdehnverhalten, praktisch also wie negative Spannungen berechnet werden können

$$C_{rt} = \left(\frac{t_{re}}{t_0} \right)^{k_t} \quad \{68\}$$

Neben den gemessenen Werten sind in Bild 88 Vergleichslinien für linear viskoelastisches Verhalten ohne Berücksichtigung der Abnahme der wirksamen Breiten im Querschnitt durch die Kriechzunahme der Dehnung im Druckgurt eingezeichnet. Für die Darstellung wurde der Versuch LP.2, der nach 331 h aus der Dauerlast heraus versagte, sowie die drei Versuche mit der niedrigsten Beanspruchung ausgewählt.

Wie sich aus dem beschriebenen Rückstellverhalten ergibt, kann sicher davon ausgegangen werden, daß mindestens in den Querschnitten der beiden Prüfkörper mit der geringsten Belastung nirgendwo die Grenzdehnung überschritten wurde. Die progressive Zunahme der Verformung in doppelt - logarithmischer Anfragungsweise ist eindeutig auf die Abnahme des wirksamen Trägheitsmomentes zurückzuführen, wie theoretisch erwartet (Vergleiche Abschnitt 1.3.3 , Bilder 7 und 8)

2.4.4.2 Zeitstandbruchverhalten

In den Bildern 89 und 90 sind die Bruchmomente (aufnehmbaren Biegemomente) und die Durchbiegungen bei Bruch doppelt - bzw. halb - logarithmisch über der Lastdauer dargestellt.

Die Ergebnisse der Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung bis zum Bruch sind mit eingezeichnet und wurden ebenfalls für die lineare Regressionsrechnung (doppelt - logarithmisch) verwendet.

Die einzelnen Werte aus den Versuchen mit Höherbelastung nach vorheriger Dauerbeanspruchung sind in den Bildern 91 und 92 zusätzlich eingetragen, sie wurden jedoch nicht mit in die lineare Regression einbezogen.

Es ist einwandfrei zu erkennen, daß die Bruchmomente mit der Zeit abnehmen und ihr Verlauf über der Zeit wie beim Werkstoffverhalten ausreichend genau durch eine Potenz - funktion angenähert werden kann (doppelt - logarithmisch linear).

Ebenso eindeutig zeigt sich, daß die Verformungen bei Bruch unabhängig von der Lastdauer sind. Wenn überhaupt eine zeitabhängige Tendenz herausgelesen werden soll, so ist nur ein, wenn auch sehr geringer, Anstieg zu vermuten.

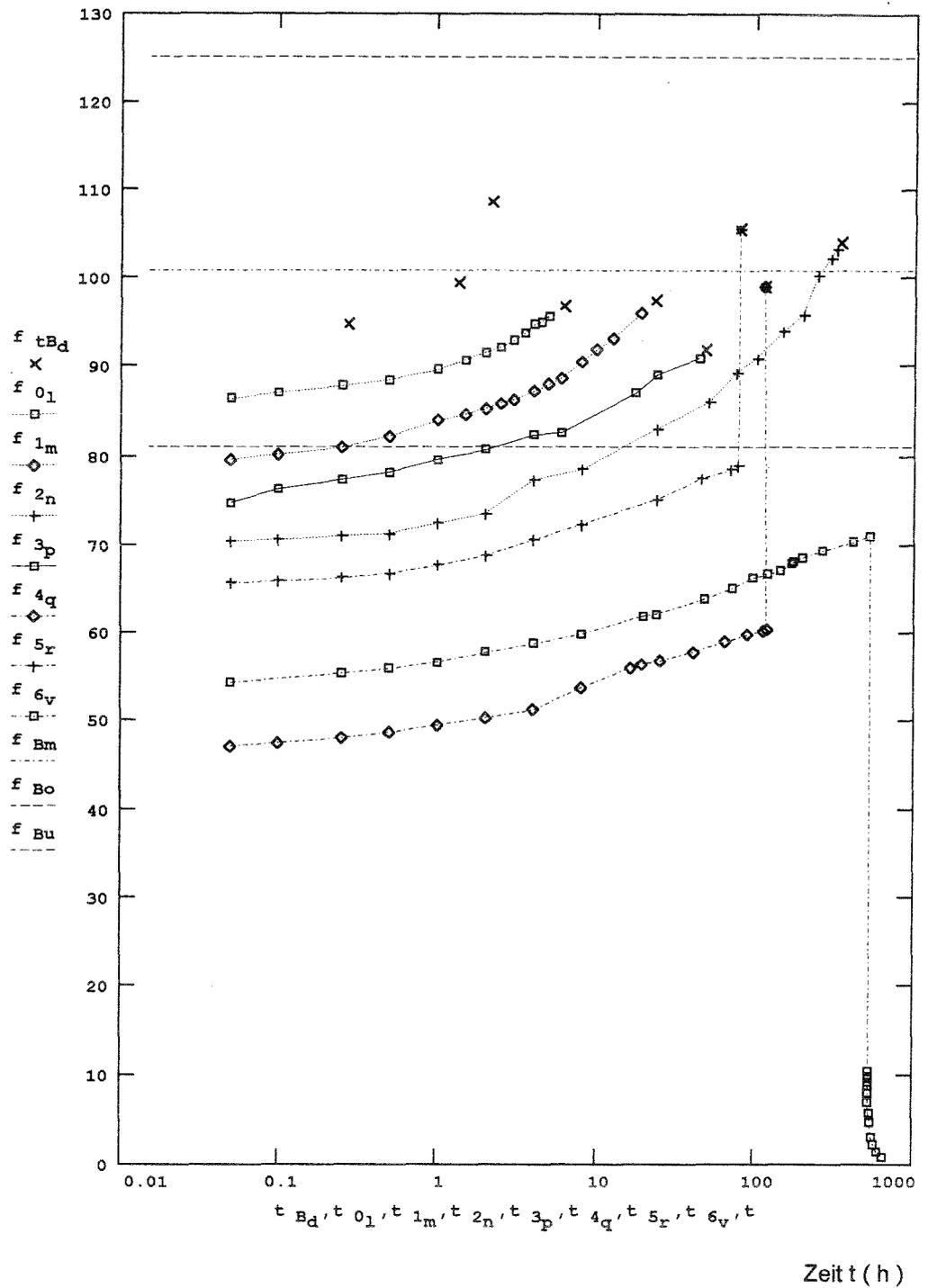
Die Durchbiegungen bei Bruch nach Höherbelastung liegen im oberen Streubereich der Werte nach stufenförmiger Belastung. Die Bruchmomente nach Höherbelastung erreichen fast die Mittelwerte dieser Versuche. Wegen der noch relativ geringen Belastungsdauer von etwa 100 h (dem entspricht ein Kriechfaktor von $C_t(100) = 1,26$) liegen die Werte noch im theoretisch möglichen Bereich. Die beiden Versuchsergebnisse stützen jedoch die Vermutung, daß die Bruchdehnungen mit der Lastdauer geringfügig zunehmen (Vergleiche Abschnitt 1.2.1.2).

In den Bildern 93 und 94 werden die Meßwerte mit den berechneten Zeitstandbruchlinien nach {63.1 bzw. 63.2} verglichen. Die gemessenen Werte ordnen sich nach Lage und Verlauf sehr gut in das berechnete Verhalten ein. Die Zeitlinie für die übliche Bemessungszeit von $2 \cdot 10^5$ h ist in Bild 94 hervorgehoben.

Durchbiegung
(mm)

Zeitstand-
moment
(Nm)

M	Fc _j	j
265		0
257		1
245		2
249		3
177		4
217		5
197		6



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2
LP.0 - LP.6

m : o,u :
Mittelwert 95%-, 5%-Quantile

Bild 87 :

**Durchbiegungen in Feldmitte bei Bruch aller Traglastversuche
sowie Zeit-Durchbiegungslinien der Zeitstandversuche LP**

Versuche LP.4 und LP.5 wurden nach Zeitstandbelastung stufenförmig bis Bruch belastet
Versuch LP.6 einschließlich Verhalten nach Entlastung

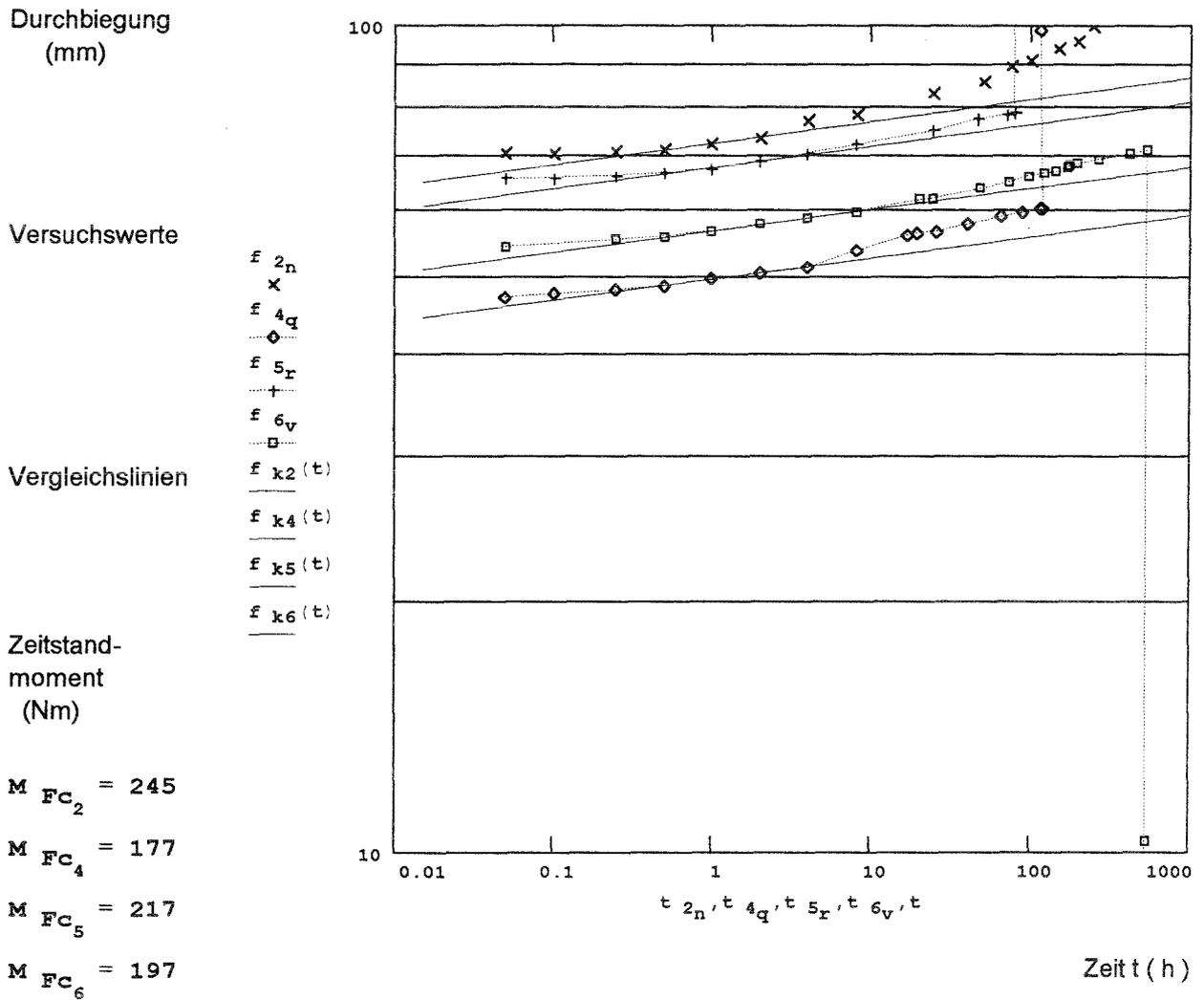
Vergleichslinien
für linear viskoelastisches Verhalten
und gleichbleibenden wirksamen Breiten

