

# Holzbauteile aus kernfreiem Laubholz

## Schlussbericht

**Projektnummer: 2007.15**

Mitfinanzierung: Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung WHFF

Projektpartner: Hedinger AG, Sägewerk – Holzhandlung, 8217 Wilchingen



M. Bertocchi, A. Frangi, M. Fontana  
ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion  
Bericht Nr. Fo-2009-01

29. April 2009

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Kurzbeschreibung des Projektes .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>4</b>
2.1 Einleitung .....	4
2.2 Versuchsprogramm und Versuchsmaterial.....	4
2.3 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung.....	7
2.3.1 Vierpunkt-Biegeversuche .....	7
2.3.2 Knickversuche .....	9
2.4 Versuchsresultate .....	10
2.4.1 Biege-E-Modul .....	10
2.4.2 Bruchlasten für die Biegeversuche .....	13
2.4.3 Bruchlasten für die Knickversuche .....	14
2.5 Auswertung der Versuchsresultate .....	17
2.5.1 Biegeversuche.....	17
2.5.2 Knickversuche .....	21
<b>3. Bemessung von Holzbauteilen aus Eichenholz .....</b>	<b>22</b>
3.1 Bemessungsgrundlagen .....	22
3.1.1 Tragsicherheitsnachweis.....	22
3.1.2 Bemessung von Biegeträgern .....	23
3.1.3 Bemessung von Druckgliedern.....	23
3.2 Vorbemessungsdiagramme .....	25
3.2.1 Biegeträger .....	25
3.2.2 Druckglieder .....	27
<b>4. Zusammenfassung.....</b>	<b>28</b>
<b>5. Literatur.....</b>	<b>28</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>29</b>

## 1. Kurzbeschreibung des Projektes

Kernfreie Balken aus Laubholz stellen ein technisch und wirtschaftlich interessantes Produkt für tragende und nicht tragende Holzbauteile dar. Die wesentlichen Vorteile von kernfreien Balken sind die schnellere Trocknungszeit, die Reduktion der Schwindrisse und damit die bessere Dauerhaftigkeit der Holzelemente. Aus der Kernbohrung ergeben sich neue interessante und leistungsfähige Lösungen für Verbundelemente (z.B. in Kombination mit Zugstangen oder Spanngliedern aus Stahl).

Aus verschiedenen Gründen ist es indessen nicht gelungen, das Produkt „Kernfreie Holzbalken“ fertig zu entwickeln und in grossem Stil einzusetzen. Die Firma Hedinger AG in Wilchingen sieht in diesem Produkt aber ein Zukunftspotential insbesondere für Laubhölzer. Durch eine Zusammenarbeit mit der Firma Bührer in Bibern verfügt sie über die Produktionsmaschinen für die Erstellung von kernfreien Holzbalken mit Kernbohrungen bis zu einer Länge von 6 m. Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung und Einführung von wirtschaftlichen und zuverlässigen kernfreien Holzbauteilen aus Laub- und eventuell Nadelholz. Insbesondere sollen Rohmaterialien aus wenig attraktiven Laubholzsortimenten verarbeitet und aufgewertet werden.

Durch die Unterstützung des Förderprogramms „holz 21“ des BAFU wurden in einer ersten abgeschlossenen Phase auf Basis einer umfassenden Marktanalyse mögliche Sortimente und Anwendungen für kernfreies Laubholz im Detail analysiert. Durch die Unterstützung des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung werden in der zweiten Phase Grundlagenversuche an der ETH durchgeführt. Die Resultate der Versuche dienen der experimentell abgesicherten Bestimmung der Bemessungswerte von kernfreien Balken aus Laubholz und der Erstellung von Fachinformationen und Bemessungstools (Bemessungsgrundlagen, Bemessungstabellen), die den Markteintritt unterstützen sollen.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

### 2.1 Einleitung

Die experimentellen Untersuchungen wurden in der Bauhalle des Institutes für Baustatik und Konstruktion an der ETH Zürich (Hönggerberg) durchgeführt. Zielsetzung der durchgeführten Versuche war die Untersuchung des Tragverhaltens von kernfreien Holzbalken unter Biege- bzw. Druckbeanspruchung sowie die Bestimmung der für die Bemessung wichtigen Materialeigenschaften (Elastizitätsmodul, Biege- und Knickwiderstand).

### 2.2 Versuchsprogramm und Versuchsmaterial

Insgesamt wurden zwei Serien von Biegeversuchen (Februar bis April 2008 und Dezember 2008 bis Januar 2009) und eine Serie von Druckversuchen (Januar bis Februar 2009). Die experimentellen Untersuchungen erfolgten mit Holzbalken in baupraktischer Grösse vorwiegend aus Eiche, die vom Sägewerk Hedinger AG zur Verfügung gestellt wurden (vgl. Bild 1 links). Viele untersuchte Holzbalken wiesen deutliche Strukturfehler wie Äste, Schrägfaserigkeit, Längsrisse, Längskrümmung und Verdrehung auf (vgl. z.B. Bild 4 rechts). Für die Biegeversuche wurden ausschliesslich kernfreie Holzbalken verwendet. Die Druckversuche (Knickversuche) wurden mit kernfreien Holzbalken sowie Vollholzbalken ohne Kernbohrung durchgeführt. Für alle kernfreien Holzbalken betrug der Durchmesser der Kernbohrung 50 mm.

Die Holzfeuchte der Holzbalken wurde systematisch in drei Punkten entlang der Trägerlänge mit dem elektrischen Widerstandsmessgerät H-DI-3.10 der Firma Krüger gemessen (vgl. Bild rechts). Die aus den drei Messungen gemittelte Holzfeuchte lag zwischen 9 und 17%. Die Rohdichte wurde aus dem Gewicht und den Abmessungen der Holzbalken berechnet und lag zwischen 552 und 762kg/m<sup>3</sup>. Tabelle 1 und 2 fassen die Geometrie, die Holzart, die gemessenen Materialeigenschaften (Holzfeuchte und Rohdichte) und die wesentlichen beobachteten Merkmale der Probekörper zusammen.

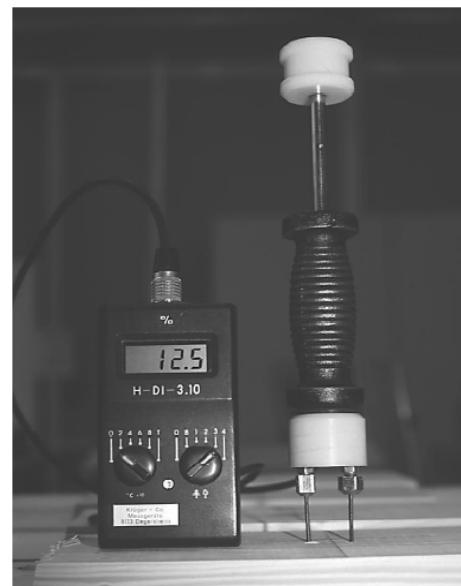


Bild 1 – Links: kernfreie Holzbalken; Rechts: Elektrisches Widerstandsmessergerät H-DI3.10

Tabelle 1 – Geometrie, Holzart und Materialeigenschaften der Probekörper für die Biegeversuche

Balken-Nr.	Prüfdatum	Holzart	Abmessungen b x h [mm]	Vorsp.	Feuchtigkeit [%]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Bemerkungen
<b>Serie 1</b>								
B01	22/02/08	Eiche	220 x 220	Nein	14	162	676	Längsrisse oben, tief 6-8cm
B02	22/02/08	Eiche	220 x 220	Nein	14	146	639	Längsrisse seitlich, tief 4cm
B03	28/02/08	Eiche	220 x 220	Ja	14	162	670	Längsriss 4cm tief, seitlich viele Äste
B04	27/03/08	Eiche	220 x 220	Nein	11	174	720	-
B05	01/04/08	Eiche	220 x 220	Ja	11	160	661	-
<b>Serie 2</b>								
B06	10/12/08	Föhre	220 x 220	Nein	8	132	645	Längsrisse Zugseite, 2-4cm tief. Träger längs stark verdreht
B07	10/12/08	Esche	220 x 220	Nein	10	156	683	2 x seitliche Längsrisse, vom Auflager bis Feldmitte, 5cm tief
B08	15/12/08	Buche	215 x 215	Nein	9	158	684	Längsrisse seitlich und bei der Zugseite bis 7cm tief. Längsverdr.
B09	15/12/08	Eiche	215 x 215	Ja	11	176	761	Leicht längsverdr., kleine Längsrisse
B10	17/12/08	Eiche	220 x 220	Ja	12	184	762	Leicht längsverdr., kleine Längsrisse
B11	16/12/08	Eiche	215 x 215	Ja	10	164	703	Leicht längsverdr., kleine Längsrisse
B12	12/01/09	Eiche	160 x 160	Nein	10	94	714	Leicht längsverdr., kleine Längsrisse
B13	13/01/09	Eiche	160 x 160	Ja	13	86	707	Leicht längsverdr., kleine Längsrisse
B14	13/01/09	Eiche	160 x 160	Nein	11	86	709	Leicht längsverdr., kleine Längsrisse
B15	14/01/09	Eiche	160 x 160	Nein	11	82	749	Leicht längsverdr., kleine Längsrisse

Tabelle 2 – Geometrie, Holzart und Materialeigenschaften der Probekörper für die Knickversuche

Stütze-Nr.	Prüfdatum	Holzart	Abmessungen <b>b x h [mm]</b>	Kernb.	Feuchtigkeit [%]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
K01	04/02/09	Eiche	120 x 140	Ja	15	31.2	664
K02	04/02/09	Eiche	120 x 140	Nein	15	32.4	688
K03	04/02/09	Eiche	120 x 140	Nein	16	32.8	697
K04	05/02/09	Eiche	120 x 140	Ja	14	26.7	569
K05	05/02/09	Eiche	120 x 140	Nein	12	27.5	584
K06	05/02/09	Eiche	120 x 140	Nein	17	32.1	682
K07	05/02/09	Eiche	120 x 140	Ja	15	32.0	680
K08	05/02/09	Eiche	120 x 140	Nein	16	22.4	682
K09	05/02/09	Eiche	120 x 140	Ja	14	18.8	574
K10	05/02/09	Eiche	120 x 140	Ja	14	18.3	558
K11	06/02/09	Eiche	120 x 140	Ja	16	21.9	669
K12	06/02/09	Eiche	120 x 140	Ja	14	21.2	648
K13	06/02/09	Eiche	120 x 140	Nein	16	23.0	700
K14	06/02/09	Eiche	120 x 140	Nein	13	18.1	552
K15	06/02/09	Eiche	120 x 140	NEin	13	22.0	671

## 2.3 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung

### 2.3.1 Vierpunkt-Biegeversuche

Die Biegeversuche wurden als Vierpunkt-Biegeversuche gemäss der Norm EN 408 [1] durchgeführt. Die Probekörper wurden als einfache Balken gelagert und in etwa in den Drittelpunkten belastet. Auf einer Seite wurde ein festes Lager (Kipplager), auf der anderen Seite ein bewegliches Lager (Rollenlager) verwendet. Die Spannweite zwischen den Auflagern betrug 4.7 m für alle Versuche ausser für die Versuche B13, B14 und B15, bei denen die Spannweite 4.5 m betrug. Der Abstand zwischen den Pressen betrug 1.5 m. Bild 2a zeigt das statische System sowie die Lage der Pressen und Weggeber für die Biegeversuche.

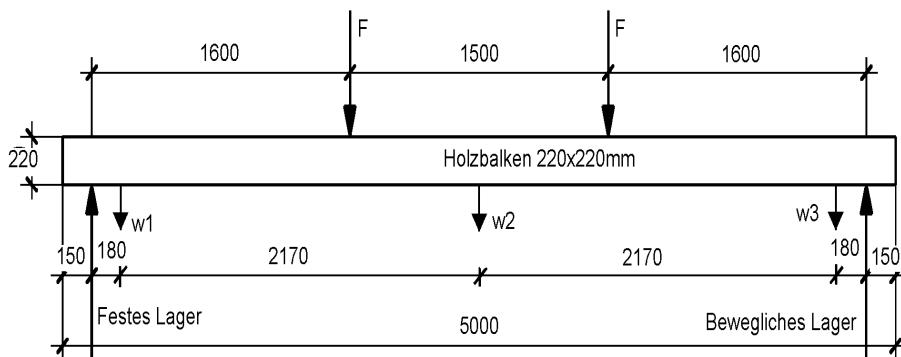


Bild 2a – Statisches System sowie Lage der Pressen F und Weggeber w für die Biegeversuche

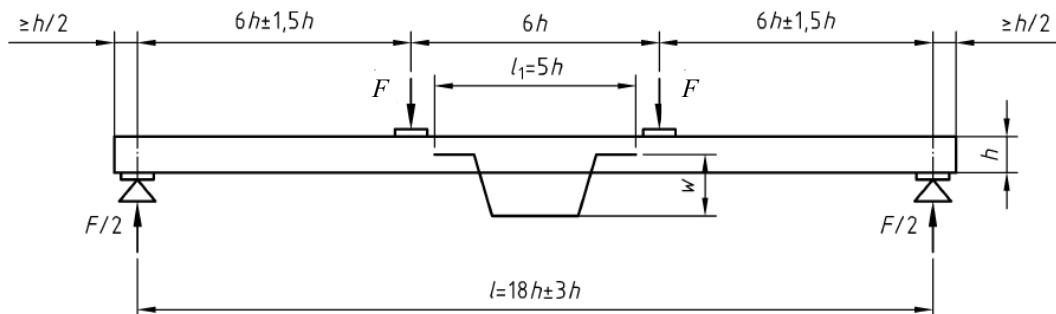


Bild 2b – Prüfanordnung zur Messung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls gemäss der Norm EN 408

Für die Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls wurde gemäss der Norm EN 408 die relative Durchbiegung im Bereich des maximalen konstanten Biegemomentes zwischen den Einzellasten gemessen; die Messlänge  $l_1$  betrug 1000 mm (vgl. Bild 2b). Da in diesem Bereich die Querkraft Null ist, entfällt der Einfluss der Schubverformungen. Die Weggeber wurden auf beiden Seiten der Probekörper auf der Höhe der Probenachse angeordnet (vgl. Bild 3). Der Mittelwert zwischen beiden gemessenen relativen Durchbiegungen wurde für die Berechnung des statischen Biege-Elastizitätsmoduls verwendet. Tabelle 3 zeigt die Bezeichnung und die Genauigkeit der im Versuch verwendeten Messinstrumente.

