

Biegeversuche mit duktilen Holzbalken

Autor(en): **Brunner, Maurice / Schnüriger, Marco / Oguey, René**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tec21**

Band (Jahr): **127 (2001)**

Heft 25: **Crestawald**

PDF erstellt am: **15.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-80172>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Biegeversuche mit duktilen Holzbalken

Anders als im Stahlbau und im Stahlbetonbau war die Duktilität von Holzbalken bisher kaum ein Thema: die meisten Normen schreiben die Bemessung als spröden Werkstoff unter Anwendung der so genannten Biegefestigkeit f_M vor, wobei der Ingenieur nicht zwischen duktiler Biegedruckseite und spröder Biegezugseite unterscheiden kann. Es stellt sich die Frage nach dem Tragverhalten eines Holzbalkens, der unsymmetrisch und nur auf der Zugseite verstärkt ist. Ein an der Schweizerischen Hochschule für die Holzwirtschaft (SH-Holz) entwickeltes, nichtlineares Berechnungsmodell, das sich an die klassische Plastizitätstheorie anlehnt, deutet darauf hin, dass ein solcher Balken ein verbessertes duktileres Tragverhalten aufweist.

Das Berechnungsmodell zeigt auch, dass der Tragwiderstand solcher Balken grösser sein kann als der Wert, der aus einer elastischen Berechnung gemäss Eurocode EC 5 resultiert. Belastungsversuche bestätigen diese Voraussagen.

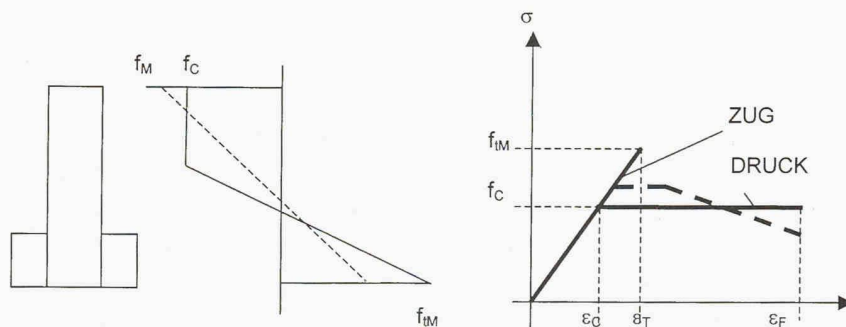
Im Laborversuch wird das Versagen von Holzbalken fast immer auf der spröden Zugseite initiiert. Selbst bei kleinen, fehlerfreien Proben erfolgt das Versagen schlagartig auf der Zugseite, obwohl die nominelle Zug-

festigkeit sehr viel höher liegt als die Druckfestigkeit. Diese etwas überraschende Tatsache wird von Plastifizierungseffekten in der duktilen Biegedruckzone verursacht, die die Spannungsspitzen über eine grössere Fläche verteilen. Die Botschaft scheint klar: Das Tragverhalten eines Holzbalkens könnte verbessert werden, wenn man die kritische Zugseite verstärkt.

Nichtlineare Berechnungen auf der Basis der Plastizitätstheorie sagen voraus, dass Holzbalken, die auf der Zugseite genügend verstärkt sind, ein duktileres Tragverhalten aufweisen und grössere Lasten tragen können, als die klassische, elastische Berechnung mit der so genannten Biegefestigkeit f_M voraussagt. Im Spätherbst 2000 wurden zur Klärung Belastungsversuche durchgeführt.

Günstige Voraussetzungen für eine Berechnung auf Basis der Plastizitätstheorie

Das Wort «Plastizität» wird im Zusammenhang mit Holz selten verwendet, denn das «duktilere» Tragverhalten von Holz unter Druckbeanspruchung wird ganz anders hervorgerufen als z.B. beim ideal-plastischen Baustoff Stahl. Bei der Druckbeanspruchung eines Holzkörpers in Faserrichtung wird das beobachtete «duktilere» Tragverhalten auf dem sichtbaren, makroskopischen Niveau verursacht. Die Holzfasern können örtlich ausknicken, oder die hohlen Holzzellen werden ineinander geschoben. Die Anwendung des Wortes «Plastizität» in dieser Abhandlung bezieht sich auf das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Bild 1. Bei



1
Trapezförmiger Verlauf der Spannungen über dem Querschnitt

Druckbeanspruchung besitzt Holz gemäss dieser engen Betrachtung tatsächlich gewisse Ähnlichkeiten mit Stahl. Daraus ist die Idee entstanden, die klassischen Berechnungsmethoden der Plastizitätstheorie, die bisher bei Stahl- und Betonkonstruktionen häufig angewendet werden, auch im Holzbau einzusetzen.