Bezugszeit $t_k := 1$

$$f_{kj}(t) := f_j(t) \cdot c_{tk}(t)$$

Kriechfaktor $c_{tk}(t) := \left(\frac{t}{t_k}\right)^{k_{tm}}$

Zeitexponent $k_{tm} = 0.02598$



Versuche Nr.: m :
LP.2 Mittelwerte
LP.4 - LP.6

Bild 88 : Gemessene Zeit-Durchbiegungslinien im Vergleich zu rechnerischem linear viskoelastischem Verhalten ohne Änderung der wirksamen Breiten im Querschnitt

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft
aus Versuchen mit stufenförmiger Laststeigerung

Durchbiegungen bei Bruch aus Versuchen
mit stufenförmiger Laststeigerung

$M_{dm} = 281.4$

$f_{Bm} = 100.8$

$M_{do} = 314.8$

$f_{Bo} = 125.1$

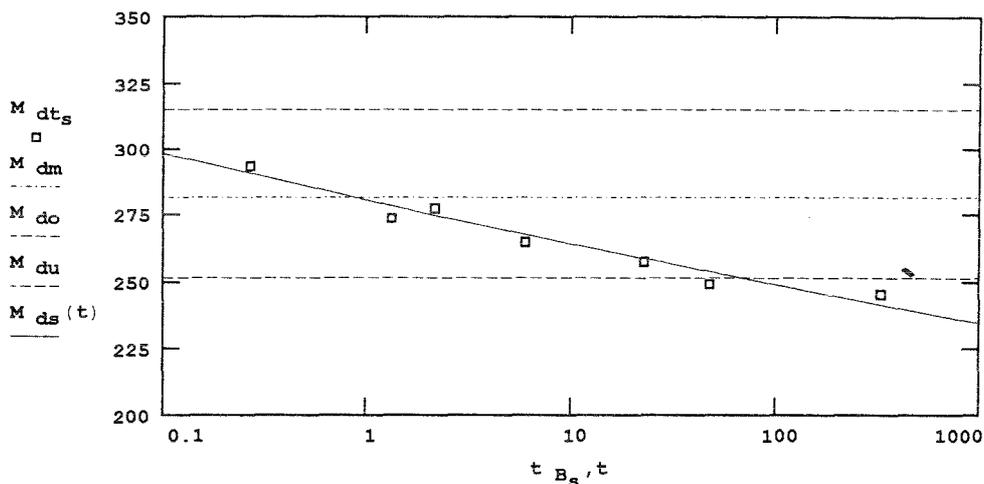
$M_{du} = 251.2$

$f_{Bu} = 80.9$

Bruchmoment
(Nm)

Versuchswerte

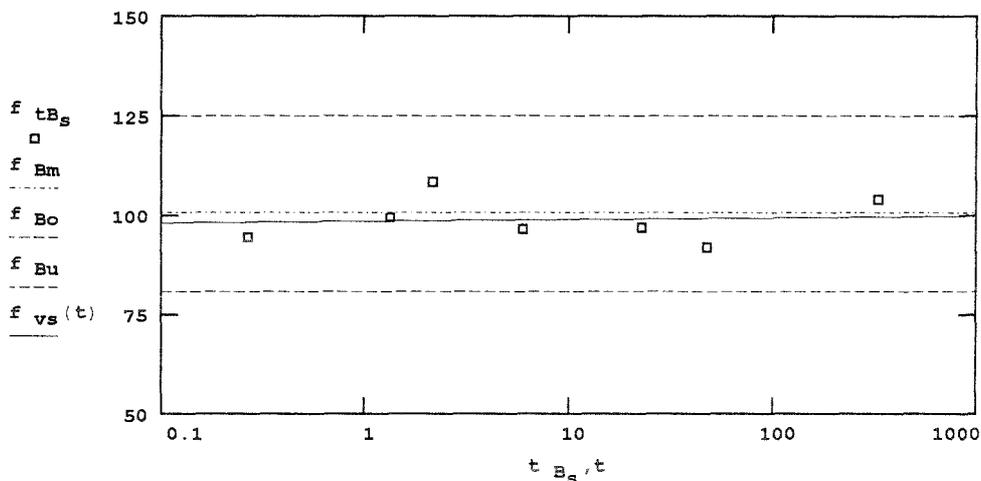
lin. Regression



Durchbiegung
bei Bruch
(mm)

Versuchswerte

lin. Regression



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2
LP.0 - LP.3

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Zeit t (h)

Bild 89 : Ergebnisse der Zeitstand-Bruchversuche
und Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung
an Profilplatten in Positivlage
halb-logarithmische Darstellung

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft
aus Versuchen mit stufenförmiger Laststeigerung

Durchbiegungen bei Bruch aus Versuchen
mit stufenförmiger Laststeigerung

$$M_{dm} = 281.4$$

$$f_{Bm} = 100.8$$

$$M_{do} = 314.8$$

$$f_{Bo} = 125.1$$

$$M_{du} = 251.2$$

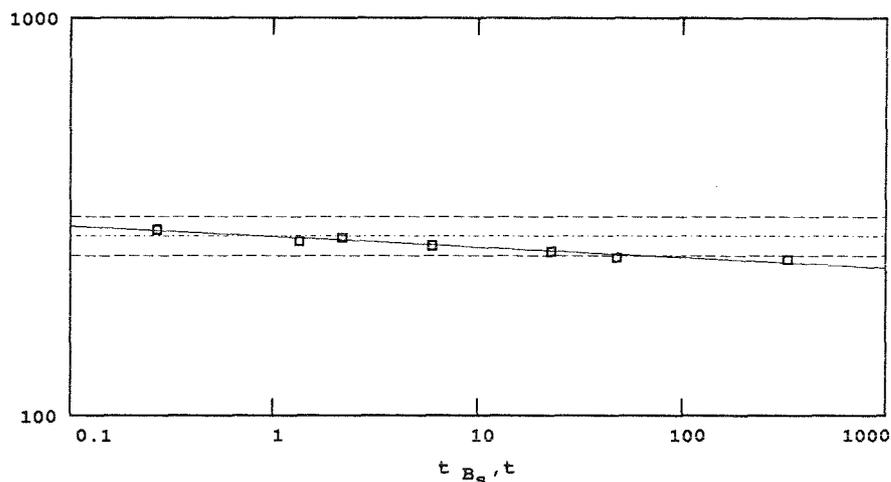
$$f_{Bu} = 80.9$$

Bruchmoment
(Nm)

Versuchswerte

lin. Regression

M_{dt_s}
□
 M_{dm}
 M_{do}
 M_{du}
 $M_{ds}(t)$

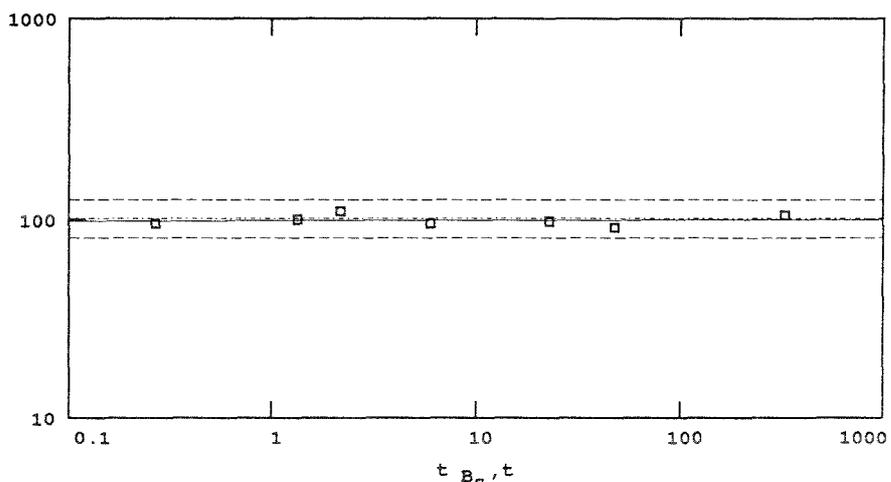


Durchbiegung
bei Bruch
(mm)

Versuchswerte

lin. Regression

f_{tB_s}
□
 f_{Bm}
 f_{Bo}
 f_{Bu}
 $f_{vs}(t)$



Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2
LP.0 - LP.3

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Zeit t (h)

Bild 90 : Ergebnisse der Zeitstand-Bruchversuche
und Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung
an Profilplatten in Positivlage
doppelt-logarithmische Darstellung

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft
aus Versuchen mit stufenförmiger Laststeigerung