Tabelle 3 – Bezeichnung und Genauigkeit der Messinstrumente

Messgrösse	Bezeichnung	Messinstrument	Max. Wert	Bezogene Genauigkeit	Absolute Genauigkeit
Last	F	Druckaufnehmer	90 kN	± 0.22%	± 0.2 kN
Durchbiegung	w	Weggeber	100 mm	± 0.22%	± 0.22 mm



Bild 3 – Links: Versuch- und Messeinrichtung für die Bestimmung des Biege- Elastizitätsmoduls. Rechts: Detail

Die Höchstlast für die Bestimmung des Biege-E-Moduls wurde so bestimmt, dass die Randfaser-Biegespannungen ca.  $12 \text{ N/mm}^2$  betrugen. Dies führte zu einer maximalen Last von ca. 10 bis 12 kN pro Presse. Die Biegeversuche wurden kraftgesteuert durchgeführt und dauerten ca. 3 bis 5 Minuten. Die Kraftzunahme betrug ca. 12 kN/min.



Bild 4 – Details der Auflagerbereiche für die Holzbalken: Kipplager (links) und Rollenlager (rechts)

Die Holzbalken B03, B05, B09, B10, B11 und B13 wurden mit Vorspannung getestet. Als Vorspannglied wurden Dywidag-Gewindestangen mit Nenndurchmesser von 36 mm verwendet (vgl. Bild ). Die Gewindestange wurde sukzessiv mit einer hydraulischen Presse auf ca. 20 bzw. 40% der erwarteten Bruchlast vorgespannt. Die Vorspannkraft betrug ca. 250 bzw. 500kN für die 220x220mm grossen Holzbalken und ca. 125 bzw. 200kN für die 160x160mm grossen Holzbalken. Dies entspricht einer Druckspannung im Holzquerschnitt von ca. 5 bzw.  $10 \text{ N/mm}^2$ . Der statische Biege-E-Modul wurde vor der Vorspannung sowie nach jedem Spannenpressen gemessen.

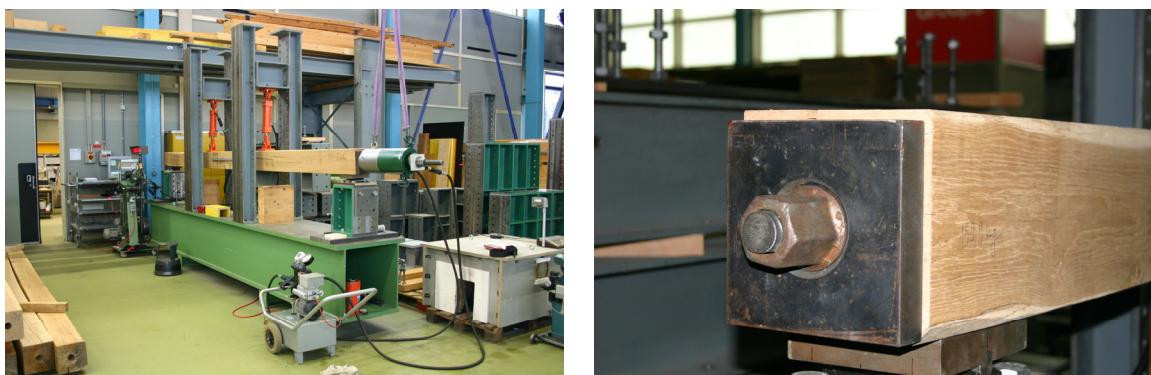


Bild 5 – Mit Dywidag-Gewindestangen ( $\varnothing = 36 \text{ mm}$ ) vorgespannter Holzträger B05

### 2.3.2 Knickversuche

Die Knickversuche wurden auf der grossen Schenk-Universalprüfmaschine in der Bauhalle des Institutes für Baustatik und Konstruktion an der ETH Zürich durchgeführt. Die Holzstützen wurden zentrisch belastet. Sie wurden sowohl am unteren als auch am oberen Rand gelenkig gelagert (Kipplager senkrecht zur schwachen Achse) (vgl. Bild 6), um zum Ausknicken um die schwache Achse zu führen. Die Knickversuche wurden weggesteuert durchgeführt. Die Geschwindigkeit der Verformungszunahme betrug ca. 0.01mm/s, so dass jeder Versuch ca. 6 Minuten dauerte.



Bild 6 – Gelenkige Auflagerung der Stütze unten (links) bzw. oben (rechts)

Kernfreie Holzstützen sowie „normale“ Vollholzstützen ohne Kernbohrung wurden getestet. Die Holzstützen wiesen zwei unterschiedliche Höhen auf, und zwar 1.95m und 2.8m. Die Versuchseinrichtung für die Knickversuche ist in Bild 7 sichtbar. Für den Fall eines spröden Versagens der Holzstützen wurde eine spezielle Schutzhülle rund um die Stütze montiert. Die Kraft sowie die vertikale Verschiebung (Maschinenweg) wurden gemessen.

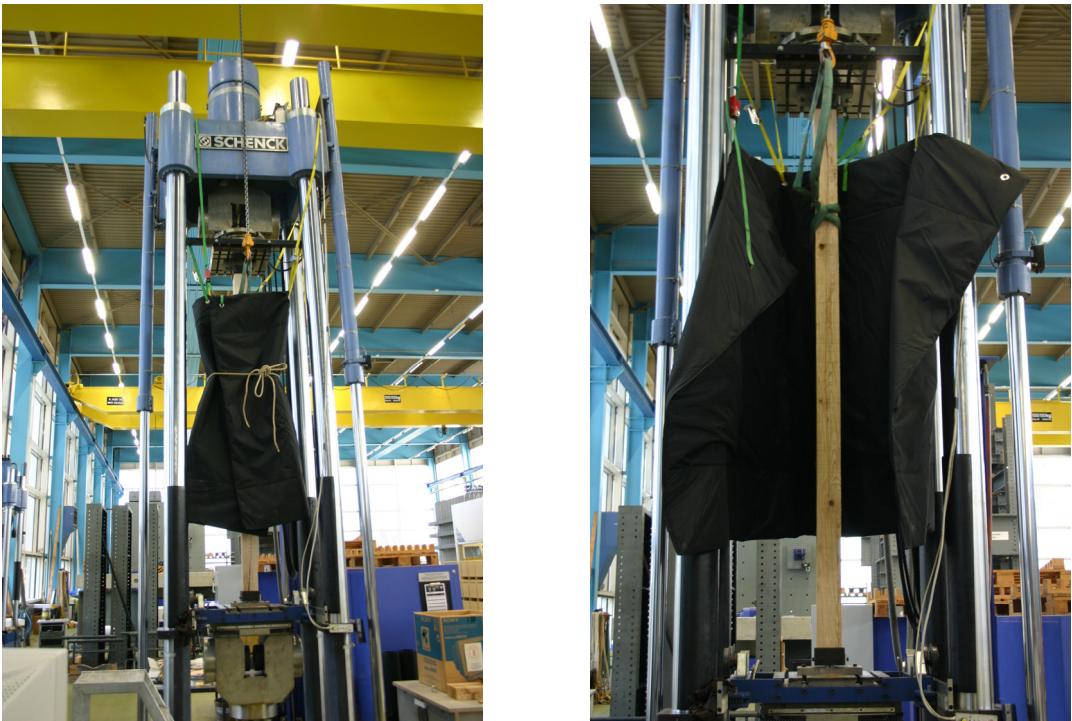


Bild 7 – Versuchseinrichtung. Links: Holzstütze mit Schutzhülle, rechts: Holzstütze ohne Schutzhülle

## 2.4 Versuchsresultate

### 2.4.1 Biege-E-Modul

Der lokale Biege-E-Modul wurde gemäss der Norm EN 408 bestimmt und kann nach folgender Gleichung berechnet werden (vgl. Bild 2b):

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{8 \cdot I_y \cdot (w_2 - w_1)} \quad (1)$$

Die Differenz  $(F_2 - F_1)$  entspricht der Laststeigerung im Bereich der Regressionsgerade und die Differenz  $(w_2 - w_1)$  der dazugehörigen Durchbiegungszunahme. Das Verhältnis  $(F_2 - F_1)/(w_2 - w_1)$  entspricht somit der Steigung der linearen Regressionsgerade, die mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet wurde. Gemäss der Norm EN 408 muss der Korrelationskoeffizient  $R^2$  der linearen Regressionsgerade höher als 0.99 sein.

Die Resultate des gemessenen Biege-E-Moduls für alle Holzbalken sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Der Biege-E-Modul wurde aus dem Mittelwert der zwei durchgeföhrten Belastungskurven berechnet. Die berechneten Korrelationskoeffizienten  $R^2$  der linearen Regressionsgerade waren grösser als 0.99. Der Biege-E-Modul wurde auch nach jedem Vorspannen der Holzbalken gemessen. Bild 8 zeigt die Kraft-Verformungsdiagramme der 5 vorgespannten Holzbalken. Aus dem Bild und der Tabelle 4 erkennt man, dass die zentrische Vorspannung keinen grossen Einfluss auf der Biegsteifigkeit der Holzbalken hatte. Die gemessene Biegsteifigkeit blieb nahezu unverändert oder nahm leicht zu (die Zunahme betrug max. 5%).

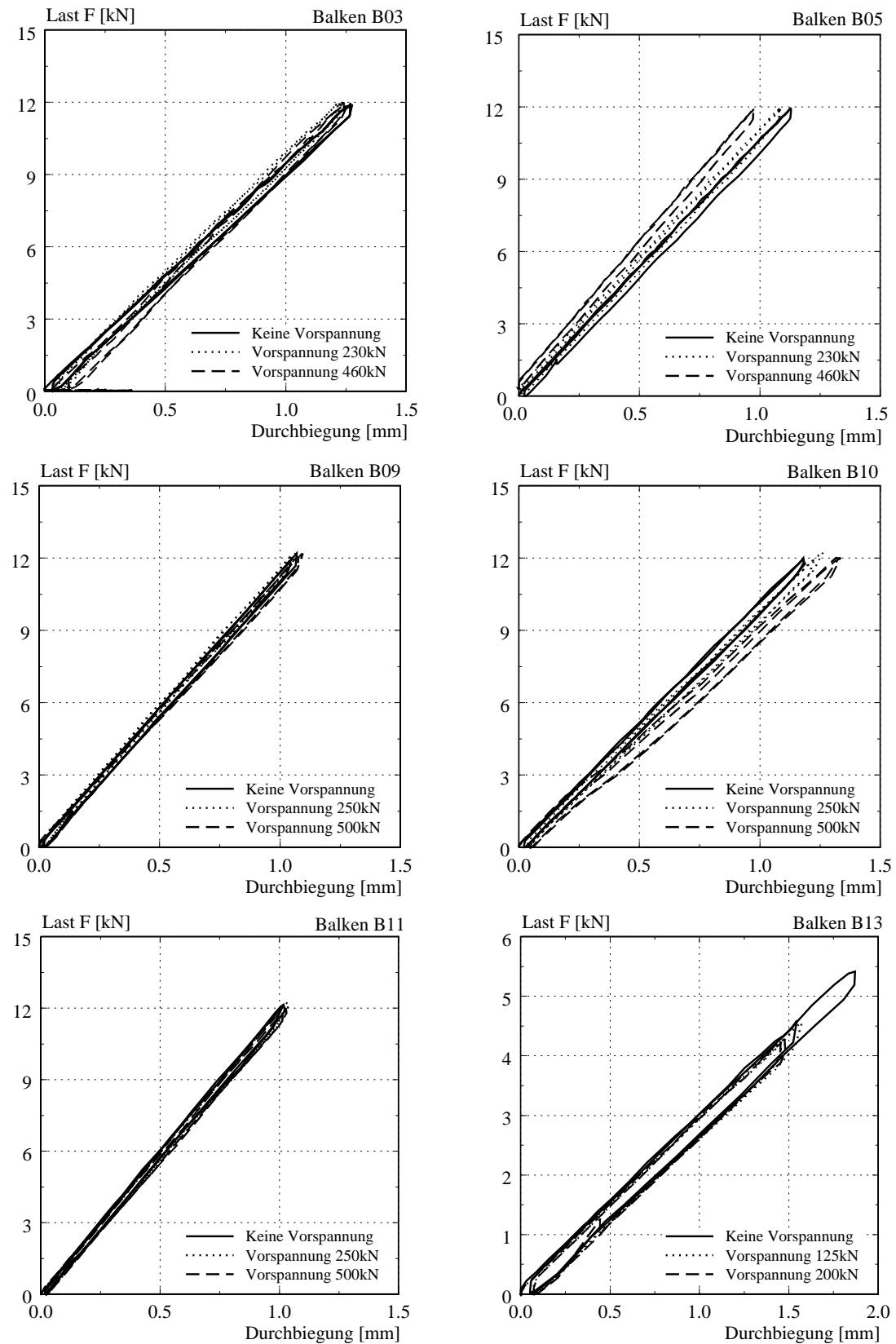


Bild 8 – Kraft-Verformungsdiagramme für die Bestimmung des Biege-E-Moduls für die vorgespannten kernfreien Holzbalken (die relative Durchbiegung gemäss Bild 2b ist dargestellt)