Die nichtlineare Berechnung kann mit Vorteil für die Biegebemessung von Holzbalken verwendet werden, die auf der Zugseite genügend verstärkt worden sind, damit die Vorteile der duktilen Druckseite besser zur Geltung kommen können. Es gibt viele praktische Möglichkeiten, um einen Biegebalken auf der Zugseite zu verstärken: beispielsweise durch das Aufkleben einer CFK-Lamelle oder zusätzlicher Holzelemente auf beiden Seiten des Steges, damit ein T-Profil mit dem Flansch auf der Zugseite entsteht. Bei zusammengesetzten Querschnitten könnte für den Zugflansch auch eine grössere Fläche als für den Druckflansch vorgesehen werden.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass bei der praktischen Bemessung von Holzbalken viele Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind. Neben dem Biegemoment muss der Querschnitt die Querkraft aufnehmen können. Unter Umständen können Stabilitätsprobleme, wie z.B. Kippen, die Tragfähigkeit beeinträchtigen. Speziell im Hochbau kann das Deformationsverhalten die Bemessung entscheidend beeinflussen. Das Biegemoment ist somit nur eines von vielen Kriterien, die für die Bemessung massgebend sein können. Nur bei der Überprüfung des Biegemomentes kann die Plastizitätstheorie angewendet werden. Bei den anderen aufgeführten Kriterien erfolgen die Überprüfungen durch Anwendung der Elastizitätstheorie. Sind die anderen Kriterien für die Bemessung massgebend, so können die Vorteile der Plastizitätstheorie nicht oder nur teilweise ausgenützt werden.

Die angewendete nichtlineare Berechnungsmethode

Es existieren viele Publikationen über die Anwendung der Plastizitätstheorie für fehlerfreie Holzproben. Baumann (1926) und Thunell (1939) haben Methoden entwickelt, um die merkwürdige Tatsache zu erklären, dass die Biegezugfestigkeit von kleinen, fehlerfreien Holzproben wesentlich grösser ist als die Druckfestigkeit [1]. Die dabei durchgeführten Versuche ergeben meistens eine Abflachung der Kraft-Durchbiegungs-Kurve gegen Ende des Biegeversuches, was die Theorie der Plastifizierung auf der Biegedruckseite bestätigt.

Für Bauholz hingegen ist die Frage der effektiven Spannungsverteilung in einem Biegebalken bis heute nicht restlos geklärt. Anders als bei fehlerfreien Holzproben erhält man bei Bauholz unter Biegebeanspruchung stets einen ziemlich geraden Verlauf der Kraft-Durchbiegungs-Kurve. Die Annahme einer linearen Spannungsverteilung in einem Balken aus Bauholz dient als Grundlage für die Biegebemessung gemäss Eurocode. Die so genannte Biegefestigkeit f_M wurde mathematisch aus Biegeversuchen wie folgt ermittelt:

$$f_M = (M_f / W) \quad \text{mit:}$$

M_f = Bruchmoment
 W = Widerstandsmoment

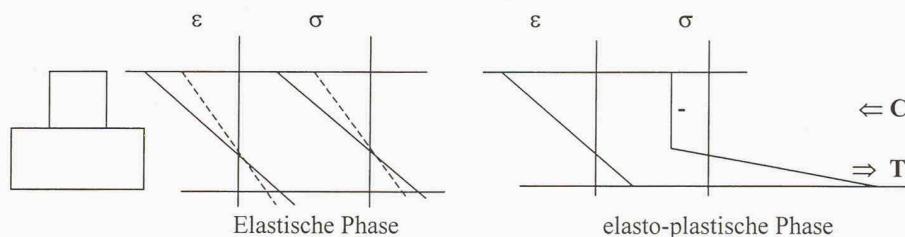
Bei den Versuchen versagen die Balken auf spröde Art auf der Zugseite. Gemäss diesem Modell ist daher die Biegezugfestigkeit f_{tM} gleich gross wie die Biegefestigkeit f_M , während die Biegedruckfestigkeit f_{cM} bzw. Proportionalitätsgrenze grösser sein müsste als die Biegefestigkeit f_M [2]. Die Erfahrung zeigt, dass für Bauholz mit Rechteckquerschnitt diese Berechnung auf der Basis der Elastizitätstheorie zuverlässige Ergebnisse liefert.