Durchbiegungen bei Bruch aus Versuchen
mit stufenförmiger Laststeigerung

$M_{dm} = 281.4$

$f_{Bm} = 100.8$

$M_{do} = 314.8$

$f_{Bo} = 125.1$

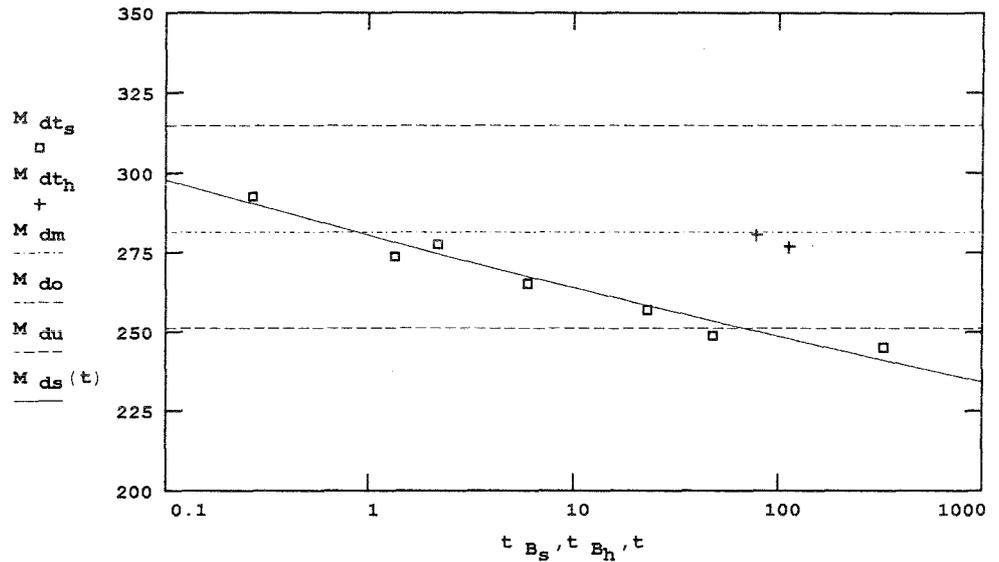
$M_{du} = 251.2$

$f_{Bu} = 80.9$

Bruchmoment
(Nm)

Versuchswerte

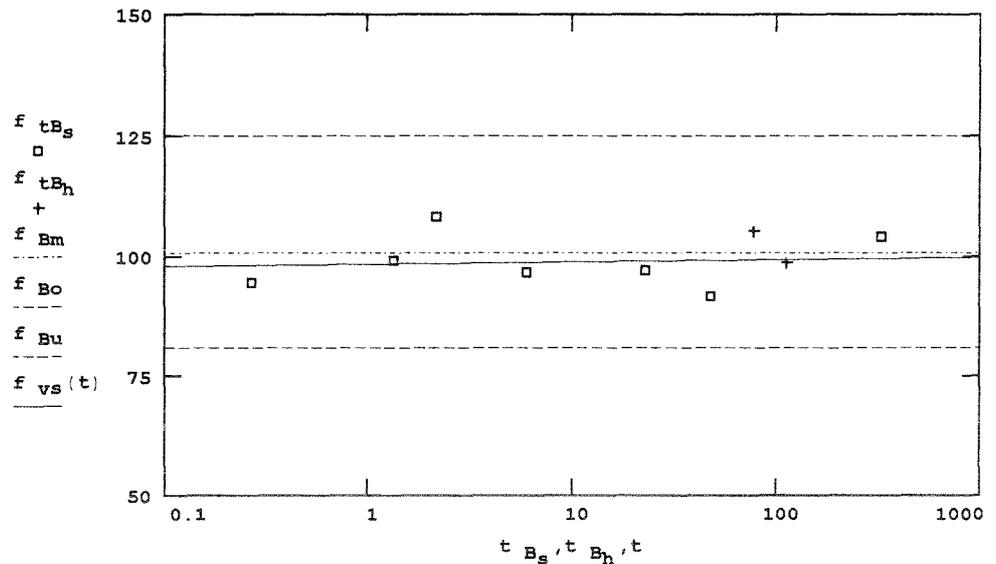
lin. Regression



Durchbiegung
bei Bruch
(mm)

Versuchswerte

lin. Regression



Zeit t (h)

M_{dt_h}, f_{tB_h} : Werte nach stufenförmiger Höherbelastung

Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2

LP.0 - LP.5

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

**Bild 91 : Ergebnisse der Zeitstand-Bruchversuche
und Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung
an Profilplatten in Positivlage
halb-logarithmische Darstellung**

Aufnehmbares Biegemoment
bei nicht vorhandener Querkraft
aus Versuchen mit stufenförmiger Laststeigerung

Durchbiegungen bei Bruch aus Versuchen
mit stufenförmiger Laststeigerung

$M_{dm} = 281.4$

$f_{Bm} = 100.8$

$M_{do} = 314.8$

$f_{Bo} = 125.1$

$M_{du} = 251.2$

$f_{Bu} = 80.9$

Bruchmoment
(Nm)

Versuchswerte

M_{dt_s}

M_{dt_h}

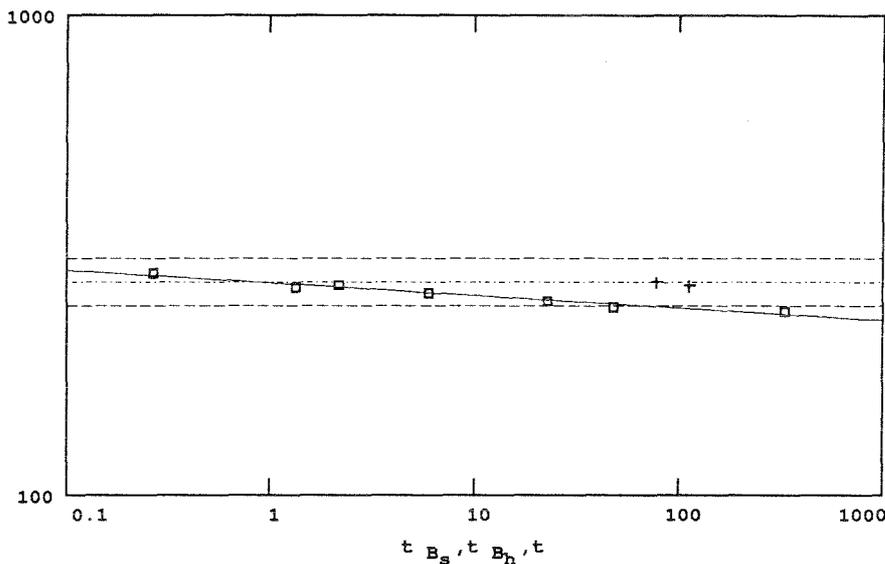
M_{dm}

M_{do}

M_{du}

$M_{ds}(t)$

lin. Regression



Durchbiegung
bei Bruch
(mm)

Versuchswerte

f_{tB_s}

f_{tB_h}

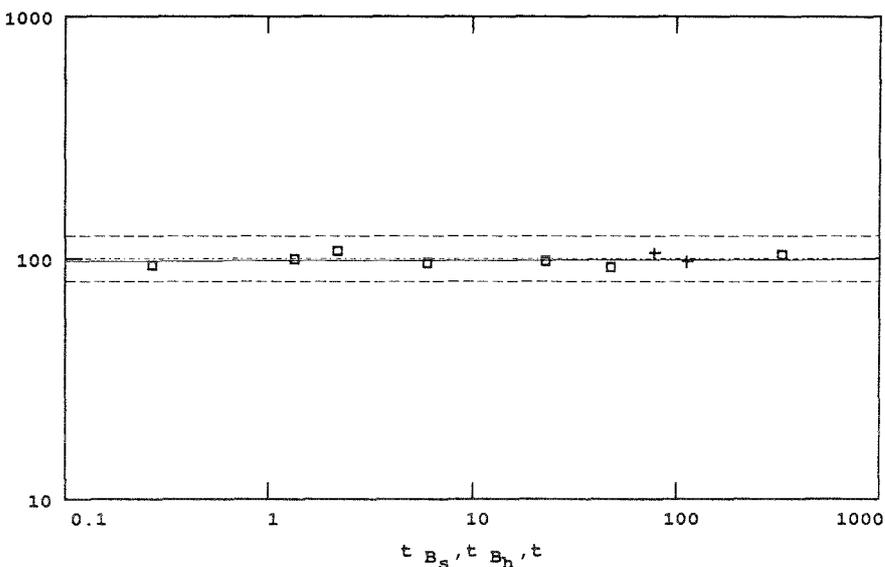
f_{Bm}

f_{Bo}

f_{Bu}

$f_{vs}(t)$

lin. Regression



Zeit t (h)

M_{dt_h}, f_{tB_h} : Werte nach stufenförmiger Höherbelastung

Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2
LP.0 - LP.5

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Bild 92 : Ergebnisse der Zeitstand-Bruchversuche und Versuche mit stufenförmiger Laststeigerung an Profilplatten in Positivlage
doppelt-logarithmische Darstellung

Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft aus Versuchen mit stufenförmiger Laststeigerung Dauer 0.6 bis 4.8 h

- $M_{dm} = 281.4$
- $M_{do} = 314.8$
- $M_{du} = 251.2$
- Berechnete Werte
- $M_{d0m} = 320$
- $M_{d0o} = 420$
- $M_{d0u} = 238$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

- $E_{om} = 8492$
- $E_{oo} = 10744$
- $E_{ou} = 6663$

Bruchdehnung (%)

- $\epsilon_{Bm} = 1.222$
- $\epsilon_{Bo} = 1.649$
- $\epsilon_{Bu} = 0.895$

Bruchdehnungsfaktor

- $f_{Rm} = 0.84939$
- $f_{Ro} = 0.74909$
- $f_{Ru} = 0.9522$

Zeitexponent

- $k_{tm} = 0.02598$
- $k_{tu} = 0.02462$
- $k_{to} = 0.02741$

Kriechfaktor

$$c_t(t) := \left(\frac{t}{t_o} \right)^{k_t}$$

$$M_{d0} := \frac{I_{cw}(\epsilon_B)}{e_o(\epsilon_B)} \cdot \epsilon_B \cdot E_o \cdot f_R$$

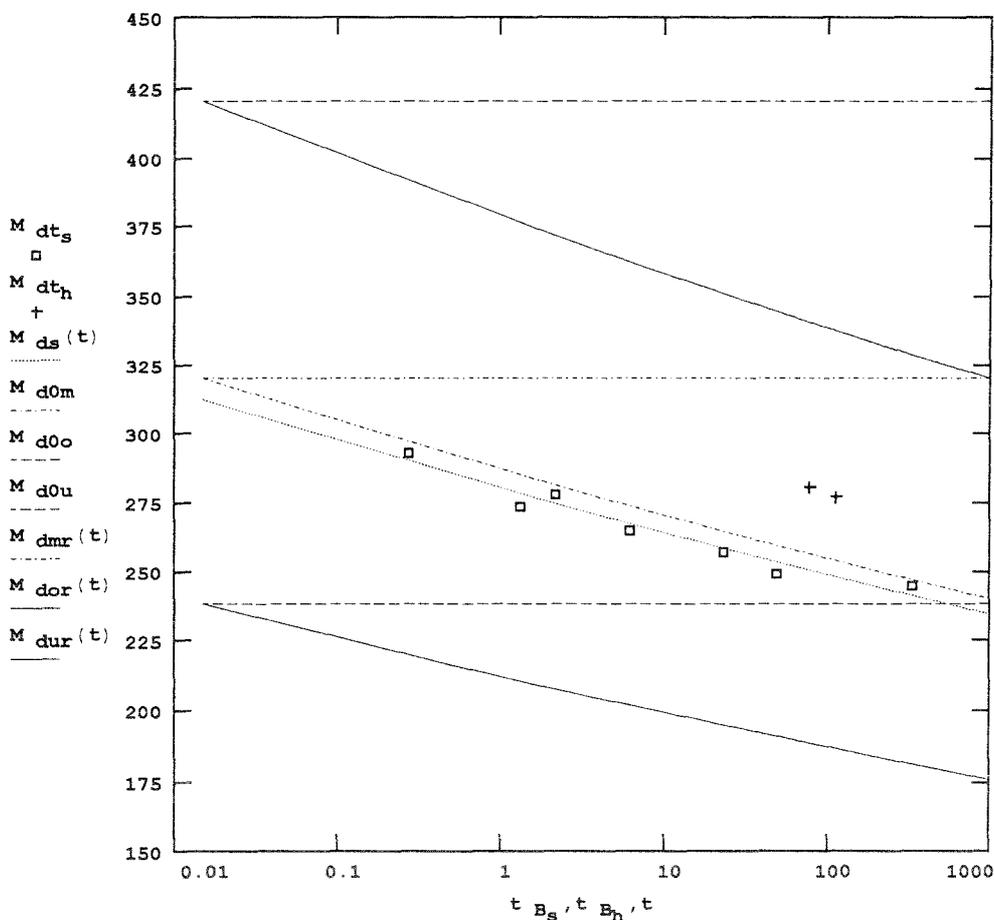
$$M_{dr}(t) := M_{d0} \cdot \frac{1}{c_t(t)}$$