Tabelle 4 – Übersicht der Resultate für die durchgeführte Biegeversuche (Biege-E-Modul)

Balken	Holzart	Vorspannung		Abmessungen		Regressionsgerade		E <sub>m,l</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
		bar	kN	h [mm]	b [mm]	Steig. [N/mm]	R <sup>2</sup> >	
B01	Eiche	0	0	220	220	23'979	0.999	12'284
B02	Eiche	0	0	220	220	22'982	0.999	11'773
B03	Eiche Vorsp.	0	0	220	220	18'913	0.999	9'689
		173	230	220	220	19'870	0.999	10'179
		346	460	220	220	19'759	0.999	10'122
B04	Eiche	0	0	220	220	26'786	0.999	13'722
B05	Eiche Vorsp.	0	0	220	220	21'286	0.999	10'904
		173	230	220	220	22'259	0.999	11'403
		346	460	220	220	21'869	0.999	11'203
B06	Föhre	0	0	220	220	24'956	0.997	12'784
B07	Esche	0	0	220	220	22'818	0.999	11'689
B08	Buche	0	0	215	215	19'996	0.999	11'230
B09	Eiche Vorsp.	0	0	215	215	22'887	0.999	12'853
		188	250	215	215	23'266	0.999	13'066
		376	500	215	215	22'497	0.999	12'634
B10	Eiche	0	0	220	220	20'406	0.999	10'453
		188	250	220	220	19'547	0.999	10'013
		376	500	220	220	18'082	0.999	9'263
B11	Eiche Vorsp.	0	0	215	215	23'974	0.999	13'464
		188	250	215	215	23'782	0.999	13'356
		376	500	215	215	23'510	0.999	13'204
B12	Eiche	0	0	160	160	7'310	0.999	13'385
B13	Eiche Vorsp.	0	0	160	160	5'976	0.998	10'258
		94	125	160	160	5'845	0.999	10'034
		160	200	160	160	5'873	0.999	10'082
B14	Eiche	0	0	160	160	6'060	0.996	10'403
B15	Eiche	0	0	160	160	6'326	0.997	10'859

## 2.4.2 Bruchlasten für die Biegeversuche

Nach der Messung des Biege-E-Moduls wurden die Holzbalken bis zum Bruch belastet. Alle Holzbalken versagten infolge Biegezugbruchs. In der Regel wurde das Versagen durch vorhandene Äste und Schrägfärsigkeit ausgelöst (vgl. Bild 9 links). Der Biegezugbruch kündigte sich in der Regel durch Risse, Holzknarren und lokales Holzversagen an. Bei den vorgespannten Trägern konnten teilweise lokale Druckfalten in der Druckzone der Holzbalken beobachtet werden (vgl. Bild 9 rechts).



Bild 9 – Links: typischer Biegezugbruch (Träger B02); Rechts: lokale Druckfalten auf der Druckzone des Holzbalkens (vorgespannter Träger B05)

Tabelle 5 – Übersicht der Resultate für die durchgeführten Biegeversuche

Balken	Abmessungen bxh [mm]	Holzart	Vorspannung [kN]	Bruchlast [kN]	Bruchspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchart
B01	220x220	Eiche	-	54.9	50	Biegezugbruch
B02	220x220	Eiche	-	63.7	53.9	Biegezugbruch
B03	220x220	Eiche	460	47.6	42.9	Biegezugbruch
B04	220x220	Eiche	-	51.2	46.2	Biegezugbruch
B05	220x220	Eiche	460	49.8	44.9	Biegezugbruch
B06	220x220	Föhre	-	48	43.3	Biegezugbruch
B07	220x220	Esche	-	47	42.4	Biegezugbruch
B08	215x215	Buche	-	45.5	45	Biegezugbruch
B09	215x215	Eiche	500	47.1	45.5	Biegezugbruch
B10	220x220	Eiche	500	52	46.7	Biegezugbruch
B11	215x215	Eiche	500	51.8	50	Biegezugbruch
B12	160x160	Eiche	-	22	51.6	Biegezugbruch
B13	160x160	Eiche	200	15.6	34.3	Biegezugbruch
B14	160x160	Eiche	-	13.1	28.8	Biegezugbruch
B15	160x160	Eiche	-	14.9	32.7	Biegezugbruch

Im Anhang sind Kraft-Verformungsdiagramme aller durchgeführten Biegeversuche (Bruchversuche) dargestellt sowie Bilder der Bruchzustände. Alle Holzbalken wiesen ein linear-elastisch Materialverhalten bis zum spröden Bruch auf. Tabelle 5 gibt die gemessenen Bruchlasten und die dazugehörigen berechneten Bruchspannungen aller durchgeführten Biegeversuche. Die Bruchspannung wurde nach Gleichung 2 berechnet, wobei das Trägheitsmoment I bzw. das Widerstandsmoment W mit dem vollen Querschnitt berechnet wurde, da der Einfluss der Kernbohrung auf das Trägheitsmoment und Widerstandsmoment rechnerisch gering ist und vernachlässigt werden kann (vgl. Tabelle 6 und 7).

$$\sigma_{\text{Bruch}} = \frac{M}{I_{\text{Brutto}}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{M}{W_{\text{Brutto}}} \quad \text{mit} \quad I_{\text{brutto}} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{bzw.} \quad W_{\text{brutto}} = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (2)$$

Tabelle 6 – Trägheitsmoment unter Berücksichtigung des vollen Querschnittes und des infolge der Kernbohrung reduzierten Querschnittes

QS-Breite b [mm]	QS-Höhe h [mm]	Durchmesser Bohrung d [mm]	$I_{\text{Brutto}} [\text{mm}^4]$	$I_{\text{Loch}} [\text{mm}^4]$	$I_{\text{Netto}} [\text{mm}^4]$	$I_{\text{Loch}}/I_{\text{Netto}} [\%]$
160	160	50	$5.46 \times 10^7$	$3.07 \times 10^5$	$5.43 \times 10^7$	0.56
220	220	50	$1.95 \times 10^8$	$3.07 \times 10^5$	$1.95 \times 10^8$	0.16

Tabelle 7 – Widerstandsmoment unter Berücksichtigung des vollen Querschnittes und des infolge der Kernbohrung reduzierten Querschnittes

QS-Breite b [mm]	QS-Höhe h [mm]	Durchmesser Bohrung d [mm]	$W_{\text{Brutto}} [\text{mm}^3]$	$W_{\text{Netto}} [\text{mm}^4]$	$W_{\text{Netto}}/W_{\text{Brutto}} [-]$
160	160	50	$0.682 \times 10^6$	$0.678 \times 10^6$	0.99
220	220	50	$1.772 \times 10^6$	$1.770 \times 10^6$	0.99

Aus Tabelle 5 erkennt man, dass die zentrische Vorspannung keinen Einfluss auf den Biegewiderstand der Holzbalken hatte. Die gemessenen Bruchspannungen variierten zwischen  $29\text{N/mm}^2$  (Träger B14) und  $54\text{N/mm}^2$  (Träger B02), wobei die kleinsten Bruchspannungen bei den Holzbalken mit den Abmessungen von  $160 \times 160\text{mm}$  gemessen wurden. Visuelle Beobachtungen zeigten, dass die Holzbalken mit den gemessenen kleinsten Bruchspannungen besonders ausgeprägte Strukturfehler aufwiesen (vgl. Bilder 34 bis 36 im Anhang). Bei den durchgeführten Biegeversuchen betrug die Fläche der Kernbohrung in Bezug auf den vollen Querschnitt ca. 4% für die  $220 \times 220\text{mm}$  grossen Querschnitte bzw. ca. 8% für die  $160 \times 160\text{mm}$  grossen Querschnitte. Gemäss [2] ist der Einfluss der Kernbohrung auf den Biegewiderstand vernachlässigbar, sofern die Fläche der Kernbohrung nicht grösser als 20% des vollen Querschnittes ist, da der Einfluss der Kernbohrung auf das Widerstandsmoment rechnerisch gering ist (kleiner als 5%).

#### 2.4.3 Bruchlasten für die Knickversuche

Bilder 11 und 12 zeigen die Kraft-Verformungsdiagramme aller durchgeführten Knickversuche. Alle Holzstützen wiesen im Wesentlichen ein linear-elastisch Materialverhalten bis zum seitlichen Ausknicken der Holzstützen um die schwache Achse auf (vgl. Bild 10). Da die Knickversuche weggesteuert durchgeführt wurden, konnte ein unkontrolliertes sprödes Versagen vermieden werden.



Bild 10 – Seitliches Ausknicken der Holzstützen K10 (links) und K14 (rechts) mit der Knicklänge von 1.95m

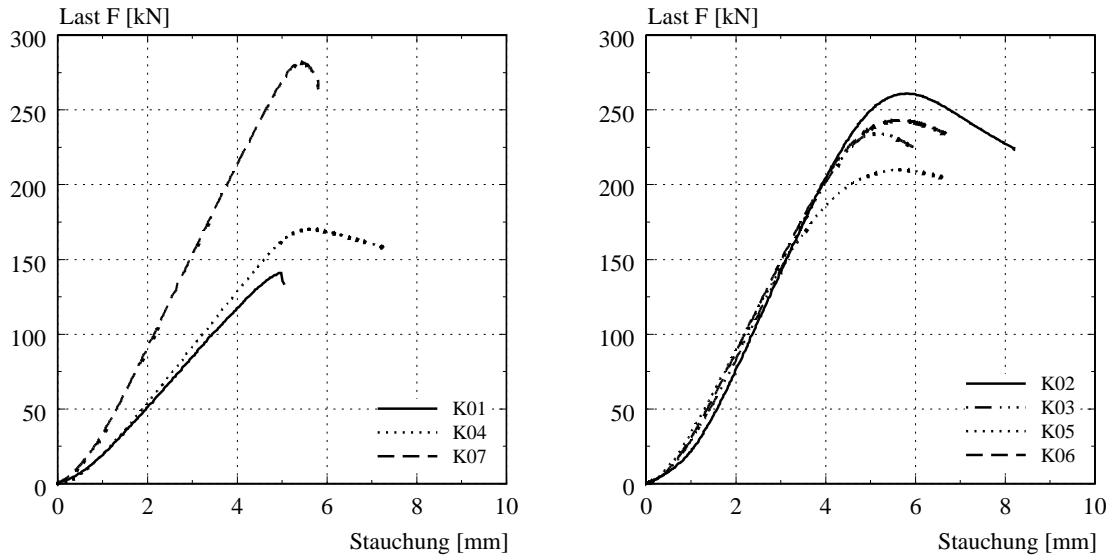


Bild 11 – Kraft-Verformungsdiagramme der Knickversuche,  $L_k=2'800\text{mm}$   
Links: mit Kernbohrung; rechts: ohne Kernbohrung