Auf der Suche nach Berechnungsgrundlagen für Bauholz, das auf der Zugseite verstärkt wird, schlägt Brun-

	C22	C27	C35	C40	GL28	GL32	GL36
f_M	22	27	35	40	28	32	36
f_c	20	22	25	26	27	29	31
f_{tM}	22	28	37	45	28	32	37
E	10 000	12 000	13 000	14 000	12 000	13 500	14 500

2

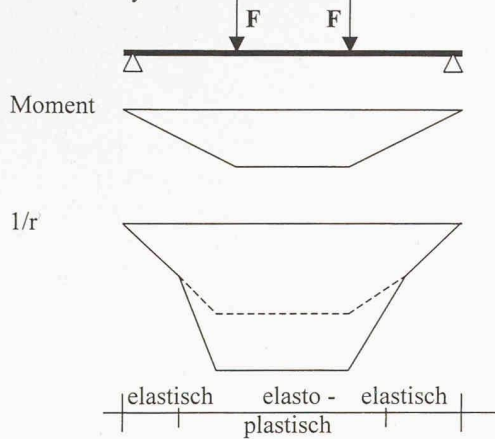
Kennwerte (f_c und f_{tM}) für das angewendete Berechnungsmodell, abgeleitet von den Kennwerten gemäss EN 338 für Bauholz und Brettschichtholz (alle Werte in N/mm²)



3

Dehnungen ϵ und Spannungen σ in einem T-Balken während der anfänglichen elastischen und der späteren elasto-plastischen Phase

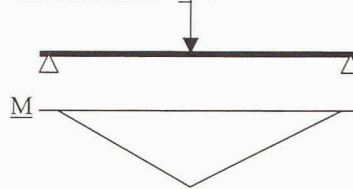
Statisches System:



4

Hinweise zur Deformationsberechnung während der elasto-plastischen Phase

Virtuelle Kraft $F=1$



ner ein alternatives, nichtlineares Modell für die Spannungsverteilung vor [3, 4]. Das Berechnungsmodell kombiniert das frühe Modell von Thunell mit modernen Forschungsergebnissen, die den so genannten Volumeneinfluss beschreiben. Die Zugzone wird durch einen linearen Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve charakterisiert, währenddem bei der Druckbeanspruchung die Kurve nach einem anfänglichen linearen Verlauf in eine «Fliessebene» übergeht. Der E-Modul ist gleich für Zug und Druck (Bild 1). Die Biegedruckfestigkeit f_{CM} wird aus folgenden Gründen mit dem Wert f_C für zentrische Druckbeanspruchung gleichgesetzt:

- Bei Bauholz wird infolge des Volumeneinflusses die Biegedruckfestigkeit gegenüber der Festigkeit bei zentrischer Beanspruchung erhöht, allerdings in weit geringerem Ausmass als die Biegezugfestigkeit [5]. Da die Spannung mit zunehmender Dehnung aber wieder leicht abfällt (Bild 1), ist die Annahme einer konstant bleibenden Biegedruckfestigkeit auf dem Niveau der Druckfestigkeit f_C bei zentrischer Beanspruchung eine sinnvolle Näherung. Diese Annahme entspricht auch den bekannten Regeln der Duktilitätstheorie, wie sie z.B. in den einschlägigen Normen für Stahlbau und Stahlbetonbau zur Anwendung kommen.

- Für Bauholz, das auf der Zugseite genügend verstärkt wurde, ist mit einer «Plastifizierung» auf der Biegedruckseite zu rechnen. Es könnte aus Sicherheitsgründen sinnvoll sein, eher einen unteren Grenzwert für die Biegedruckfestigkeit einzusetzen.