Bruchmoment (Nm)

Versuchswerte

lin. Regression

Berechnete Werte



Zeit t (h)

M_{dt_h} : Werte nach stufenförmiger Höherbelastung

Versuche Nr.:

- KP.0 - KP.2
- LP.0 - LP.5

m :

Mittelwert

o,u :

95%-, 5%-Quantile

Bild 93 : Berechnete Zeitstand-Bruchlinie im Vergleich zu Meßwerten
 Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft
 Profilplatten in Positivlage
 halb-logarithmische Darstellung

Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft aus Versuchen mit stufenförmiger Laststeigerung Dauer 0.6 bis 4.8 h

$M_{dm} = 281.4$

$M_{do} = 314.8$

$M_{du} = 251.2$

Berechnete Werte

$M_{d0m} = 320$

$M_{d0o} = 420$

$M_{d0u} = 238$

Elastizitätsmodul (N/mm²)

$E_{om} = 8492$

$E_{oo} = 10744$

$E_{ou} = 6663$

Bruchdehnung (%)

$\epsilon_{Bm} = 1.222$

$\epsilon_{Bo} = 1.649$

$\epsilon_{Bu} = 0.895$

Bruchdehnungsfaktor

$f_{Rm} = 0.84939$

$f_{Ro} = 0.74909$

$f_{Ru} = 0.9522$

Zeitexponent

$k_{tm} = 0.02598$

$k_{tu} = 0.02462$

$k_{to} = 0.02741$

Kriechfaktor

$$c_t(t) := \left(\frac{t}{t_o} \right)^{k_t}$$

$$M_{d0} := \frac{I_{cw}(\epsilon_B)}{e_o(\epsilon_B)} \cdot \epsilon_B \cdot E_o \cdot f_R$$

$$M_{dr}(t) := M_{d0} \cdot \frac{1}{c_t(t)}$$

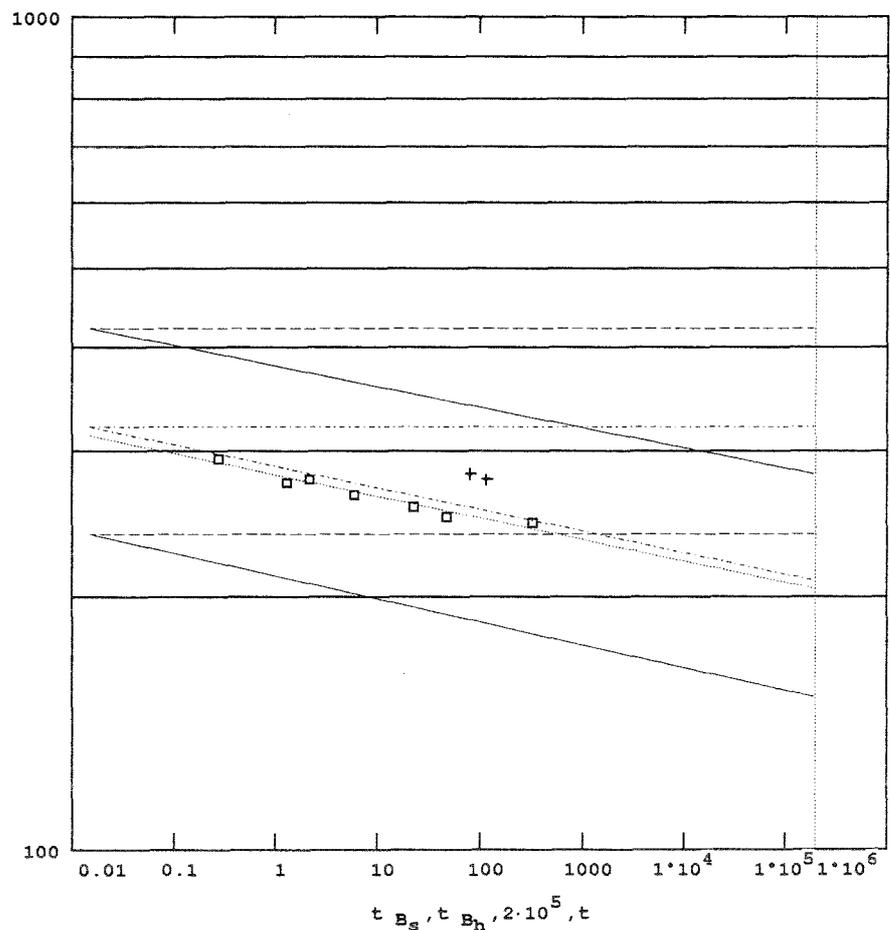
Bruchmoment (Nm)

Versuchswerte

lin. Regression

Berechnete Werte

- M_{dt_s} □
- M_{dt_h} +
- M - - - - -
- $M_{ds}(t)$ - - - - -
- M_{d0m} - - - - -
- M_{d0o} - - - - -
- M_{d0u} - - - - -
- $M_{dmr}(t)$ - - - - -
- $M_{dor}(t)$ - - - - -
- $M_{dur}(t)$ - - - - -



M_{dt_h} : Werte nach stufenförmiger Höherbelastung

Zeit t (h)

Versuche Nr.:

KP.0 - KP.2
LP.0 - LP.5

m : Mittelwert
o,u : 95%-, 5%-Quantile

Bild 94 : Berechnete Zeitstand-Bruchlinie im Vergleich zu Meßwerten Aufnehmbares Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft Profilplatten in Positivlage doppelt-logarithmische Darstellung

3 Zusammenfassung

Profilplatten aus Kunststoffen unterscheiden sich von solchen aus Metall (z. B. Stahl und Aluminium) in erster Linie in ihrem Werkstoffverhalten.

Die Dimensionierung dünnwandiger Profilplatten ist dadurch gekennzeichnet, daß ein "überkritisches" Tragverhalten zugelassen wird, bei dem die gedrückten Querschnittsteile ausgebeult sind. Für entsprechende Bauteile aus Stahl wurde durch theoretische und experimentelle Untersuchungen ein umfangreiches Regelwerk aufgestellt. Darauf aufbauend wird ein Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung der kunststoffspezifischen Eigenschaften vorgeschlagen.

Da bei üblichen Witterungsbedingungen, entsprechende Auswahl der Reaktionsharze vorausgesetzt, der Einfluß der Temperatur vernachlässigt werden kann und gleichwertige Schutzmaßnahmen gegen Witterungseinflüsse wie bei Stahl ("Korrosionsschutz") möglich sind, wird nur das zeitabhängige Spannungs - Dehnungs - Verhalten berücksichtigt.

3.1 Wirksame Breite

Das Beulverhalten der gedrückten Querschnittsteile ist maßgeblich für die Tragfähigkeit. Bei ausgebeulten Teilflächen entsteht im sogenannten Nachbeulbereich ein nichtlinearer Verlauf der Druckstauchungen, die durch die angreifende linear verteilte Last erzeugt werden. Die Druckstauchung erreicht ihren Höchstwert an den Längsrändern.

Die klassischen Lösungen der linearen Beultheorie können dargestellt werden in der Form

$$\varepsilon_{ki} = \frac{\pi^2}{\lambda_v^2} \quad \{1\}$$

Bei Erreichen der "kritischen Stauchung" ε_{ki} setzt instabiles Ausweichen eines Bauteils ein. Diese kritische Stauchung ist nur abhängig von der Geometrie und Einspannung des Bauteils sowie der Art der Krafteinleitung. Sie ist unabhängig vom Werkstoff, vorausgesetzt er ist isotrop oder quasiisotrop.

Im Schlankheitsgrad λ_v sind alle geometrischen Größen und Einspannbedingungen zusammengefaßt.

Die Gültigkeit von {1} kann auch auf orthotrope Werkstoffe (z. B. gewebeverstärkte Kunststoffe) ausgedehnt werden, wenn die Einflüsse aus der Orthotropie analog den Geometrie- und Einspannbedingungen einschließlich der Querverformung im Vergleichsschlankheitsgrad λ_v berücksichtigt werden.

Aufbauend auf der *Winter - Formel* (1968)

$$\frac{b_{ef}}{t_p} = 1,901 \sqrt{\frac{1}{\sigma_d}} \left(1 - 0,415 \sqrt{\frac{E}{\sigma_d}} \cdot \frac{t_p}{b_p} \right) \quad \{29.1\}$$

bzw.

$$\frac{b_{ef}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{ki}}{\sigma_d}} \right)$$

wird in DIN 18807, Teil 1, bei Stahltrapezprofilen die wirksame Breite berechnet nach

$$b_{ef} = 1,9 \cdot b_p \left(1 - 0,42 / \lambda_p \right) / \lambda_p \quad \{29.2\}$$

mit dem auf den Beulwert $k = 4$ bezogenen Vergleichsschlankheitsgrad und der Streckgrenze β_s

$$\lambda_{ps} = \frac{2}{\sqrt{k_\sigma}} \cdot \frac{b_p}{t_p} \cdot \sqrt{\frac{\beta_s}{E}} \quad \{29.3\}$$

Dehnungsbezogen wird entsprechend mit dem Beulwert $k_\varepsilon = 4$

$$\lambda_p = \frac{b_p}{t_p} \sqrt{\varepsilon_d} \quad \{29.4\}$$

Die Formel für Stahltrapezprofile nach DIN 18807, Teil 1 {29.2} kann ohne Veränderung mit dem dehnungsbezogenen Schlankheitsgrad λ_p für die Bemessung von Trapezprofilen aus isotropen oder quasiisotropen Kunststoffen verwendet werden. Hierbei wurde wie bei den *Winter - Formeln* in der Beziehung {29.4} ein etwa quadratisches Beulmuster eines langen Plattenstreifens vorausgesetzt.