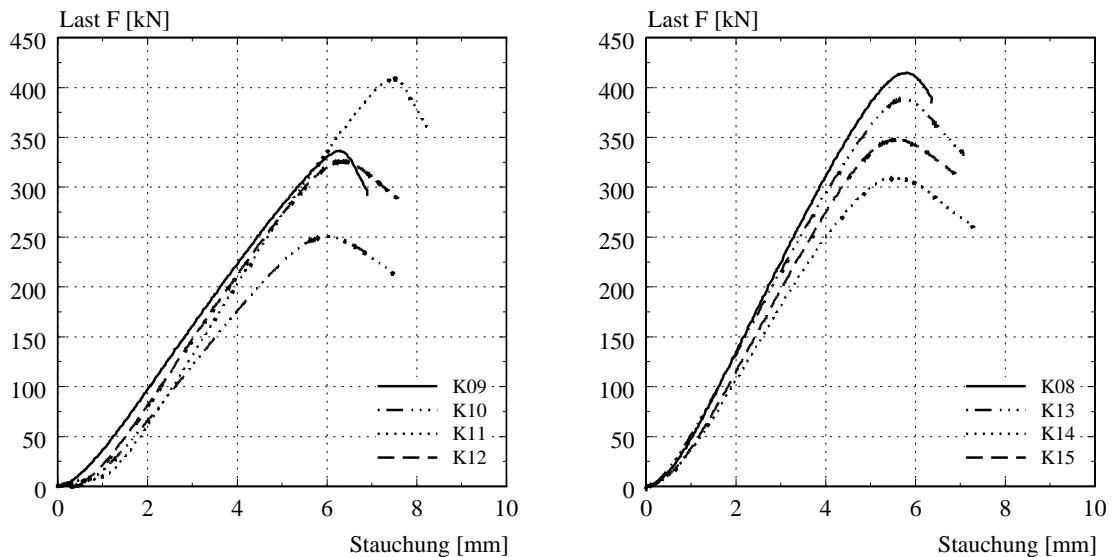


Bild 12 – Kraft-Verformungsdiagramme der Knickversuche,  $L_k=1'950\text{mm}$   
Links: mit Kernbohrung; rechts: ohne Kernbohrung

Tabelle 8 gibt die gemessenen Bruchlasten und die dazugehörigen berechneten Bruchspannungen aller durchgeföhrten Knickversuche. Für auf Druck beanspruchte Elemente kann der Einfluss der Kernbohrung nicht vernachlässigt werden. Die Bruchspannung wurde damit für die kernfreien Holzstützen unter Berücksichtigung der Nettoquerschnittsfläche berechnet (vgl. Tabelle 9). Die gemessenen Bruchspannungen variierten zwischen 9.5 bis  $19\text{N/mm}^2$  für die 2.8m hohen Holzstützen und zwischen 16.9 bis  $27.6\text{N/mm}^2$  für die 1.95m hohen Holzstützen. Zu bemerken ist, dass die Streuung der gemessenen Bruchspannungen bei den Holzstützen mit der Kernbohrung grösser war als bei den Vollholzstützen. Zudem wurden bei den Holzstützen mit der Kernbohrung tendenziell geringere Bruchspannungen als bei den Vollholzstützen gemessen. Visuelle Beobachtungen zeigten jedoch, dass die kernfreien Holzstützen mit den gemessenen kleinsten Bruchspannungen besonders ausgeprägte Strukturfehler aufwiesen.

Tabelle 8 – Übersicht der Resultate für die durchgeführten Knickversuche

Balken	Holzart	Kernbohrung	Knicklänge [mm]	Bruchlast [kN]	Bruchspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
K01	Eiche	Ja	2800	141	9.5
K02	Eiche	Nein	2800	261	15.5
K03	Eiche	Nein	2800	234	13.9
K04	Eiche	Ja	2800	170	11.5
K05	Eiche	Nein	2800	210	12.5
K06	Eiche	Nein	2800	242	14.4
K07	Eiche	Ja	2800	282	19.0
K08	Eiche	Nein	1950	415	24.7
K09	Eiche	Ja	1950	336	22.6
K10	Eiche	Ja	1950	250	16.9
K11	Eiche	Ja	1950	410	27.6
K12	Eiche	Ja	1950	326	22.0
K13	Eiche	Nein	1950	388	23.1
K14	Eiche	Nein	1950	309	18.4
K15	Eiche	Nein	1950	348	20.7

Tabelle 9 – Querschnittswerte der Holzstützen für die Knickversuche mit und ohne Berücksichtigung der Kernbohrung

Breite b [mm]	120	
Höhe h [mm]	140	
Durchmesser Bohrung d [mm]	50	
	Brutto	Netto
Fläche A [mm <sup>2</sup> ]	16'800	14'837
Trägheitsmoment I <sub>y</sub> [mm <sup>4</sup> ]	27.4 x 10 <sup>6</sup>	27.1 x 10 <sup>6</sup>
Trägheitsmoment I <sub>z</sub> [mm <sup>4</sup> ]	20.2 x 10 <sup>6</sup>	19.9 x 10 <sup>6</sup>
Trägheitsradius i <sub>y</sub> [mm]	40.41	40.19
Trägheitsradius i <sub>z</sub> [mm]	34.64	34.38

## 2.5 Auswertung der Versuchsresultate

### 2.5.1 Biegeversuche

Bild 13 vergleicht den gemessenen Biegewiderstand mit dem nach Gleichung 3 berechneten charakteristischen Biegewiderstand für alle Biegeversuche mit Holzbalken aus Eiche und Buche. Der Berechnung des charakteristischen Biegewiderstandes wurde der 5%-Fraktilwert der Biegefestigkeit für Eiche/Buche für die Festigkeitsklasse D30 gemäss der Norm SIA 265 [4] zugrunde gelegt. Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung des am vollen Querschnitt berechneten Widerstandsmomentes. Aus Bild 13 erkennt man, dass für alle Biegeversuche der gemessene Biegewiderstand höher war als der charakteristische Biegewiderstand.

$$M_{R,k} = f_{m,k} \cdot W_{Brutto} \quad \text{mit} \quad W_{brutto} = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \text{und} \quad f_{m,k} = 30 \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

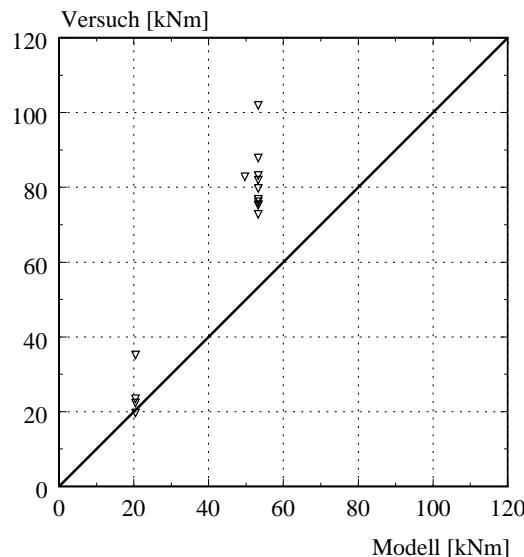


Bild 13 – Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Biegewiderstand für alle durchgeführten Biegeversuche mit Holzbalken aus Eiche und Buche

Tabelle 10 – Statistische Kennwerte der gemessenen Materialeigenschaften für alle Holzbalken aus Eiche/Buche

Biege-E-Modul	Min. Wert [N/mm <sup>2</sup> ]	Median [N/mm <sup>2</sup> ]	Max. Wert [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert $\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Std. Abweichung s [N/mm <sup>2</sup> ]	Variationskoef. $v=s/\bar{x}$ [-]
	9689	11230	13722	11637	1372	0.12
Biegefestigkeit	Min. Wert [N/mm <sup>2</sup> ]	Median [N/mm <sup>2</sup> ]	Max. Wert [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert $\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Std. Abweichung s [N/mm <sup>2</sup> ]	Variationskoef. $v=s/\bar{x}$ [-]
	28.8	45.5	53.9	44	7.63	0.17
Rohdichte	Min. Wert [kg/m <sup>3</sup> ]	Median [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Wert [kg/m <sup>3</sup> ]	Mittelwert $\bar{x}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Std. Abweichung s [kg/m <sup>3</sup> ]	Variationskoef. $v=s/\bar{x}$ [-]
	639	707	762	704	38	0.05

Tabelle 10 zeigt die statistischen Kennwerte der gemessenen Materialeigenschaften (Biege-E-Modul, Biegefestigkeit und Rohdichte) für alle geprüften Holzbalken aus Eiche/Buche. Da die Vorspannung keinen Einfluss auf den Biegewiderstand aufwies, wurden auch die Versuchsresultate der vorgespannten

Träger berücksichtigt (für den E-Modul wurde der gemessene Wert vor der Vorspannung berücksichtigt). Bild 14 zeigt die Messergebnisse für den Biege-E-Modul mit Hilfe vom sogenannten Normal Plot. Somit ist das Vorliegen einer Normalverteilung der Beobachtungen sehr einfach überprüfbar, indem die Werte auf einer Geraden liegen müssen. Diese Gerade wurde mit dem Mittelwert  $\mu = \bar{x} = 11637 \text{ N/mm}^2$  und der Standardabweichung  $\sigma = s = 1372 \text{ N/mm}^2$  der Stichprobe unter Annahme einer Normalverteilung bestimmt und im Diagramm gezeichnet. Sie ist gekennzeichnet durch eine Steigung, die der Streuung der Werte entspricht. Der Mittelwert des Biege-E-Moduls wird bei der Wahrscheinlichkeit gleich 50% gelesen. Der im Diagramm angegebene Korrelationskoeffizient  $R$  zeigt die Stärke und die Richtung der angenommenen Normalverteilung. Für einen positiven perfekten Zusammenhang gilt  $R = 1.0$  [7].

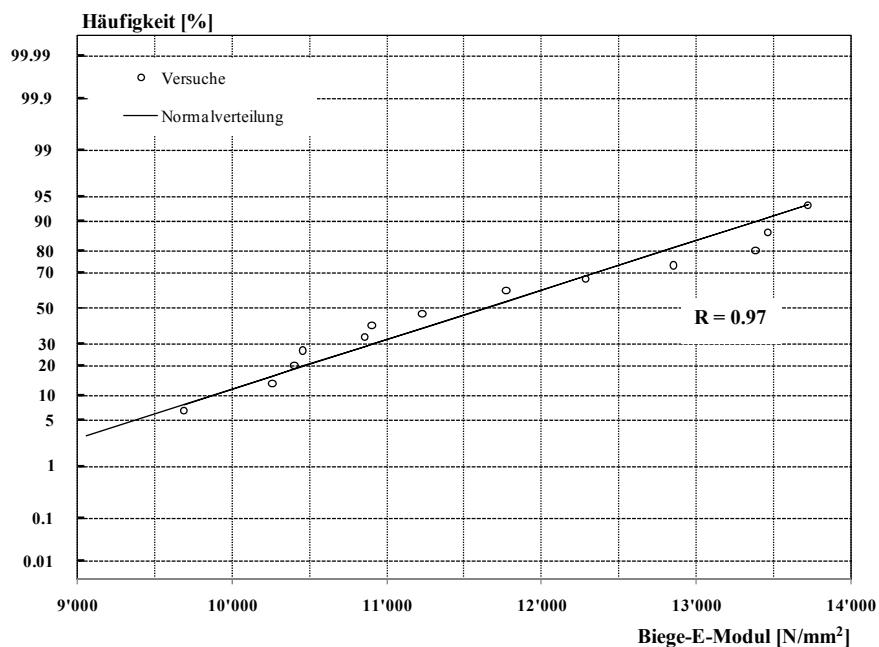


Bild 14 – Darstellung der Messergebnisse für den Biege-E-Modul in einem Normal Plot

Bild 14 zeigt, dass trotz der geringen Anzahl der Versuchsresultate eine Normalverteilung für den Biege-E-Modul angenommen werden kann. Der 5%-Fraktilwert des Biege-E-Moduls bei unendlich grosser Probenanzahl kann aufgrund des Mittelwertes und der Standardabweichung der Grundgesamtheit wie folgt geschätzt werden:

$$E_{m,k} = \mu - 1.645 \cdot \sigma = 11637 - 1.645 \cdot 1372 = 9387 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

Ein aus einer Stichprobe ermittelter Kennwert ist bezogen auf die Grundgesamtheit nur ein Schätzwert. Zu diesem Schätzwert lässt sich mit Hilfe der t-, bzw.  $\chi^2$ -Grenzwerte ein Vertrauensintervall (Konfidenzintervall) angeben. Dieses Vertrauensintervall erstreckt sich über die nächstkleineren und -grösseren Werte und enthält den wahren Parameterwert der Grundgesamtheit mit der Wahrscheinlichkeit  $1-\alpha$  ( $\alpha$  = Signifikanzniveau, Irrtumswahrscheinlichkeit). Durch Veränderung der Grösse des Vertrauensbereiches mit Hilfe eines entsprechenden Faktors lässt sich festlegen, wie sicher die Aussage ist, dass der Vertrauensbereich den Parameter der Grundgesamtheit enthält [6]. Falls die Probenanzahl endlich und die Streuung der Grundgesamtheit bekannt ist, kann der 5%-Fraktilwert des Biege-E-Moduls aufgrund des Mittelwertes und der Standardabweichung der Grundgesamtheit wie folgt geschätzt werden:

$$E_{m,k} = \bar{x} - k_{05,\sigma} \cdot \sigma = 11637 - 1.98 \cdot 1372 = 8920 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

Der Faktor  $k_{05,\sigma}$  ist abhängig von der Probenanzahl der Stichprobe und der Vertrauenswahrscheinlichkeit und wurde aus Tabelle 11 entnommen. Den Zahlenwerten der Tabelle 11 wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0.1$  zugrunde gelegt [5].