- Das Berechnungsmodell bestätigt den bekannten, fast linearen Verlauf der Kraft-Durchbiegungs-Kurve eines gemäss ENV 408 geprüften Versuchsbalkens [6]. Für sehr schlechte Holzqualität (C14 bis C18 gemäss EN 308) ist die Druckfestigkeit f_C grösser als die Biegezugfestigkeit f_{tM} . Daher erfolgt der Bruch, bevor eine «Plastifizierung» auftreten kann. Für die besseren Holzsorten ergibt die Nachrechnung des Versuchsbalkens aus Kantholz mit diesem Modell zunächst einen linearen Verlauf der Kraft-Durchbiegungs-Kurve, bis die Proportionalitätsgrenze auf der Biegedruckseite erreicht ist. Die nachfolgende Plastifizierung des Querschnittes ist allerdings gering, und die Abweichung der Kurve von

der Geraden ist klein. Nur bei sehr guter Holzqualität (C35 bis C40 gemäss EN 308) erhält man mit diesem Berechnungsmodell eine deutliche Abweichung von der Geraden.

Der Kennwert f_{tM} , die effektive Zugfestigkeit beim Biegebruch, kann aus einem Vergleich der Formeln für das Bruchmoment M_R eines Holzbalkens mit Rechteckquerschnitt hergeleitet werden, berechnet einerseits mit Thunells Modell [1] und andererseits gemäss der Euro-norm EN 338:

$$\begin{aligned} \text{– Thunell: } M_R &= f_C \times (b \times h^2/6) \times c \\ \text{mit } c &= [3 + 8m + 6m^2 - m^4] / (1 + m)^4 \\ \text{und } m &= f_C / f_{tM} \end{aligned}$$

$$\text{– Euronorm EN 338: } M_R = f_M \times (b \times h^2/6)$$

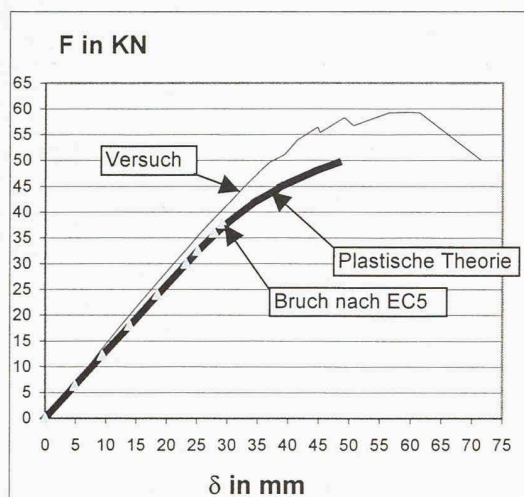
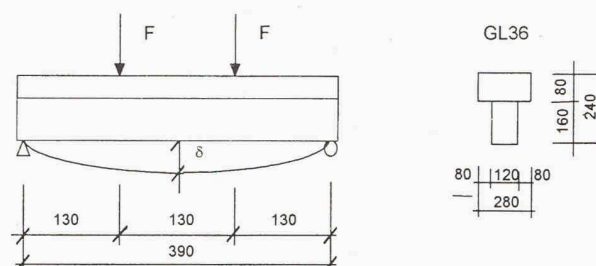
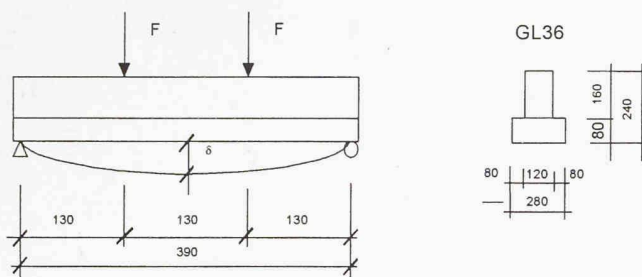
Folgende Gleichung kann zunächst für m und dann für f_{tM} gelöst werden. Wie in Bild 2 gezeigt, ist f_{tM} eigentlich nur wenig grösser als f_M .

$$\begin{aligned} (3 + 8m + 6m^2 - m^4) / (1 + m)^4 &= f_M / f_C \\ \text{mit } m &= f_C / f_{tM} \end{aligned}$$