3.2 Werkstoffverhalten

GF - UP - Laminat sind schichtförmig aus den verschiedenen Lagen der Verstärkungswerkstoffe aufgebaute Baustoffe, die mit einem flüssigen Reaktionsharz, dem Zusatzstoffe und Reaktionsmittel zugefügt wurden, getränkt werden. Nach Aushärtung erhält der Baustoff GF - UP seine Eigenschaften aus der Verbundwirkung der Glasfasern mit der Matrix, die zu den Duroplasten (Duromeren) gehört. Im Gegensatz zu Stahl und verschiedenen Thermoplasten (Plastomeren) darf wegen fehlender Streckgrenze mit Ausnahme des Kriechens kein duktiler Verhalten vorausgesetzt werden.

Es ist allgemein üblich bei der Dimensionierung gegen Bruch, mögliches Stabilitätsversagen und konstruktiv unzulässige Verformungen die Abhängigkeit des Werkstoffverhaltens von der Lastdauer, den Umgebungseinwirkungen und erhöhter Temperatur (insbesondere Dauertemperatur) mit Abminderungsfaktoren zu erfassen, die sich aus dem Vergleich mit in Kurzzeitversuchen bei Normalklima bestimmten 5 % - Quantilen der Eigenschaften ergeben.

Die quasielastisch ermittelten Schnittkräfte bzw. Beanspruchungen werden entweder den maßgebenden Festigkeiten nach Abminderung gegenüber gestellt oder mit Beulwerten bzw. Verformungswerten verglichen, die mit abgemindertem Elastizitätsmodul E_0 errechnet wurden.

Es wird zwischen Abminderungsfaktoren A_{Bj} bzw. K_j für die Dimensionierung gegen Bruchversagen sowie A_{Sj} bzw. C_j für den Stabilitätsnachweis und die Verformungsberechnung unterschieden. Entweder werden vereinfacht Abminderungsfaktoren und Sicherheitsfaktoren zu einem globalen Faktor zusammengefaßt, oder es werden Lasten und Beanspruchungen unterschiedlich langer Dauer überlagert, indem die einzelnen Schnittgrößen mit den Faktoren entsprechend ihrer Einwirkdauer multipliziert werden.

Die Gültigkeit der Überlagerung ist bei Kunststoffen (verstärkt oder unverstärkt) für Verformungs- und Stabilitätsberechnungen nachgewiesen, solange das Verformungsverhalten linear viskoelastisch bleibt. Weiterhin muß bei zyklischen Lasten die Einwirkdauer so klein sein, daß bis zum nächsten Lastzyklus genügend Zeit zur viskoelastischen Rückverformung bleibt.

Außer durch Einflüsse aus Umgebung und Temperatur wird der linear viskoelastische Bereich bei faserverstärkten Kunststoffen durch die Entstehung von Rissen begrenzt.

Bei Zugbeanspruchung senkrecht zu unidirektional verstärkten Laminatschichten entstehen Risse bei Dehnungen von etwa 0,1 %. Je nach Packungsdichte der Fasern in solchen Schichten und Aufbau des Gesamtlaminates können die Rißdehnungen unter oder über 0,1 % bis etwa 0,2 % liegen. Ist die Zugbeanspruchung parallel werden bei Dehnungen von etwa 1 % Risse festgestellt.

Wirrfaserlamine zeigen ab Zugdehnungen von 0,3 % bis 0,5 % eine progressive Zunahme von irreversiblen Schädigungen im Verbund Glasfaser / Matrix (Mikrorisse). Unverstärkte übliche UP - Harze verhalten sich bis zu Dehnungen von etwa 0,6 % bis 1 % linear viskoelastisch.

3.2.1 Grenzdehnung

Völlig ohne Fehlstellen, z. B. fehlende oder ungleichmäßige Haftung zwischen Faser und Matrix oder Lufteinschlüsse, kann ein Laminat nicht hergestellt werden. Vom Beginn der Verformung an gibt es oder bilden sich durch Lösen von Bindungen Schädigungen, vereinfacht Risse genannt, wie auch vielfach mit verschiedenen Meßverfahren gefunden wurde. Die Grenzdehnung ϵ_G ist die Dehnung, ab der Anzahl und Ausmaß der Risse das linear viskoelastische Verhalten merklich beeinflussen.

Die Höhe der Grenzdehnung wird vom Verformungsmodul und der Bruchdehnung der Matrix (in den Bereichen üblicher UP - Harze) nur sehr gering beeinflusst. Einflüsse, die sich auf den Grenzbereich Faser / Harz auswirken, sind eher zu beachten, wie z. B. die Packungsdichte einzelner Fasern, die Faserausüstung, die Benetzbarkeit und die Struktur im ausgehärteten Harz, die auch vom Aushärteverfahren abhängig ist.

Die Grenzdehnung nimmt bei Wirrfaserlaminaten je nach Kombination von Harztyp und Wirrfaserverstärkung mehr oder weniger stark mit zunehmender Temperatur ab.

Sowohl bei unidirektional verstärkten Laminatschichten als auch bei Wirrfaserlaminaten ist sie im technisch angewendeten Bereich nahezu unabhängig vom Glasvolumenanteil des Laminates. Ebenso ist sie unabhängig von der Verformungsgeschwindigkeit bzw. der Dauer konstanter Beanspruchung [20, 30] auch mit zyklischen Be- und Entlastungen. Die absolute Höhe der gemessenen Grenzdehnungswerte von Wirrfaserlaminaten hängt neben dem gewählten Meßverfahren in erster Linie von der Kombination Faser / Harz ab. Für im Bauwesen verwendete Lamine kann genügend genau von dem Wert $\epsilon_G = 0,4 \%$ ausgegangen werden. Bei optimaler Berücksichtigung der genannten Einflüsse sind höhere Werte möglich. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, daß nicht optimale Fertigung und thermische Nachbehandlung (Tempern) sich, oft unvermeidbar, negativer auswirken können.

3.2.2 Bruchdehnung

Der Verformungsmodul der Matrix beeinflusst die Bruchdehnung des Laminates stärker als die Grenzdehnung.

Ein geringerer Verformungsmodul, z. B. durch kürzere Aushärtezeit (ohne Tempern), führt bei Wirrfaserlaminaten zu größeren Bruchdehnungen. Gleiches Verhalten wurde mit unterschiedlich elastifizierten Harzen (Mischung von Harzen mit deutlich unterschiedlichem Verformungsmodul) festgestellt.

Die Bruchdehnung von Wirrfaserlaminaten steigt abhängig vom Harztyp mit zunehmender Temperatur bei gleichzeitig abnehmendem Verformungsmodul an, bis ein von der Temperaturbeständigkeit der Matrix (gekennzeichnet durch die Schubmodul- und Dämpfungs-Temperaturkurven) vorgegebener Grenzwert überschritten wird.

Für die Bemessung von Bauteilen aus Wirrfaserlaminaten kann genügend genau davon ausgegangen werden, daß die Bruchdehnungen bei Verformungsgeschwindigkeiten unter 1 % / min sowohl für Dauerlasten als auch zyklische Lasten unabhängig von der Zeit konstant sind.

Ein negativer Einfluß der Zeit auf die Bruchdehnung des Laminates kann durch korrosive Wirkung der Luftfeuchtigkeit auf die wegen der Laminatrisse zugängliche Glasoberfläche entstehen. Bei Wirrfaserlaminaten dürfte dieser Effekt nur von geringer Bedeutung sein, während er bei unidirektional verstärkten Laminatschichten und Beanspruchung in Richtung der Faser größer sein wird.

3.2.3 Zeitabhängiges Spannungs - Dehnungs - Verhalten

Jeder Punkt einer Zeitdehnlinie ist durch die Summe von Dehnungen $\Delta \varepsilon_i(t)$ aus Spannungserhöhungen $\Delta \sigma_i(\dot{\varepsilon}_i)$ mit Verformungsgeschwindigkeiten $\dot{\varepsilon}_i$ zu beschreiben.

Im einfachsten Fall konstanter Dauerlast, das heißt einer einzigen Spannungserhöhung auf σ_c , wird die Dehnung ε_c zur Zeit t mit der mittleren Verformungsgeschwindigkeit erreicht, die sich aus Zeiten unterschiedlicher Beschleunigung ergibt. Die Dehnung ε entsteht mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Zeitpunkt t_0 und wächst mit ständig abnehmender Beschleunigung auf den Wert ε_c an.

Es gibt verschiedene rheologische Modellvorstellungen zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Kunststoffen, bei denen eine unterschiedliche Anzahl von Federn und Dämpfern in verschiedener Anordnung parallel und hintereinander geschaltet angenommen werden. Diese Modelle müssen an real gemessene Kriechkurven angepaßt werden. Es ist daher sinnvoller, direkt von gemessenen Kurven auszugehen. Es hat sich gezeigt, daß die Zeit -

dehnlagen von Wirrfaserlaminaten vor dem Überschreiten der Grenzdehnung, im linear viskoelastischen Bereich, bei doppeltlogarithmischer Darstellung in ausreichender Näherung als Geraden verlaufen. Sie können also durch ein einfaches Potenzgesetz beschrieben werden.

Die theoretische, linear viskoelastische Dehnung ε_0 zur Zeit t_0 wächst mit dem Kriechfaktor C_t auf die Dehnung ε_{0c} bei der Belastungszeit t an

$$\varepsilon_{0c} = \varepsilon_0 \cdot C_t \quad \{42.1\}$$

Mit dem Zeitexponenten k_t , der dem Anstieg der Geraden entspricht

$$k_t = \frac{\log(\varepsilon_2 / \varepsilon_1)}{\log(t_2 / t_1)} \quad \{42.2\}$$

wird

$$C_t = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{k_t} \quad \{42.3\}$$

Für den Kriechfaktor φ_t , der nur den Verformungszuwachs durch das Kriechen erfaßt, gilt

$$\varphi_t = C_t - 1 \quad \{42.4\}$$

Zur Bestimmung des Zeitexponenten k_t aus Versuchen sollte die erste Bezugszeit mindestens $t_1 = 1$ h betragen. Die Versuchsdauer bis zur Zeit t_2 sollte größer als 1 Dekade sein. Nach eigenen Erfahrungen wird $t_2 = 100$ h empfohlen. Die in DIN 18820 Teil 4 zur Bestimmung des Verformungsmoduls gewählten Zeiten $t_1 = 1$ h und $t_2 = 24$ h führen ebenfalls zu ausreichend genauen Ergebnissen.