Tabelle 11 – Faktoren zur Berechnung des einseitig abgegrenzten statischen Anteilsbereiches bei Normalverteilung

$1 - \alpha = 90\%$	$n$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	100	200	500	$\infty$
	$k_{05,\sigma}$	2.218	2.050	1.976	1.932	1.901	1.879	1.862	1.848	1.836	1.826	1.773	1.736	1.702	1.645

Tabelle 12 vergleicht den Biege-E-Modul gemäss der Norm SIA 265 mit den Versuchsresultaten. Der aus den Versuchsresultaten ermittelte Mittelwert bzw. charakteristische Wert des Biege-E-Moduls ist deutlich höher als die angenommenen Werte gemäss der Norm SIA 265.

Tabelle 12 – Vergleich des Biege-E-Moduls gemäss der Norm SIA 265 mit den Versuchsresultaten

	Mittelwert des Biege-E-Moduls $E_{m,mean} [\text{N/mm}^2]$	5%-Fraktilwert des Biege-E-Moduls $E_{m,k} [\text{N/mm}^2]$
Norm SIA 265	10'000	8'000
Versuche	11'637	8'920

Bild 15 zeigt die Messergebnisse für die Biegefestigkeit im Normal Plot. Trotz der geringen Anzahl der Versuchsresultate kann auch im Fall der Biegefestigkeit eine Normalverteilung vereinfacht angenommen werden. Der 5%-Fraktilwert der Biegefestigkeit bei unendlich grosser Probenanzahl kann aufgrund des Mittelwertes und der Standardabweichung der Grundgesamtheit wie folgt geschätzt werden:

$$f_{m,k} = \mu - 1.645 \cdot \sigma = 44 - 1.645 \cdot 7.63 = 31.5 \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

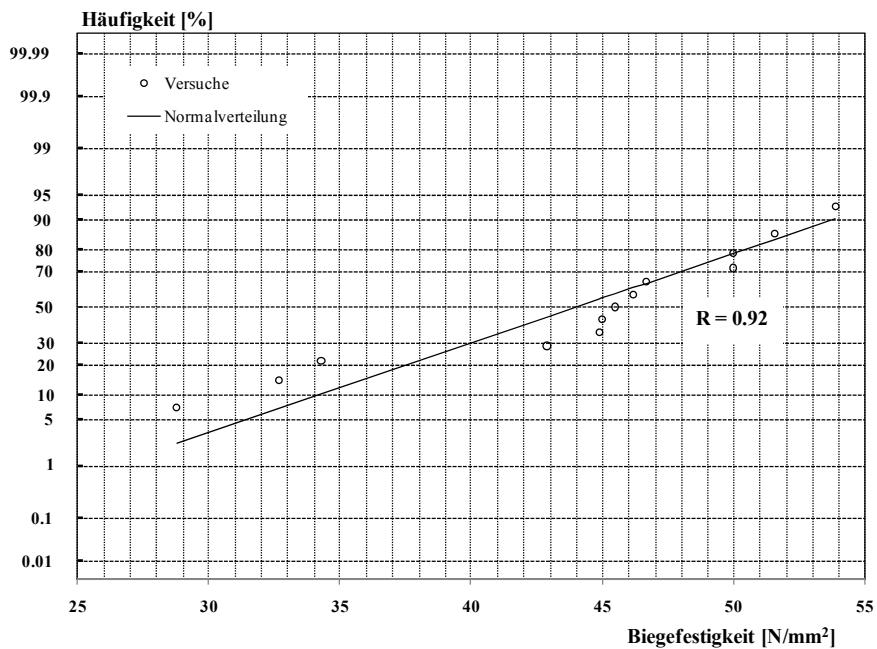


Bild 15 – Darstellung der Messergebnisse für die Biegefestigkeit in einem Normal Plot

Der 5%-Fraktilwert der Biegefestigkeit bei endlich grosser Probenanzahl kann aufgrund des Mittelwertes und der Standardabweichung der Grundgesamtheit wie folgt geschätzt werden:

$$f_{m,k} = \bar{x} - k_{05,\sigma} \cdot \sigma = 44 - 1.98 \cdot 7.63 = 28.9 \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

Die charakteristische Biegefestigkeit gemäss der Norm SIA 265 beträgt  $30 \text{ N/mm}^2$ . Unter Berücksichtigung der geringen Anzahl der Versuchsresultate stimmt die charakteristische Biegefestigkeit gemäss der Norm SIA 265 mit den Versuchsresultaten gut überein.

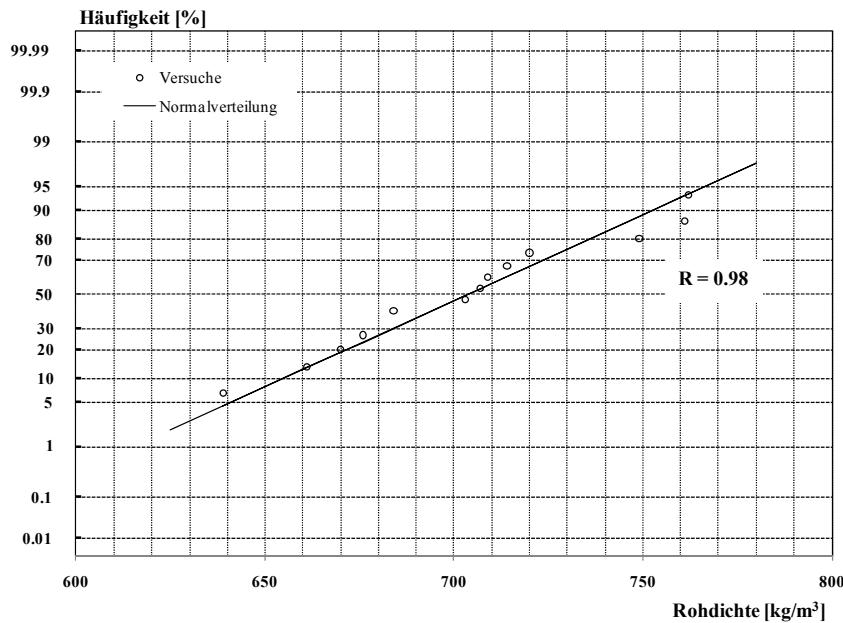


Bild 16 – Darstellung der Messergebnisse für die Rohdichte in einem Normal Plot

Bild 16 zeigt die Messergebnisse für die Rohdichte im Normal Plot. Auch in diesem Fall kann eine Normalverteilung angenommen werden. Der 5%-Fraktilwert der Rohdichte bei unendlich grosser Probenanzahl kann aufgrund des Mittelwertes und der Standardabweichung der Grundgesamtheit wie folgt geschätzt werden:

$$\rho_k = \mu - 1.645 \cdot \sigma = 704 - 1.645 \cdot 38 = 641 \text{ kg/m}^3 \quad (8)$$

Der 5%-Fraktilwert der Rohdichte bei endlich grosser Probenanzahl kann aufgrund des Mittelwertes und der Standardabweichung der Grundgesamtheit wie folgt geschätzt werden:

$$\rho_k = \bar{x} - k_{05,\sigma} \cdot \sigma = 704 - 1.98 \cdot 38 = 629 \text{ kg/m}^3 \quad (9)$$

Tabelle 13 – Vergleich der Rohdichte gemäss der Norm SIA 265 mit den Versuchsresultaten

	Mittelwert der Rohdichte $\rho_{mean}$ [kg/m³]	5%-Fraktilwert der Rohdichte $\rho_k$ [kg/m³]
Norm SIA 265	640	530
Versuche	704	629

Tabelle 13 vergleicht die Rohdichte gemäss der Norm SIA 265 mit den Versuchsresultaten. Der aus den Versuchsresultaten ermittelte Mittelwert bzw. charakteristische Wert der Rohdichte ist deutlich höher als die angenommenen Werte gemäss der Norm SIA 265.

## 2.5.2 Knickversuche

Tabelle 14 fasst die statistischen Kennwerte der Ergebnisse der Knickversuche zusammen. Die Knickwiderstände nahmen mit zunehmender Stützenhöhe (= Knicklänge) ab (Stabilitätseinfluss). Zudem wiesen die Stützen mit der Kernbohrung grössere Streuungen (Standardabweichung sowie Variationskoeffizient) im Vergleich mit den Vollholzstützen auf. Zu beachten ist aber die geringe Anzahl der durchgeföhrten Knickversuche (für die Stützen mit Kernbohrung und einer Länge von 2.8m konnte man nur drei Knickversuche durchführen). Zudem zeigten visuelle Beobachtungen, dass die kernfreien Stützen mit den gemessenen kleinsten Knickwiderständen besonders ausgeprägte Strukturfehler aufwiesen.

Tabelle 14 – Statistische Kennwerte der Knickwiderstände für die durchgeföhrten Knickversuche

<b>L<sub>k</sub> [mm]</b>	<b>Kern- bohrung</b>	<b>Min. Wert [kN]</b>	<b>Median [kN]</b>	<b>Max. Wert [kN]</b>	<b>Mittelwert x̄ [kN]</b>	<b>Std. Abweichung s [kN]</b>	<b>Variationskoeff. v=s/x̄ [-]</b>
2800	Ja	141	170	282	198	74.5	0.38
	Nein	210	237	261	236	21	0.09
1950	Ja	250	331	410	331	65.5	0.2
	Nein	309	368	415	365	46.4	0.13

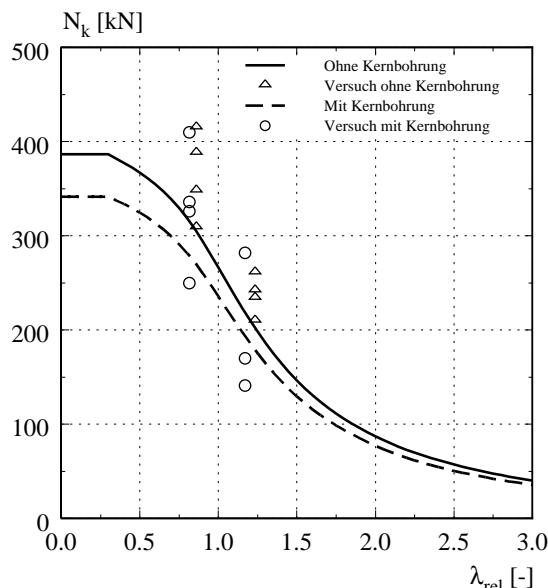


Bild 17 – Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Knickwiderstand für alle durchgeföhrten Knickversuche

Bild 17 vergleicht den gemessenen Knickwiderstand mit dem nach Gleichung 10 berechneten charakteristischen Knickwiderstand für alle durchgeföhrten Knickversuche. Der Berechnung des charakteristischen Knickwiderstandes wurde der 5%-Fraktilwert der Druckfestigkeit und des E-Moduls für Eiche/Buche für die Festigkeitsklasse D30 gemäss der Norm SIA 265 zugrunde gelegt. Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung des Einflusses der Kernbohrung auf die Querschnittswerte (Fläche, Trägheitsmoment und Trägheitsradius) gemäss Tabelle 9. Aus Bild 17 erkennt man, dass für alle Knickversuche ohne Kernbohrung der gemessene Knickwiderstand höher war als der charakteristische Knickwiderstand. Für die Knickversuche mit Kernbohrung waren einige gemessene Knickwiderstände leicht unter dem charakteristischen Knickwiderstand.

$$N_{R,k} = k_c \cdot f_{c,k} \cdot A_{Netto}$$

mit Knickbeiwert  $k_c$  gemäss Norm SIA 265 und  $f_{c,k} = 23 \text{ N/mm}^2$  (10)

### 3. Bemessung von Holzbauteilen aus Eichenholz

Im Folgenden werden die Grundlagen für die Bemessung von Holzbauteilen aus Eichenholz unter Biege- und Druckbeanspruchung erläutert. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Bemessung von Holzbauteilen aus Eichenholz die Festigkeitsklasse D30 gemäss der Norm SIA 265 zugrunde gelegt werden kann. Diagramme zur Vorbemessung von Holzbauteilen aus Eichenholz werden ebenfalls dargestellt.

#### 3.1 Bemessungsgrundlagen

##### 3.1.1 Tragsicherheitsnachweis

Der Tragsicherheitsnachweis kann gemäss der Norm SIA 260 [3] wie folgt geführt werden:

$$E_d \leq R_d \quad (11)$$

mit  $E_d$  Bemessungswert der Einwirkung gemäss der Norm SIA 260  
 $R_d$  Bemessungswert des Tragwiderstandes gemäss der Norm SIA 265

Der Bemessungswert des Tragwiderstandes  $R_d$  bzw. der Festigkeit  $f_d$  kann gemäss der Norm SIA 265 wie folgt bestimmt werden:

$$R_d = R_k \cdot \frac{\eta_M \cdot \eta_w \cdot \eta_t}{\gamma_M} = \frac{R_k}{\gamma_M / \eta_M} \cdot \eta_w \cdot \eta_t \quad (12)$$

$$f_d = f_k \cdot \frac{\eta_M \cdot \eta_w \cdot \eta_t}{\gamma_M} = \frac{f_k}{\gamma_M / \eta_M} \cdot \eta_w \cdot \eta_t \quad (13)$$

Der charakteristische Wert des Tragwiderstands  $R_k$  bzw. der Festigkeit  $f_k$  ist als 5%-Fraktilwert definiert und wird aus einem Kurzzeit-Normversuch ermittelt. Der Widerstandsbeiwert  $\gamma_M$  berücksichtigt ungünstige Abweichungen der Baustoffeigenschaften von charakteristischem Wert und Unschärfen im Widerstandsmodell. Der Umrechnungsfaktor  $\eta_M$  ermöglicht die Umrechnung des charakteristischen Werts des Tragwiderstands  $R_k$  bzw. der Festigkeit  $f_k$  von Kurzzeit-Normversuchsverhältnissen auf für Bauteile geltende Bedingungen. Tabelle 15 gibt die Verhältniswerte  $\gamma_M / \eta_M$  gemäss der Norm SIA 265.