Vorgehen bei der plastischen Berechnung

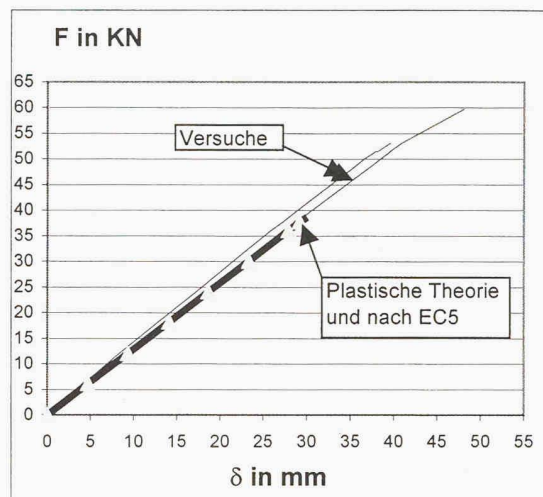
In Bild 3 ist der Querschnitt eines Versuchsbalkens dargestellt. Das anfängliche Tragverhalten kann mit den üblichen elastischen Berechnungsmethoden ermittelt werden. Die Spannungen sind direkt proportional zu den Dehnungen, und die Durchbiegung des Balkens ist direkt proportional zur Belastung. Bei einer genügend grossen Belastung fängt die «Plastifizierung» der Biegedruckzone an, während sich die Biegezugzone nach wie vor elastisch bis zum plötzlichen Versagen verhält.

Die Berechnung der elasto-plastischen Phase ist wesentlich anspruchsvoller als die der elastischen Phase. Der Biegebruch tritt ein, wenn die Biegezugfestigkeit f_{tM} erreicht wird. Durch Probieren wird die Lage der neutralen Achse gesucht, bis die inneren Druckkräfte (C) mit den Zugkräften (T) im Gleichgewicht sind. Dabei wird für jeden angenommenen Dehnungsverlauf der zugehörige Spannungsverlauf gemäss Bild 1 ermittelt. Die Durchbiegungen sind während der elasto-plastischen Phase nicht proportional zur Belastung. Aus dem Verlauf des Biegemomentes (Bild 4) werden zwei Hauptbereiche unterschieden. Im Bereich, wo die



5

T-Balken, Zug im Flanshbereich



6

T-Balken, Zug im Stegbereich

Druckfestigkeit f_C im Querschnitt nirgends erreicht wird, verhält sich der Balken vollständig elastisch. Der andere Bereich zeigt ein elasto-plastisches Tragverhalten. Die Krümmung des Balkens in den zwei Bereichen kann mit folgenden bekannten statischen Regeln ermittelt werden (siehe z.B. [7]):

- elastischer Bereich: $1/r = M/EI$
(Moment dividiert durch Biegesteifigkeit)
- elasto-plastischer Bereich: $1/r = (\epsilon_T - \epsilon_C)/h$
(Dehnungsunterschiede oben und unten auf dem Querschnitt dividiert durch Balkenhöhe)

Die Durchbiegung kann mit der Arbeitsgleichung wie folgt ermittelt werden:

- $\delta = \int [\frac{M(x)}{EI} * 1/r(x)] dx$
($M(x)$ = «Moment» infolge der virtuellen Kraft, die der gesuchten Deformation entspricht)

Man vergleiche dazu Bild 4 mit Hinweisen zur Deformationsberechnung während der elasto-plastischen Phase.

Belastungsversuche

Bei den Belastungsversuchen im Vierpunktverfahren gemäss ENV 408 ging es um die Kernfrage, ob es möglich ist, das duktile Tragverhalten von Holzbalken zu verbessern, indem man die kritische Zugseite genügend verstärkt. Die Versuche boten auch eine gute Gelegenheit zur Klärung der Eignung der oben vorgestellten plastischen Berechnungsmethode für die Abschätzung des Tragverhaltens.

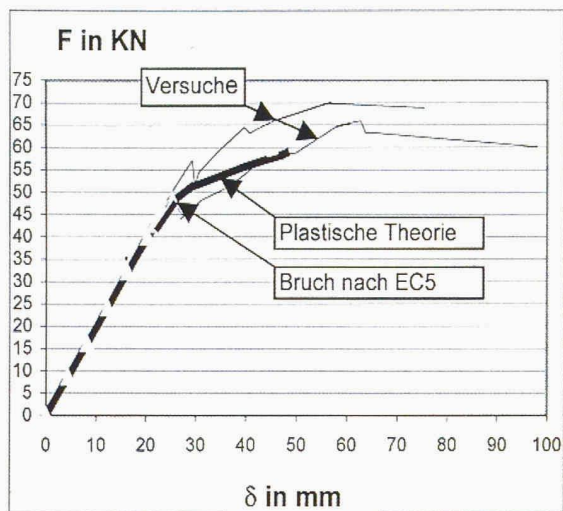
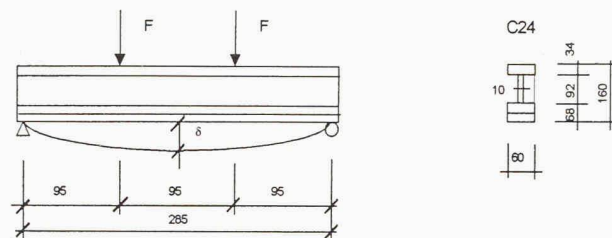
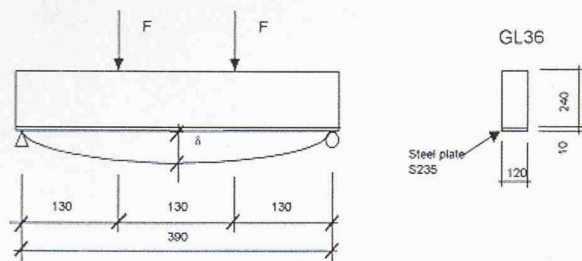
Für die Nachrechnung der Versuche hat man die Materialkennwerte gemäss der Euronorm EN 338 (Bild 2)