Es ist sicherer aus einer größeren Anzahl von Versuchsergebnissen mit Zeiten von 1 bis 24 Stunden nach statistischen Methoden die 5% - Quantilen zu ermitteln als aus Versuchsergebnissen geringerer Anzahl mit längeren Versuchszeiten. Wird die erste Bezugszeit kleiner als 1 h (oft üblich 0,1 h) gewählt, so sind die errechneten Zeitexponenten bzw. Kriechfaktoren in einem nicht mehr zu vernachlässigenden Umfang zu gering. Bei kleineren Versuchszeiten zeigt sich ein verzögertes Kriechen (geringerer Anstieg der Zeitdehnlagen in doppelt-logarithmischer Darstellung). Neben Meßunsicherheiten (Belastungsvorgang, hohe Verformungsgeschwindigkeit - Zeitverzug beim Messen) sind für die scheinbar geringere Kriechneigung hauptsächlich Dehnungsüberhöhungen im Mikrobereich der unvermeidlichen Fehlstellen mit zeitverzögerter Verformungsumlagerung auf den Gesamtquerschnitt maßgeblich.

3.2.4 Rißfaktor

Die Abweichung der sich einstellenden Gesamtdehnung vom linear viskoelastischen Verhalten ist ein Maß für die Schädigung des Laminates. Dieses Maß, der Rißfaktor f_r , ist genügend genau nur von der entstandenen Dehnung abhängig, unabhängig von dem Belastungs - Zeit - Kollektiv, das die Dehnung bewirkt hat. Erreicht der Rißfaktor den Bruchdehnungsfaktor f_R , hat die Gesamtdehnung die Bruchdehnung erreicht und der Bruch tritt ein.

3.2.5 Berechnung

Mit den Werkstoffkennwerten für eine konstante Verformungsgeschwindigkeit
Elastizitätsmodul E_0

Grenzdehnung ε_G

Bruchdehnung ε_B

Bruchspannung β

und dem

Zeitexponenten k_t

können für konstante Dauerlasten die verformungsabhängigen Werte mit nachstehenden Beziehungen ermittelt werden.

$$\varepsilon = \varepsilon_B - \left(\frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - \sigma \cdot C_t}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{48.1\}$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t} \quad \{49.1\}$$

$$E_v = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t \cdot \varepsilon} \quad \{50.1\}$$

$$f_r = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0 \cdot \varepsilon} \quad \{51.1\}$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_B \cdot f_R - \frac{a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0} \quad \{52.1\}$$

$$\varepsilon_0(t_0) = \left(\varepsilon_B \cdot f_R - \frac{a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0} \right) \frac{1}{C_t} \quad \{52.2\}$$

Gleiche Ergebnisse liefern

$$\varepsilon = \varepsilon_B - \left(\frac{\beta - \sigma \cdot C_t}{a} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \{48.2\}$$

$$\sigma = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t} \quad \{49.2\}$$

$$E_v = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{C_t \cdot \varepsilon} \quad \{50.2\}$$

$$f_r = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0 \cdot C_t} \quad \{51.2\}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0} \quad \{52.3\}$$

$$\varepsilon_0(t_0) = \frac{\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon)^n}{E_0 \cdot C_t} \quad \{52.4\}$$

mit $n = \frac{\varepsilon_B + \varepsilon_G}{\varepsilon_B \cdot f_R + \varepsilon_G}$ und $a = E_0 \cdot f_R \cdot \varepsilon_B^{-n}$

oder $n = \frac{\varepsilon_B + \varepsilon_G}{\frac{\beta}{E_0} + \varepsilon_G}$ und $a = \beta \cdot \varepsilon_B^{-n}$

Die Gleichungen {52.2} und {52.4} geben die theoretisch linear viskoelastische Dehnung zum Zeitpunkt $t = t_0$ an.

Die Beziehung für die Zeitstandbruchspannung wird

$$\beta_c = \frac{\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R}{C_t} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R = \beta \quad \{44\}$$

Die Verformungsgeschwindigkeit im Kurzzeitversuch zur Bestimmung der Werkstoffkennwerte β (bzw. f_R), E_0 und ε_B ist so niedrig zu wählen, daß durch weitere Verringerung die Bruchdehnung nicht mehr wesentlich erhöht wird.

Die Zeit t_0 muß unter Berücksichtigung der Versuchsdauer bis zum Bruch so festgelegt werden, daß die Kennwerte für diesen Zeitpunkt ausreichend genau sind.

Bei GF - UP - Laminaten entspricht die üblicherweise verwendete Dehnungsgeschwindigkeit 1 % / min vorstehender Bedingung. In dieser Arbeit wurde $t_0 = 0,015$ h gewählt.

Die angegebenen Beziehungen beschreiben das Verhalten von Wirrfaserlaminaten bei einachsiger Zugbeanspruchung mit Werkstoffkennwerten aus Zugversuchen.

Sie können auch für einachsige Druckbeanspruchung verwendet werden. Um Schädigungen, z. B. durch Querverformung, Schubbeanspruchung und vielleicht Knicken der Glasfasern, auszulösen, muß das Laminat unter Druck höher verformt werden als unter Zug.

Da bei Wirrfaserlaminaten die interlaminare Scherfestigkeit (Verschiebung von Laminatschichten gegeneinander) von untergeordneter Bedeutung ist, versagen sie unter Biegebeanspruchung, wenn die Bruchdehnung in der gezogenen Randfaser erreicht ist. Die Biegebruchmomente sind jedoch wegen des nicht mehr linearen Verlaufs der Dehnsteifigkeiten über dem Querschnitt höher als bei Annahme linearen Verlaufs errechnet wird. Ebenso ist der Anstieg von Zeitdurchbiegungslinien bei querkräftfreier Biegung nach Überschreiten der Grenzdehnung ε_G in der Zugzone geringer als bei reiner Zugbeanspruchung. Auch für Biegebeanspruchung sind die mit den genannten Beziehungen errechneten Spannungen kleiner als vom wirklichen Werkstoffverhalten zu erwarten.

Ebenso führen bei mehrachsiger Beanspruchung die Formeln bezogen auf die Hauptzugspannung zu sicheren Werten. Es ist jedoch sicherlich von großem Interesse, die Verschiebung des Schädigungsbereiches bei Druckbeanspruchung und damit die höhere Beanspruchbarkeit (Spannungen) insbesondere durch den Einfluß mehr oder weniger großer Querverformung zu untersuchen. Wegen der quasiisotropen Anordnung der Faserverstärkung dürften sich Schubbeanspruchungen vergleichsweise gering auswirken.

3.2.6 Wechselnde Lasten

Die Überlagerung der Dauerlast mit wechselnden Lasten konnte nicht weiter behandelt werden. Hierbei ist folgendes zu beachten: Die Auswirkung von Lasterhöhungen $\Delta \sigma_i$ mit den zugehörigen ihren Lastdauern entsprechenden C_{ti} auf die entstehende Gesamtdehnung ε kann mit den Beziehungen {47} bis {51} erfaßt und der Bruch -

dehnung gegenübergestellt werden. Bei Zwischenentlastungen ist zu beachten, daß der einmal entstandene Schädigungsanteil ebenso erhalten bleibt wie ein viskoelastischer Anteil bei nicht ausreichender Entlastungszeit im Vergleich zur Belastungsdauer. Die linear viskoelastischen Verformungsanteile $\Delta \varepsilon_{0i}$ stellen sich vollständig zurück, die notwendigen Entlastungszeiten entsprechen wahrscheinlich etwa den Belastungszeiten. Die jeweiligen Entlastungszeiten können durch "Rückkriechfaktoren" C_{rti} erfaßt werden.

$$C_{rt} = \left(\frac{t_{re}}{t_0} \right)^{k_t}$$

Die sich aus dem Last - Zeit - Kollektiv einstellende Gesamtdehnung darf innerhalb einer vorgegebenen Lebensdauer den Wert der Bruchdehnung nicht erreichen oder im Sinne der Schadensakkumulation ausgedrückt:

Der durch das Last - Zeit - Kollektiv bewirkte Schädigungsfaktor $f_r (\Delta \sigma_i, C_{ti}, C_{rti})$ darf den Bruchdehnungsfaktor f_R nicht überschreiten

$$\frac{f_r (\Delta \sigma_i, C_{ti}, C_{rti})}{f_R} \leq 1 \quad \{53\}$$

3.3 Berechnung von Profilplatten

Profilplatten aus Kunststoffen werden in erster Linie im Wand - und Dachbereich als Flächentragwerke auf Unterkonstruktionen mit zwei (Einfeldträger) oder mehr (Durchlaufträger) linienförmigen Auflagern eingesetzt. Das aufnehmbare Biegemoment bei nicht vorhandener Querkraft ("Feldmoment") kann wie gezeigt in dehnungsbezogener Anwendung der Regelwerke für Stahltrapezprofile ermittelt werden. In Anlehnung an DIN 18807 Teil 1 ist bei einem Trapezprofil ohne Sicken wie folgt vorzugehen

Nach {29.2} mit {29.4} gilt für die wirksame Breite des Druckgurtes

$$b_w = 1,9 \cdot b_p \left(1 - 0,42 / \lambda_p \right) / \lambda_p \leq b_p \quad \{54.1\}$$

mit

$$\lambda_p = \frac{b_p}{t_0} \sqrt{\varepsilon_d} \quad \{54.2\}$$

Dabei darf die errechnete wirksame Breite b_w die Druckgurtbreite b_p nicht überschreiten.

Die wirksame Breite im Steg ist am Druckrand

$$l_{w1} = 0,76 \cdot \frac{t_s}{\sqrt{\epsilon_d}} \quad \{54.3\}$$

Direkt oberhalb der Dehnungsnulllinie ist die wirksame Breite

$$l_{w2} = 1,5 \cdot l_{w1} \quad \{54.4\}$$

Die Summe der wirksamen Breiten im Steg darf nicht größer als die wirkliche Breite des Steges s_p zwischen dem Druckrand und der Dehnungsnulllinie sein.

$$\sum l_{wi} \leq s_p \quad \{54.5\}$$

Der Verlauf der Dehnungen über dem Querschnitt ist linear. Da der Verformungsmodul E_v nach {50.1 und 50.2} abhängig von der Dehnung ist, kann nicht mehr im gesamten Verformungsbereich von einer linearen Spannungsverteilung ausgegangen werden. Nur solange das Werkstoffverhalten linear viskoelastisch ist, also die Grenzdehnung ϵ_G im Querschnitt nicht überschritten wird, ist auch ein linearer Spannungsverlauf gegeben.