Tabelle 15 – Verhältniswerte  $\gamma_M / \eta_M$  gemäss der Norm SIA 265

Bauteile	$\gamma_M / \eta_M$
Rund- und Vollholz, vollholzähnliche Produkte generell	1.7
qualitätsgesichertem Brettschichtholz, maschinell sortiertem Vollholz	1.5
Holzwerkstoffe	siehe Norm SIA 265/1

Der Umrechnungsfaktor  $\eta_w$  berücksichtigt den Einfluss der Holzfeuchte zur Umrechnung der Tragwiderstände und der Steifigkeitswerte von der Feuchtekategorie 1 ( $\eta_w = 1.0$ ) auf die Feuchteklassen 2 und 3 ( $\eta_w < 1.0$ , vgl. Tabelle 16). Der Umrechnungsfaktor  $\eta_t$  berücksichtigt den Einfluss der Einwirkungsdauer. Für stoßartige Einwirkungen (z.B. dynamische Einwirkungen von Straßenlasten sowie Erdbeben- und Anprallkräfte) darf bei Vollholz und Brettschichtholz  $\eta_t = 1.4$  gesetzt werden. Bei anderen Einwirkungen ist mit  $\eta_t = 1.0$  zu rechnen.

Tabelle 16 – Beiwert  $\eta_w$  zur Erfassung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Tragwiderstand und die Steifigkeit

Beeinflusste Eigenschaft Baustoff	Tragwiderstand		Steifigkeit	
	Feuchtekategorie 2	Feuchtekategorie 3	Feuchtekategorie 2	Feuchtekategorie 3
Vollholz, Brettschichtholz	0.8	0.6	0.9	0.75
Holzwerkstoffe	siehe Norm SIA 265/1			

### 3.1.2 Bemessung von Biegeträgern

Im Folgenden werden Biegeträger aus Eichenholz mit rechteckigen Querschnitten konstanter Höhe betrachtet. Es wird angenommen, dass das Kippen der Biegeträger durch Kipphalterungen verhindert ist. Der Einfluss der Kernbohrung auf den Biegewiderstand darf näherungsweise vernachlässigt werden (Fehler  $\leq 5\%$ ), sofern die Fläche der Kernbohrung nicht grösser als 20% des vollen Querschnittes ist.

Bei Wirkung von Biegespannung in Faserrichtung ist folgende Bedingung zu erfüllen (SIA 265, Ziff. 4.2.3):

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (14)$$

mit  $\sigma_{m,y,d}$  Bemessungswert der Spannung infolge Biegung um die y-Achse  
 $\sigma_{m,z,d}$  Bemessungswert der Spannung infolge Biegung um die z-Achse  
 $f_{m,y,d}$  Bemessungswert der Biegefestigkeit für Biegung um die y-Achse  
 $f_{m,z,d}$  Bemessungswert der Biegefestigkeit für Biegung um die z-Achse

Für den Spezialfall von einachsiger Biegung vereinfacht sich die Gleichung 14 zu:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{d,max}}{W_{Brutto}} = \frac{M_{d,max}}{\frac{b \cdot h^2}{6}} \leq f_{m,y,d} \quad (15)$$

Der Bemessungswert der Biegefestigkeit für Eiche gemäss der Norm SIA 265 (Festigkeitsklasse D30) ergibt sich zu (für  $\eta_w = 1.0$  und  $\eta_t = 1.0$ ):

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_M / \eta_M} = \frac{30}{1.7} = 17 \text{ N/mm}^2 \quad (16)$$

### 3.1.3 Bemessung von Druckgliedern

Im Folgenden werden Druckglieder aus Eichenholz mit rechteckigen Querschnitten konstanter Höhe betrachtet. Der Einfluss der Kernbohrung auf den Knickwiderstand kann nicht vernachlässigt werden. Für den Knicknachweis für planmäßig zentrisch beanspruchte, gerade Druckstäbe mit konstantem Querschnitt ( $b \times h$ ) ist folgende Bedingung zu erfüllen (SIA 265, Ziff. 4.2.8):

$$\sigma_{c,d} \leq k_c \cdot f_{c,d} \quad (17)$$

mit  $\sigma_{c,d}$  Bemessungswert der Druckspannung  
 $k_c$  Knickbeiwert in Funktion der relativen Schlankheit  $\lambda_{rel}$   
 $f_{c,d}$  Bemessungswert der Druckfestigkeit: für Eiche (FK D30) gilt  $f_{c,d} = 13 \text{ N/mm}^2$  ( $\eta_w = 1.0$ ;  $\eta_t = 1.0$ )

Der Knickbeiwert  $k_c$  wird in Abhängigkeit von der relativen Schlankheit  $\lambda_{rel}$  gemäss Gleichung 18 (SIA 265, Ziff. 4.2.8.2) oder graphisch aus Bild 18 ermittelt.

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (18)$$

mit  $k = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2)$  (19)

$\beta_c = 0.2 \quad \text{für Vollholz}$   
 $\beta_c = 0.1 \quad \text{für Brettschichtholz}$

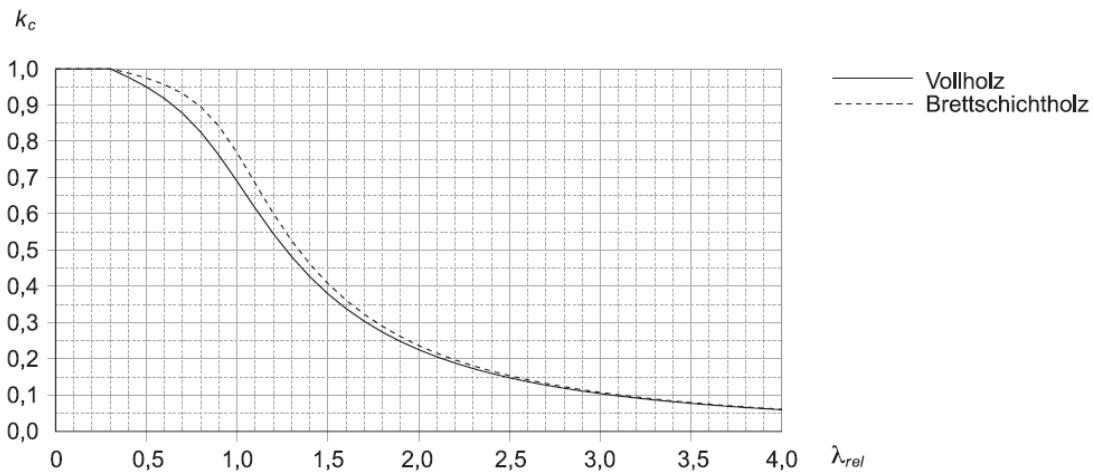


Bild 18 – Knickbeiwert  $k_c$  in Abhängigkeit von der relativen Schlankheit  $\lambda_{rel}$  gemäss der Norm SIA 265

Die relative Schlankheit  $\lambda_{rel}$  ist abhängig von der geometrischen Schlankheit  $\lambda$  und den Baustoffeigenschaften (charakteristischer Wert des E-Moduls  $E_k$  und charakteristischer Wert der Druckfestigkeit  $f_{c,k}$ ) und kann wie folgt berechnet werden (SIA 265, Ziff. 4.2.8.4):

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{f_{c,k}}{\sigma_{c,crit}}} = \sqrt{\frac{f_{c,k}}{\frac{\pi^2 \cdot E_k}{\lambda^2}}} \quad (20)$$

mit  $f_{c,k}$  charakteristischer Wert der Druckfestigkeit: für Eiche (FK D30) gilt  $f_{c,k} = 23 \text{ N/mm}^2$   
 $E_k$  charakteristischer Wert des E-Moduls: für Eiche (FK D30) gilt  $E_k = 8'000 \text{ N/mm}^2$   
 $\lambda$  geometrische Schlankheit

Der 5%-Fraktilwert des Biege-E-Moduls  $E_k$  für Eiche ist auf das 5/6-Fache des Mittelwertes ( $E_{mean} = 10'000 \text{ N/mm}^2$ ;  $E_k = 8'000 \text{ N/mm}^2$ ) festgelegt. Die geometrische Schlankheit  $\lambda$  berechnet sich gemäss Gleichung 21 als Verhältnis zwischen der Knicklänge ( $\ell_k$ ) und dem Trägheitsradius  $i = \sqrt{I/A}$  für die untersuchte Knickrichtung.

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i} = \frac{\ell_k}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (21)$$

mit  $I$  Trägheitsmoment unter Berücksichtigung des Einflusses der Kernbohrung  
 $A$  Fläche unter Berücksichtigung des Einflusses der Kernbohrung

### 3.2 Vorbemessungsdiagramme

#### 3.2.1 Biegeträger

Folgende Diagramme können für die Vorbemessung von Biegeträgern aus Eichenholz verwendet werden. Die Vorbemessungsdiagramme wurden unter folgenden Annahmen berechnet:

- statisches System: einfacher Balken
- Festigkeitsklasse D30 gemäss Norm SIA 265
- $\eta_w = 1.0$  und  $\eta_t = 1.0$
- Träger gegen Kippen gesichert

Bild 19 zeigt die maximale zulässige Last  $q_{zul}$  (auf Gebrauchsniveau) für den Nachweis der Tragsicherheit. Die maximale zulässige Last  $q_{zul}$  wurde gemäss Gleichung 22 berechnet.

$$q_{zul} = \frac{q_d}{1.45} \leq \frac{8 \cdot W_{\text{Brutto}} \cdot f_{m,d}}{1.45 \cdot \ell^2} \quad (22)$$

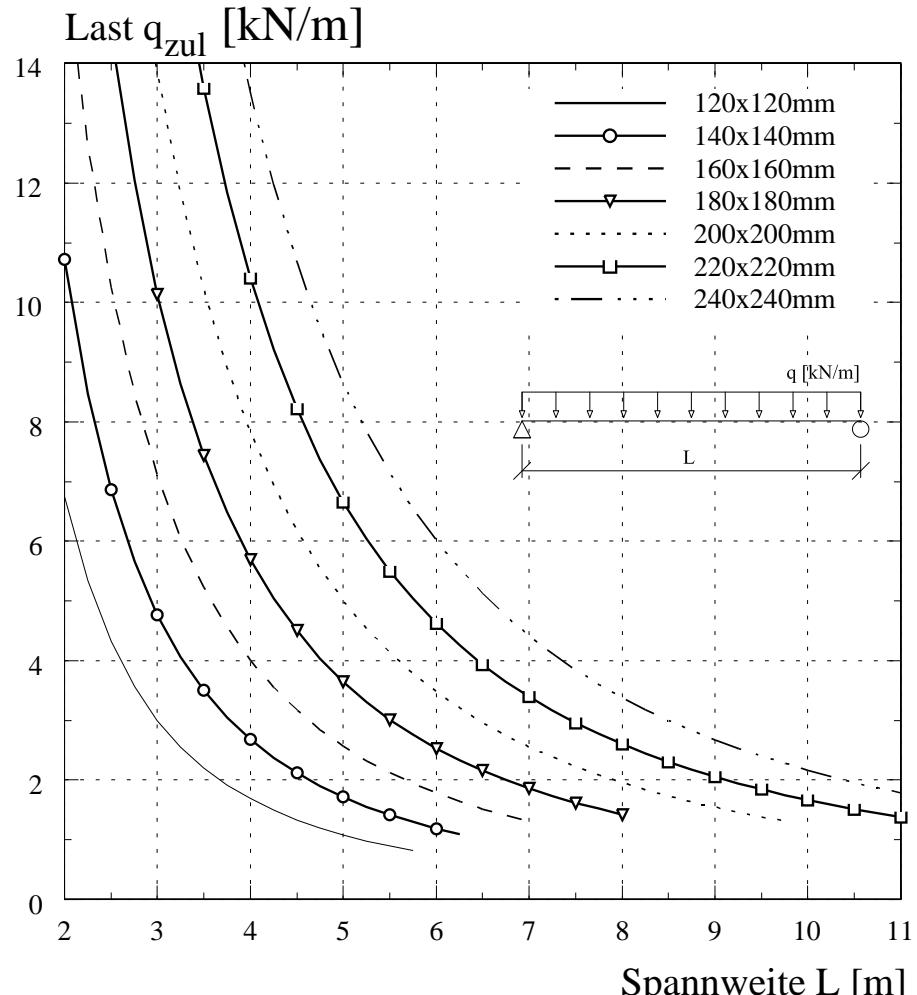


Bild 19 – Maximale zulässige Last  $q_{zul}$  (auf Gebrauchsniveau) für den Tragsicherheitsnachweis

Bild 20 zeigt die maximale zulässige Last  $q_{zul}$  (auf Gebrauchsniveau) für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, wobei eine zulässige Durchbiegung  $w_{zul} = L/350$  angenommen wurde. Zudem wurde angenommen, dass 50% der Last zu Kriechverformungen führt. Die Kriechverformungen wurden näherungsweise als das  $\varphi$ -Fache der entsprechenden elastischen Verformungen  $w_{el}$  gemäss Gleichung 23 bestimmt.

$$w_{\infty} = (1 + \varphi) \cdot w_{el} \quad (23)$$

mit  $\varphi$ : Kriechfaktor:  $\varphi = 0.6$  gemäss Norm SIA 265 für vor der Witterung geschützte Bauteile und auf Gebrauchsfeuchte vorkonditioniertes Holz

Die maximale zulässige Last  $q_{zul}$  wurde somit gemäss Gleichung 24 berechnet.

$$w_{\infty} = \frac{5 \cdot (0.5 \cdot q_{zul}) \cdot \ell^4}{384 \cdot E_{mean} I_{Brutto}} + \frac{(0.5 \cdot q_{zul}) \cdot \ell^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot 5/6 \cdot A} + \left[ \frac{5 \cdot (0.5 \cdot q_{zul}) \cdot \ell^4}{384 \cdot E_{mean} I_{Brutto}} + \frac{(0.5 \cdot q_{zul}) \cdot \ell^2}{8 \cdot G_{mean} \cdot 5/6 \cdot A} \right] \cdot (1 + \varphi) \leq w_{zul} = \frac{\ell}{350} \quad (24)$$

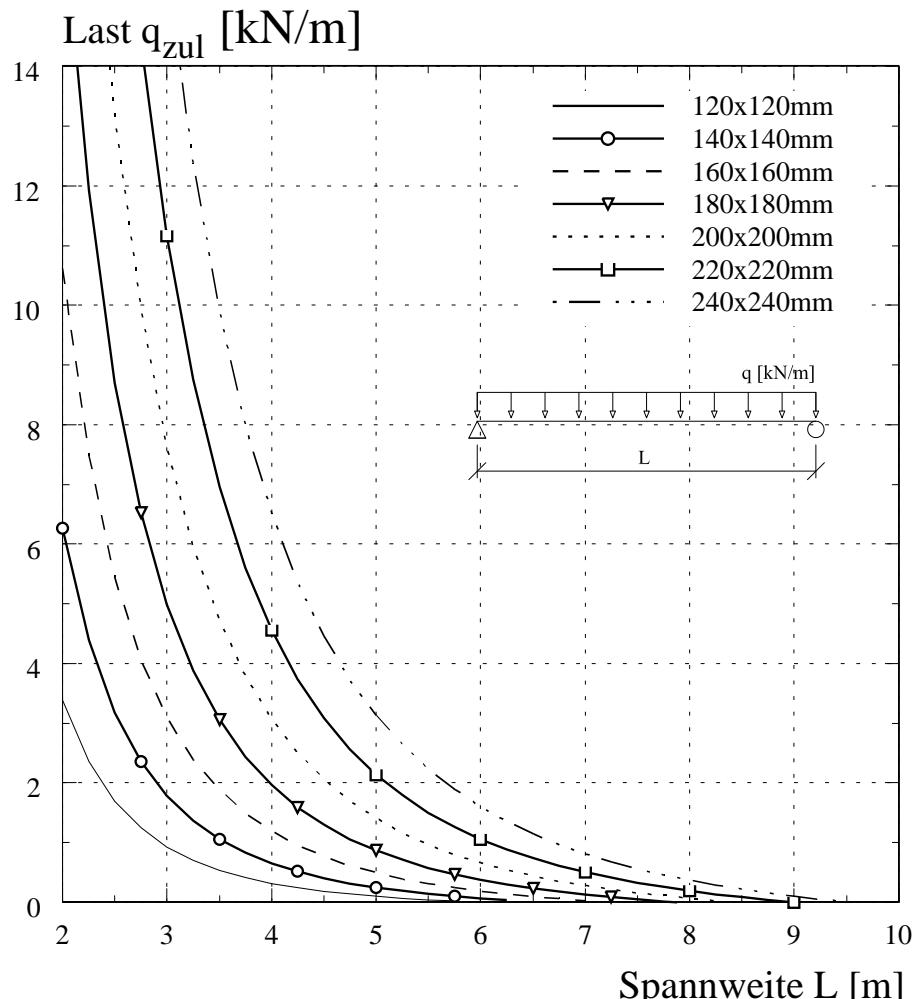


Bild 20 - Maximale zulässige Last  $q_{zul}$  (auf Gebrauchsniveau) für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis

### 3.2.2 Druckglieder

Folgendes Diagramm kann für die Vorbemessung von Druckgliedern aus Eichenholz verwendet werden. Das Vorbemessungsdiagramm wurde unter folgenden Annahmen berechnet:

- statisches System: beidseitig gelenkig gelagerte Stütze (Pendelstütze)
- Festigkeitsklasse D30 gemäss Norm SIA 265
- $\eta_w = 1.0$  und  $\eta_t = 1.0$

Bild 21 zeigt die maximale zulässige Last  $Q_{zul}$  (auf Gebrauchsniveau) für den Nachweis der Tragsicherheit. Die maximale zulässige Last  $Q_{zul}$  wurde gemäss Gleichung 25 berechnet.

$$Q_{zul} = \frac{Q_d}{1.45} \quad (25)$$

Der Bemessungswert der maximalen Last  $Q_d$  (auf Bemessungsniveau) wurde gemäss Gleichungen 17 bis 21 berechnet.

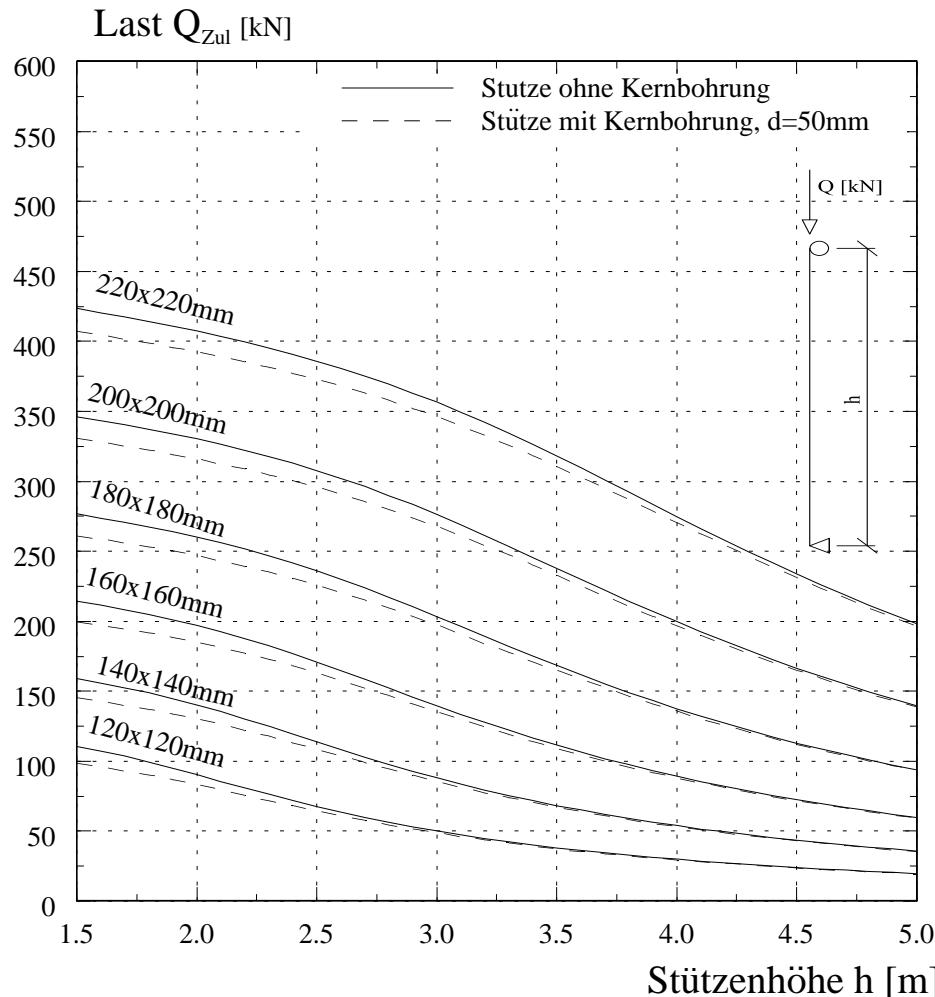


Bild 21 - Maximale zulässige Last  $Q_{zul}$  (auf Gebrauchsniveau) für den Tragsicherheitsnachweis

## 4. Zusammenfassung

Kernfreie Balken aus Laubholz stellen ein technisch und wirtschaftlich interessantes Produkt für tragende und nicht tragende Holzbauteile dar. Die wesentlichen Vorteile von kernfreien Balken sind die schnellere Trocknungszeit, die Reduktion der Schwindrisse und damit die bessere Dauerhaftigkeit der Holzelemente. Aus der Kernbohrung ergeben sich neue interessante und leistungsfähige Lösungen für Verbundelemente (z.B. in Kombination mit Zugstangen oder Spanngliedern aus Stahl). Die Firma Hedinger AG in Wilchingen sieht in diesem Produkt ein Zukunftspotential insbesondere für Laubhölzer. Durch eine Zusammenarbeit mit der Firma Bührer in Bibern verfügt sie über die Produktionsmaschinen für die Erstellung von kernfreien Holzbalken mit Kernbohrungen bis zu einer Länge von 6 m. Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung und Einführung von wirtschaftlichen und zuverlässigen kernfreien Holzbauteilen aus Laub- und eventuell Nadelholz. Insbesondere sollen Rohmaterialien aus wenig attraktiven Laubholzsortimenten verarbeitet und aufgewertet werden.

Durch die Unterstützung des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung wurden Grundlagenversuche in der Bauhalle des Institutes für Baustatik und Konstruktion an der ETH Zürich durchgeführt. Zielsetzung der durchgeführten Versuche war die Untersuchung des Tragverhaltens von kernfreien Holzbalken unter Biege- bzw. Druckbeanspruchung sowie die Bestimmung der für die Bemessung wichtigen Materialeigenschaften (Elastizitätsmodul, Biege- und Knickwiderstand). Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass der Bemessung von Holzbauteilen aus Eichenholz die Festigkeitsklasse D30 gemäss der Norm SIA 265 zugrunde gelegt werden kann. Diagramme zur Vorbemessung von Holzbauteilen aus Eichenholz wurden erstellt, die den Markteintritt unterstützen sollen.

## 5. Literatur

- [1] EN 408:2004-08 (Norm): Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, CEN, Brüssel, 2004.
- [2] Forschungsprojekt Eurêka DEBCE / „bois percé“, Rapport final, HSB Biel, 1998.
- [3] SIA 260:2003 (Norm): Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003.
- [4] SIA 265:2003 (Norm): Holzbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003.
- [5] Smirnov N., *Tables for estimating the goodness of fit of empirical distributions, Annals of mathematical Statistics*, Vol. 19 (1948).
- [6] Steiger R., *Biege-, Zug- und Druckversuche an Schweizer Fichtenholz*, IBK Bericht Nr. 207, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, ISBN 3-7643-5195-0, Birkhäuser Verlag Basel, Februar 1995.
- [7] Steiger R., *Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N Beanspruchung*, IBK Bericht Nr. 221, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, ISBN 3-7643-5477-1, Birkhäuser Verlag Basel, Juni 1996.

## Anhang - Biegeversuche

Im Folgenden sind die Kraft-Verformungsdiagramme aller durchgeführten Biegeversuche (Bruchversuche) dargestellt.