3.3.1 Rechnungsschritte

Die Rechnung erfolgt in mindestens 4 Schritten für eine vorgegebene Dehnungsgrenze im Druckgurt

- Rechnungsschritt A

Berechnung der Lage 1 der Dehnungsnulllinie unter Annahme eines konstanten Verformungsmoduls über dem Querschnitt mit Ansatz des vollen Steges und der wirksamen Breite des Druckgurtes aus der Bedingung

$$\int \epsilon \cdot dA = 0 \quad ; \quad E_v = \text{const} \quad \{55\}$$

- Rechnungsschritt B

Berechnung der wirksamen Breiten im Steg unter Verwendung der Lage 1 der Dehnungsnulllinie

- Rechnungsschritt C

Berechnung der Lage 2 der Dehnungsnulllinie unter Berücksichtigung der wirksamen Breiten in Gurt und Steg mit der Bedingung {55} .

- Weitere Berechnungsschritte B_i und C_i

Iterative Berechnung der endgültigen Lage der Dehnungsnulllinie entsprechend den Schritten B und C aus der Bedingung

$$\int \varepsilon \cdot E_v \cdot dA = 0 \quad \{56\}$$

- Berechnung des aufnehmbaren Biegemomentes

$$M = \int \varepsilon \cdot E_v \cdot z \cdot dA \quad \{57\}$$

- Überprüfen, daß der vorgegebene Grenzwert der Dehnung im gezogenen Querschnittsteil nicht überschritten wird

3.3.2 Ohne Querkraft aufnehmbares Biegemoment

Bei **kurzzeitiger Beanspruchung** entsprechend der zugrunde gelegten Beschreibung des Werkstoffverhaltens kann mit {50.1 bzw. 50.2} und $C_t = 1$ sowie der Bemessungsdehnung ε_{db} am Druckgurtrand aus dem Trägheitsmoment I_w des wirksamen Querschnitts und dem Abstand e_o des Druckgurtes von der Dehnungsnulllinie bzw. dem Widerstandsmoment W_w des wirksamen Querschnitts das aufnehmbare Biegemoment berechnet werden:

$$M(\varepsilon_{db}) = W_w(\varepsilon_{db}) \cdot \varepsilon_{db} \cdot E_v \quad \{58.1\}$$

$$\text{mit} \quad W_w(\varepsilon_{db}) = \frac{I_w(\varepsilon_{db})}{e_o(\varepsilon_{db})} \quad \{58.2\}$$

Mit {50.1 bzw. 50.2} wird aus {58.1} für $C_t = 1$

$$M(\varepsilon_{db}) = W_w(\varepsilon_{db}) \cdot \left[\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \quad \{59.1\}$$

oder

$$M(\varepsilon_{db}) = W_w(\varepsilon_{db}) \cdot \left[\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \quad \{59.2\}$$

Für den Bruchzustand $\varepsilon_{db} = \varepsilon_B$ gilt

$$M_B = W_w(\varepsilon_B) \cdot \varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R \quad \{60.1\}$$

oder

$$M_B = W_w(\varepsilon_B) \cdot \beta \quad \{60.2\}$$

Bei einer **konstanten Dauerbelastung** wächst die Dehnung am Druckgurtrand von $\varepsilon_d(t_0)$ beim Zeitpunkt $t = t_0$ auf den Wert ε_{db} zum Bemessungszeitpunkt $t = t_b$ an. Der Zuwachs der Dehnung setzt sich zusammen aus dem Kriechen des Werkstoffs entsprechend {48.1 bzw. 48.2} von $\varepsilon(t_0)$ auf $\varepsilon(t_b)$ und dem Dehnungszuwachs ε_i , der sich aus der Abnahme des wirksamen Querschnitts mit zunehmender Randdehnung ε_d ergibt.

Durch Iteration analog Theorie II. Ordnung kann das aufnehmbare Moment bestimmt werden.

Indem man das aufnehmbare Moment mit dem wirksamen Querschnitt bei der Bemessungsdehnung ε_{db} berechnet, ist eine sichere Abschätzung möglich. Hierbei wird vereinfacht angenommen, die Spannungserhöhung durch Abnahme der wirksamen Breite mit der Belastungszeit wäre schon zum Zeitpunkt $t = t_0$ eingetreten.

Aus {58.1} wird mit {50.1 bzw. 50.2}

$$M(\varepsilon_{db}) \geq W_w(\varepsilon_{db}) \left[\varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{62.1\}$$

oder

$$M(\varepsilon_{db}) \geq W_w(\varepsilon_{db}) \left[\beta - a(\varepsilon_B - \varepsilon_{db})^n \right] \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{62.2\}$$

Für den Bruchzustand $\varepsilon_{db} = \varepsilon_B$ gilt

$$M_B(t) \geq W_w(\varepsilon_B) \cdot \varepsilon_B \cdot E_0 \cdot f_R \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{63.1\}$$

oder

$$M_B(t) \geq W_w(\varepsilon_B) \cdot \beta \cdot \frac{1}{C_t} \quad \{63.2\}$$

Wegen der komplexen Beanspruchung im Bruchzustand des gebeulenen Druckgurtes mit mehrachsigen, sich überlagernden Druck-, Zug- und Biegebeanspruchungen sollte das Spannungs-Dehnungsverhalten für Zugbeanspruchung zur Bemessung herangezogen werden.

3.3.3 Durchbiegung

Die Durchbiegung in Feldmitte eines Einfeldträgers kann wie folgt vergleichsweise genau bestimmt werden.

Das maximale Moment (M_F) in Feldmitte ist

$$M_{\max}(\varepsilon) = \frac{I_{w \min}}{e_o} \cdot \varepsilon \cdot E_v(\varepsilon) \quad \{64\}$$

Das Trägheitsmoment in Feldmitte und der Schwerpunktabstand e_o sind wie beschrieben mit der Bemessungsdehnung am Druckgurtrand zu ermitteln, der zugehörige Verformungsmodul mit {52}.

Das Biegemoment, abhängig von der Stützweite z und der Stützweite l_F , ist

$$M(z) = M_{\max}(\varepsilon) \cdot \eta(z) \quad \{65\}$$

mit

$$\eta(z) = \frac{4}{l_F} \cdot z(l_F - z) \quad \{65.1\}$$

Da am Auflager die Beanspruchung des Druckgurtes mit dem Biegemoment verschwindet, die Dehnungen am Druckrand also $\varepsilon = 0$ gesetzt werden können, ist am Auflager das wirksame Trägheitsmoment I_A bekannt und der Verformungsmodul entspricht dem Elastizitätsmodul E_o . Die Stauchung am Druckrand und das Biegemoment hängen direkt voneinander ab, es liegt also nahe, Trägheitsmoment und Verformungsmodul in gleicher Weise zu beschreiben wie das Biegemoment:

$$I_w(z) = I_A - (I_A - I_{w \min}) \cdot \eta(z) \quad \{66\}$$

und

$$E_v(z) = E_o - [E_o - E_v(\varepsilon)] \cdot \eta(z) \quad \{67\}$$

Die rechnerische Durchbiegung in Feldmitte ergibt sich aus nachstehendem Integral

$$f = 2 \cdot \int_0^{\frac{l_F}{2}} \frac{M(z) \cdot \frac{z}{2}}{I_W(z) \cdot E_V(z)} \cdot dz \quad \{68\}$$

3.4 Bemessung

Mit Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten γ_{fi} für die Einwirkungen des Last - Zeit - Kollektivs, γ_{sys} für die Modellbildung zur Erfassung der Schnittkräfte in kritischen Querschnitten und γ_m für die Bemessungsdehnung (bzw. den Rißfaktor f_r) kann ein Bauteil nach vorstehender Bedingung gegen Bruch bemessen werden.

3.5 Schadensakkumulation

Die Untersuchungen zum Werkstoffverhalten waren nach Umfang und Dauer nicht zum Nachweis der aufgestellten Beziehungen geplant. Es sollte lediglich das Werkstoffverhalten des Laminates der untersuchten Bauteile im Vergleich mit den Kennwerten nach DIN 18820 beurteilt werden. Die Gültigkeit der Gleichungen zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens sollten für die technisch üblichen Grenzen der Glasanteile überprüft werden.

Inwieweit der vorgeschlagene Weg der Schadensakkumulation mit einer solchen, die auf Basis der Zeitstandfestigkeitslinie vorgenommen wird, vergleichbar ist und welche Auswirkungen mögliche Abweichungen haben, bleibt zu untersuchen.

Eine analoge Akkumulation dehnungsabhängiger Schädigungsanteile für Mischlaminat sollte untersucht werden. Hierbei ist zu beachten, daß senkrecht zur Verstärkungsrichtung beanspruchte Schichten schon bei Dehnungen von etwa 0,1 % vollständig reißen können. Sicherlich sind die Einflüsse aus Querverformung, Schub - (Hauptzugspannung) und interlaminarer Scherbeanspruchung größer als bei Wirrfaserlaminaten. Als Bemessungsgrenze bietet sich die Bruchdehnung der Glasfasern in den Schichten an, die in Richtung der Hauptzugbeanspruchung angeordnet sind.

Literaturnachweis

- [1] *E. Gaube* und *G. Menges*, Kunststoffe Bd. 58 (1968), S. 135/158
- [2] *G. Menges* und *E. Gaube*, Kunststoffe Bd. 58 (1968), S. 642/648
- [3] *G. Menges* und *E. Gaube*, Mod. Plastics Bd. 46 (1969) H. 11, S. 96/110
- [4] *G. Menges* und *E. Dolfen*, Kunststoffe Bd. 59 (1969), S. 934/941
- [5] *G. Menges*, *H. Roskothen* und *P. Empt*, Kunststoffe Bd. 60 (1970), S. 1009/1014
- [6] *G. Menges* und *H. W. Franken*, Kunststoffe Bd. 62 (1972), S. 309/317
- [7] *Ch. Petersen*, Statik und Stabilität der Baukonstruktionen,
Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden
- [8] *A. Pflüger*, Stabilitätsprobleme der Elastostatik, 2. Auflage, S. 325 ff,
Springer - Verlag, Berlin / Göttingen / Heidelberg / New York 1964
- [9] *Ch. Petersen*, Stahlbau, Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden
- [10] DAST - Richtlinie 016 (Febr. 1992), Bemessung und konstruktive Gestaltung von
Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen, Deutscher Ausschuß für
Stahlbau, Stahlbau - Verlagsgesellschaft mbH, Köln
- [11] *U. Einsfeld*, Theoretische und experimentelle Untersuchungen an
Trapezblech - Profiltafeln unter Biegebeanspruchung Diss. U. Karlsruhe 1971
- [12] *Th. v. Kármán*, Festigkeitsprobleme im Maschinenbau, Enzyklopädie der
mathematischen Wissenschaften IV, 4, Verlag Teubner / Leipzig 1910
- [13] *Th. v. Kármán*, *E. E. Lechler* u. *L. H. Donnel*, The Strength of thin plates in
compression, Trans. ASME 54 (1932), S. 53/57
- [14] *G. Winter*, Stress distribution in an equivalent width of flanges of wide,
thin - walled steel beams, NACA Techn. Note No. 784 (1940)
- [15] *G. Winter*, Strength of thin steel compression flanges, Trans. ASCE 112 (1947),
S. 527/554
- [16] *G. Winter*, Cold formed, light gage steel construction, Proc. ASCE,
Journ. Strukt. Div. 85 (1959), S. 151/173
- [17] *K. W. Warren* u. *G. Winter*, Effects of Cold forming on light gage steel members,
Proc. ASCE, Journ. Strukt. Div. 93 (1967), S. 433/450
- [18] Eurocode 3, Part 1.3, Cold formed Thin Gauge Members and sheeting,
Entwurf, Jan. 1993
- [19] DIN 18820 Laminate aus textildglasverstärkten ungesättigten Polyester - und
Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF - UP, GF - PHA), März 1991
- [20] *H. J. Roskothen*, Untersuchungen zur Dimensionierung von Bauteilen aus
Kunststoffen Diss. TH Aachen 1974