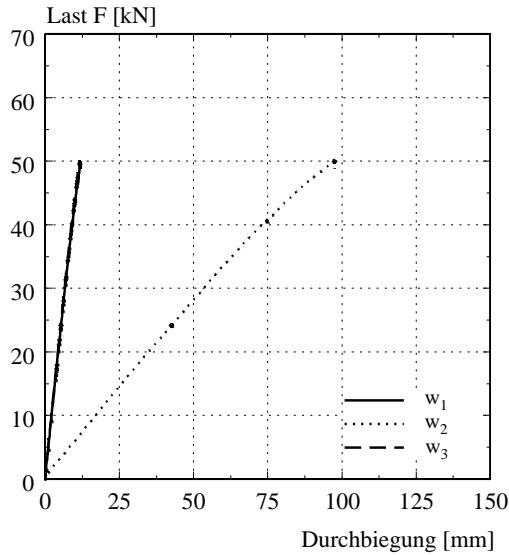


Bild 22 – Träger B01

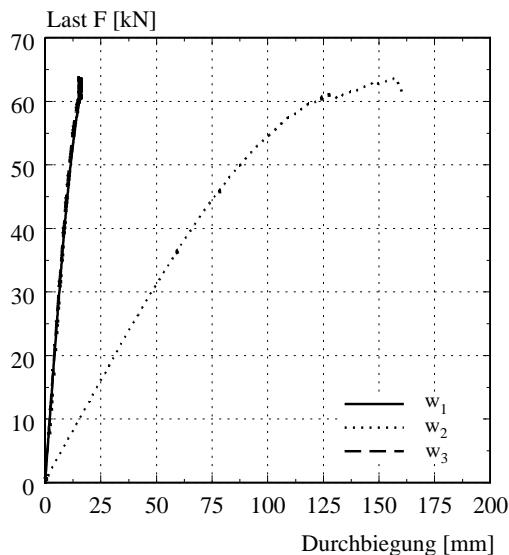


Bild 23 – Träger B02



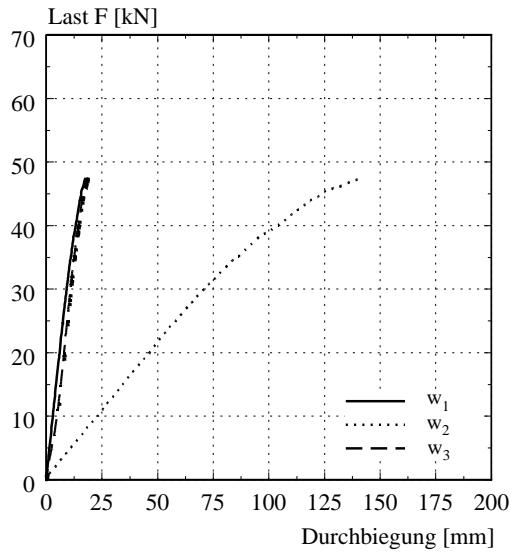


Bild 24 – Träger B03

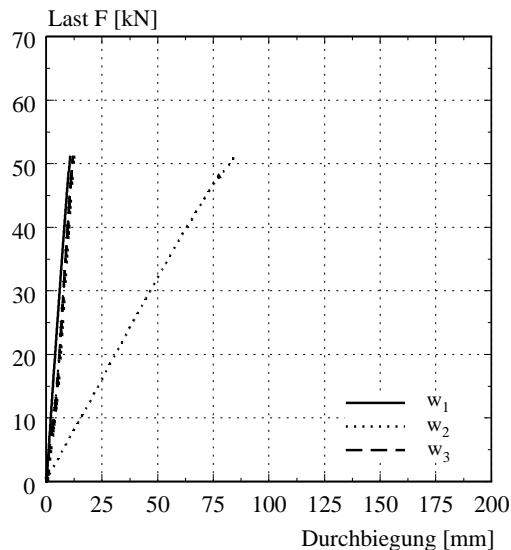


Bild 25 – Träger B04



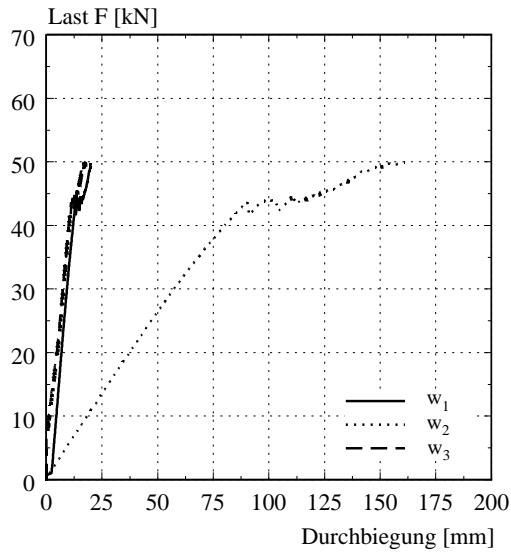


Bild 26 – Träger B05

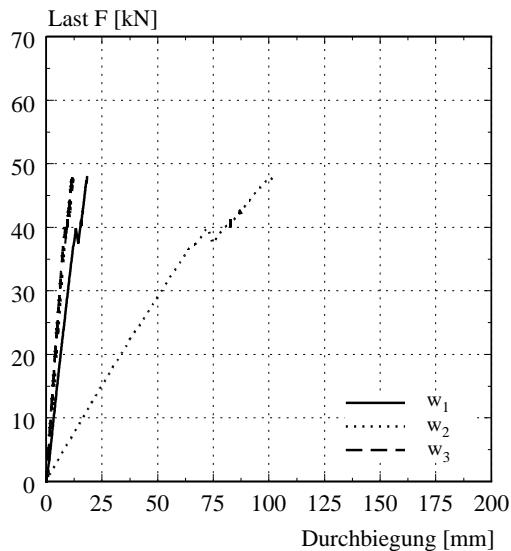


Bild 27 – Träger B06

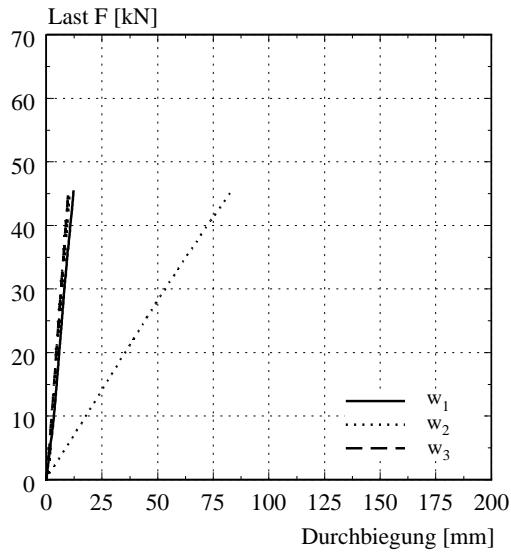


Bild 28 – Träger B07

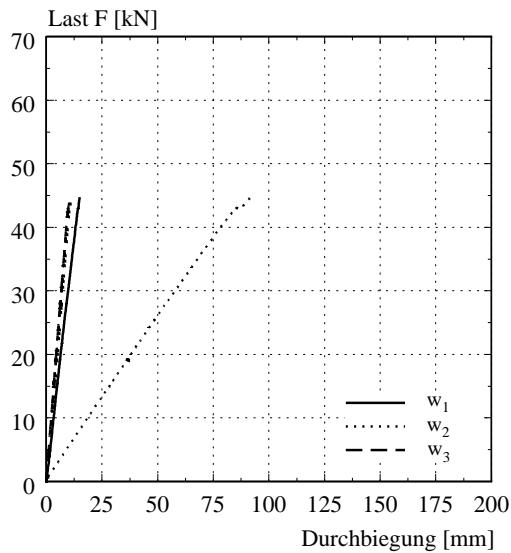


Bild 29 – Träger B08



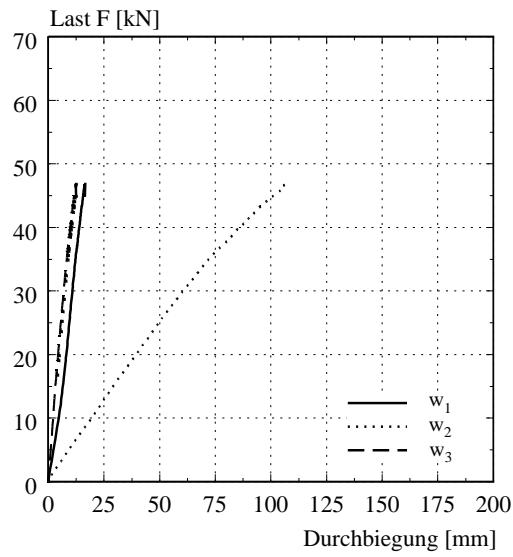


Bild 30 – Träger B09

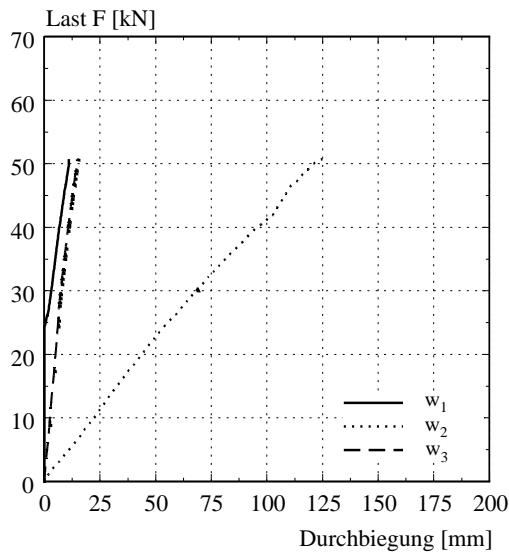


Bild 31 – Träger B10

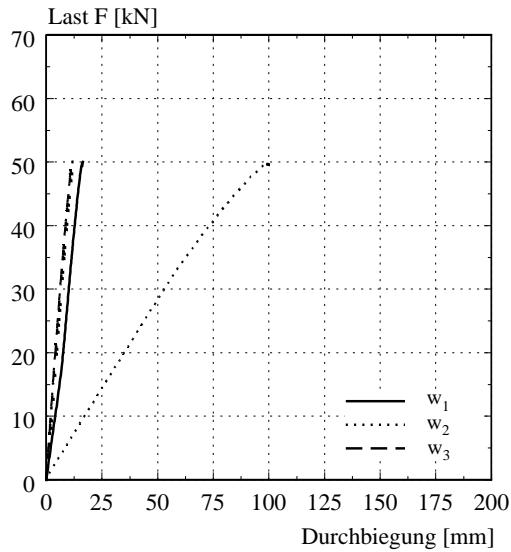


Bild 32 – Träger B11

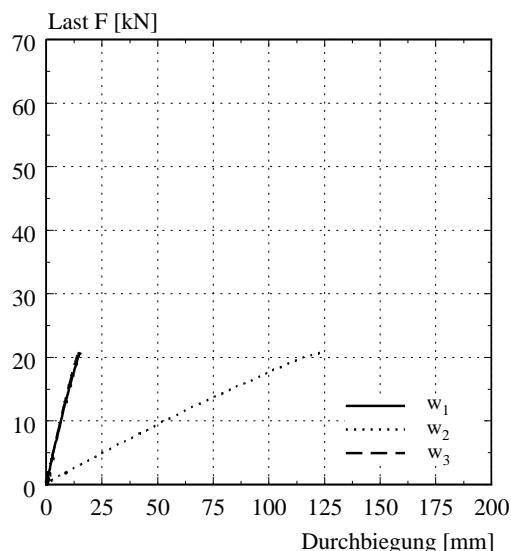


Bild 33 – Träger B12

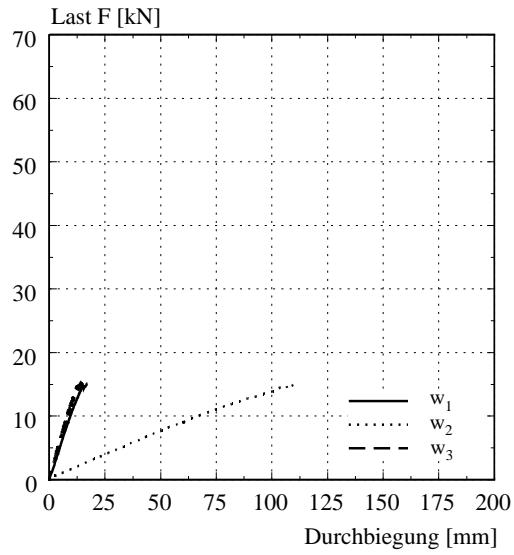


Bild 34 – Träger B13

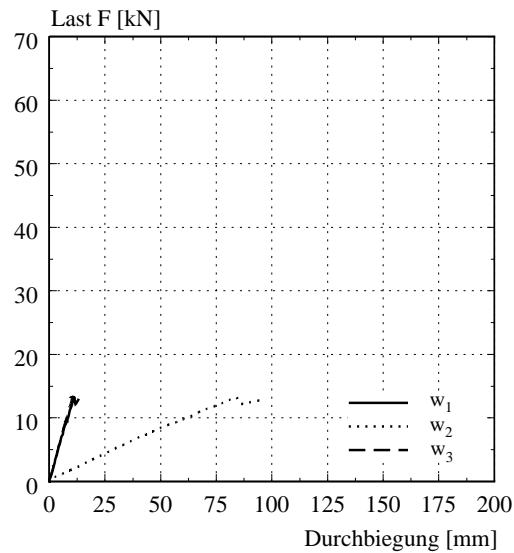


Bild 35 – Träger B14

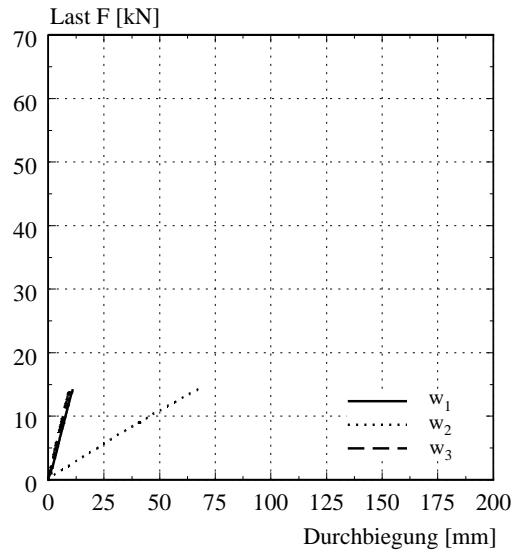


Bild 36 – Träger B15