- [21] *E. Dolfen*, Bemessungsgrundlagen für tragende Bauelemente aus glasfaserverstärkten Kunststoffen, insbesondere durch Glasseidenmatten bewehrten Polyesterharzen Diss. TH Aachen 1969
- [22] DIN 18807 , Teil 1 , Trapezprofile im Hochbau, Stahltrapezprofile, Allgemeine Anforderungen, Ermittlung der Tragfähigkeitswerte durch Berechnung, Juni 1987
- [23] *H. W. Franken* , GFK - Silos, Silos aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyesterharzen GF - UP, Silohandbuch, Seiten 342/389 , Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [24] Vorläufige Richtlinien für die Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung, Bemessung und Güteüberwachung von zulassungspflichtigen Bauteilen aus glasfaserverstärktem ungesättigtem Polyesterharz (GF - UP - Richtlinie), Dez. 1983, Institut für Bautechnik, Berlin - unveröffentlicht.
- [25] Bau - und Prüfgrundsätze für oberirdische GF - UP - Behälter und Behälterteile, Dez. 1984 , Schriften des IfBt, Reihe B , Heft 3
- [26] N. N. Musterberechnungen für Kunststoffbehälter zur Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten, März 1986 , Schriften des IfBt, Reihe B , Heft 4
- [27] *U. Einsfeld u. E. Wölfel*, Erläuterungen zu den Richtlinien für die Prüfungen von Standsicherheitsnachweisen für Wasserrutschbahnen aus GFK - Bauteilen, Mitteilungen IfBt 4 / 1986
- [28] *E. Wölfel*, Erläuterungen zu den Vorläufigen Richtlinien für statische Nachweise von Windkraftanlagen, Mitteilungen IfBt 5 / 1988
- [29] *G. Nonhoff*, Ein Beitrag zur Stabilitätsrechnung und Prüfung von Zylinderschalen aus glasfaserverstärktem Kunststoff unter gleichmäßigem Außendruck, Diss. TH Aachen 1972
- [30] *Brintrup*, Beitrag zum zeitabhängigen Verformungsverhalten und zur Rißbildung orthotrop glasfaserverstärkter ungesättigter Polyesterharze unter ebener Normalbeanspruchung, Diss. TH Aachen 1975
- [31] *U. Thebing*, Mechanische Eigenschaften von unidirektional verstärktem GFK bei zyklischer und dynamischer Beanspruchung, Forschungsbericht VB 1 - 72.0 - Nr. 66/75 , 1978 , Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen
- [32] *H. W. Franken u. M. Kurzmeier*, Einfluß des Aushärtegrades auf GFK - Bauteile, Forschungsbericht F 149 , SKZ , Würzburg (1978) , Auftraggeber: IfBt , Berlin
- [33] *A. Puck*, Einführen in das Gestalten und Dimensionieren, Konstruieren und Berechnen von GFK - Teilen, Beiheft Kunststoffberater 1969, S. 44 bis 66, Umschau Verlag, Frankfurt a. M.
- [34] *K. Kannig*, Fünf Jahre Prüfzeichen für GF - UP - Behälter - Aktuelle Fragen beim Nachweis der Standsicherheit, 21. AVK - Tagung 1987

- [35] *L. Franke* u. *H. J. Meyer*, Zur Frage der Schadensakkumulation bei Bauteilen aus GFK, Forschungsbericht 1991, Auftraggeber: IfBt, Berlin
- [36] *A. Palmgren*, Die Lebensdauer von Kugellagern, VDI - Z. 68 (1924), S. 339 / 341
- [37] *M. A. Miner*, Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics 12 (1945), S. A 159 / A 164
- [38] *K. P. Buhmann*, Zum Bestimmen der Schädigungsgrenze von GFK - Laminaten, 10. AVK - Tagung 1972
- [39] *A. Puck*, Zur Beanspruchung und Verformung mehrschichtiger Verbundstoff - Bauelemente aus Glasseidensträngen und Kunststoffen, Diss. TU Berlin 1966
- [40] *A. Puck*, Zur Berechnung und Verformung von GFK - Mehrschichten - Bauelementen, Kunststoffe Bd. 57 (1967), S. 284 / 293, S. 573 / 582, S. 965 / 973
- [41] *A. Puck*, Das "Knie" im Spannungs - Dehnungs - Diagramm und Rißbildung bei GFK, Kunststoffe Bd. 58 (1968), S. 886 / 893
- [42] *G. Menges* u. *H. Bintrup*, "Rißgrenzen" an unidirektionalen GFK - Wickellaminaten unter ein - und mehrachsiger Beanspruchung, Kunststoffe 62 (1972), S. 869 / 875
- [43] *K. Demmler*, *K. Bergmann* u. *E. Schuch*, Neue Einsichten in die Struktur von UP - Harz - Formstoffen, 10. AVK - Tagung 1972
- [44] *H. W. Franken*, Zusammenhänge zwischen Aushärtung und Dimensionierungsgrößen von GF - UP - Bauteilen, plasticonstruction, 7. Jahrgang 1977, S. 113 / 118
- [45] *W. Woebcken* u. *H. W. Franken*, Möglichkeiten zur Beurteilung des Vernetzungsgrades von kalthärtenden Polyesterharzen im Hinblick auf das Langzeitverhalten unter statischer Belastung, Progress in Colloid and Polymer Science, Vol. 64 (1978), S. 43 / 48
- [46] *H. W. Franken*, Der unterschiedliche Einfluß des Aushärtegrades auf das Zeitstandbruch - und auf das Zeitstandkriechverhalten von glasfaserverstärkten ungesättigten Polyesterharzen, 14. AVK - Tagung 1977
- [47] *H. G. Scheerer* u. *G. W. Ehrenstein*, Versagensverhalten von GF - UP bei ebener Beanspruchung, Symposium über faserverstärkte Kunststoffe, IKV, Aachen 1975
- [48] *O. Schwarz*, Beitrag zum statischen Langzeitverhalten glasfaserverstärkter Kunststoffe, Diss. TH Aachen 1969
- [49] *B. Knauer*, Charakteristische Minima im Festigkeitsverhalten von Polymerverbunden, 15. AVK - Tagung 1978

- [50] *G. Menges u. B. Meffert*, Der Einfluß der Deformationsgeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten verstärkter UP - Harze, 14. AVK - Tagung 1977
- [51] *W. Knappe u. W. Schneider*, Bruchkriterien für unidirektionalen Glasfaser / Kunststoff unter ebener Kurzzeit - und Langzeitbeanspruchung, 10. AVK - Tagung 1977
- [52] *G. Menges u. J. Opfermann*, Restfestigkeiten bei mattenverstärkten GFK, 13. AVK - Tagung 1976
- [53] Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen - und Zulassungsverfahren, Institut für Bautechnik, Berlin 1986
- [54] *K. A. F. Schmidt*, Textilglas für die Kunststoffverstärkung, Zechner & Hüthig Verlag GmbH, Speyer 1972
- [55] *H. Domke u. A. Rübber*, Kunststoffbau, Bemessung, Konstruktion, Langzeitverhalten, Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1981
- [56] *W. Królikowski u. Z. Czech*, Abhängigkeiten zwischen der Oberflächenvorbereitung der Glasgewebe, ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften, sowie den mechanischen Eigenschaften der verstärkten Polyester, 15. AVK - Tagung 1978
- [57] *G. Menges u. U. Bieling*, Verformungsverhalten und Festigkeit von ein - und mehrachsigen beanspruchten GF - UP - Mattenlaminaten, 18. AVK - Tagung 1982
- [58] *G. Giencke u. G. Meder*, Sind zweiachsige Kriechversuche an Laminaten notwendig?, 15. AVK - Tagung 1978
- [59] *E. Alf*, Untersuchungen zum Verhalten ausgewählter Kunststoffe unter schwingender Beanspruchung, Diss. , TH Aachen 1972
- [60] *F. Orth u. G. W. Ehrenstein*, Kunststoffe 79 (1989) , S. 727 / 731
- [61] *W. Janzen u. G. W. Ehrenstein*, Bemessungsgrenzen von glasfaserverstärkten PBT bei schwingender Beanspruchung, Kunststoffe 81 (1991) , S. 231 / 236
- [62] *H. Huth*, Vorgehensweisen beim Betriebsfestigkeitsnachweis für Faserverbundbauteile, 25. AVK - Tagung 1993
- [63] *H. - J. Meyer*, Zur Bemessung von GFK - Bauteilen unter Zuhilfenahme der, Linear - Elastischen Bruchmechanik und probabilistischer Versagenskriterien, Diss. TH Hamburg - Harburg 1992
- [64] *L. Franke, E. Overbeck, H. J. Meyer*, Vorhersage der Zugfestigkeit von GFK - Stäben, Bautechnik 67 (1990), S. 341 / 345
- [65] *L. Franke, E. Overbeck, H. J. Meyer*, Vorhersage der Zeitstandfestigkeit von GFK - Stäben, Bautechnik 68 (1991) , S. 21 / 24

- [66] DIN 18807 , Teil 2 , Reaktionsharzformstoffe, Gießharzformstoffe, Typen, März 1989
- [67] DIN EN 60 , Glasfaserverstärkte Kunststoffe; Bestimmung des Glühverlustes
- [68] DIN EN 61 , Glasfaserverstärkte Kunststoffe, Zugversuch
- [69] DIN 18807 , Teil 2 , Trapezprofile im Hochbau, Stahltrapezprofile, Durchführung und Auswertung von Tragfähigkeitsversuchen