eingesetzt. Die vom Lieferanten angegebene Holzqualität wurde mit Ultraschallmessungen überprüft. Es wurden nur leichte Abweichungen zu den normierten Werten festgestellt. Da die Normwerte eigentlich Mindestwerten (5 %-Fraktile) entsprechen, ergaben die Berechnungen im Vergleich zu den Messungen eher konservative Werte. Die Raumtemperatur lag bei allen Versuchen bei 20 °C, die Messwerte der Holzfeuchtigkeit lagen zwischen 11 % und 13 %.

Bei der Verstärkung der Biegezugzone wurde das Schubproblem sorgfältig studiert. Für die Verbindung der Verstärkungselemente auf der Zugseite wurden neben dem Klebstoff auch Bolzen (System Ferwood [8]) und Schrauben eingesetzt.

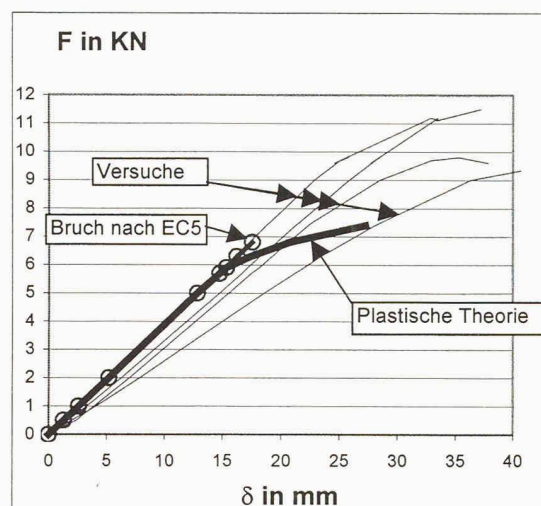
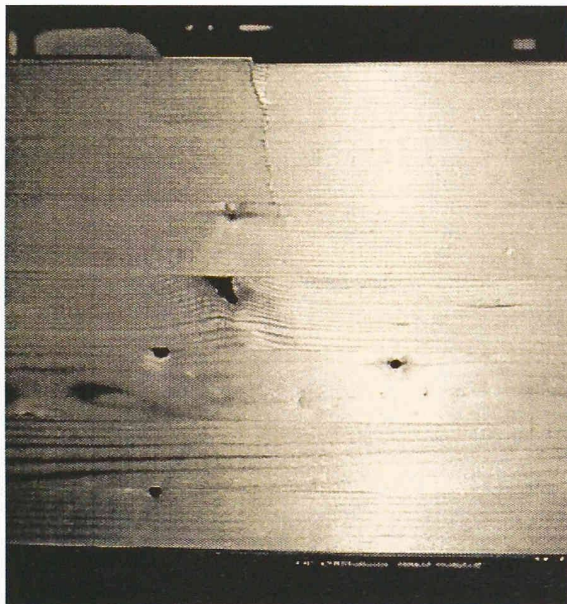
In Bild 5 werden der Versuchsaufbau und die Versuchsergebnisse für einen T-Balken mit dem Flansch auf der Zugseite unten dargestellt. Von den zwei Probekörpern versagte der eine vorzeitig infolge Schub. Beim verbleibenden Probekörper wurde das von der plastischen Berechnungsmethode vorausgesagte duktile Tragverhalten bestätigt.

In der zweiten Versuchsserie wurde der gleiche T-Balken getestet, diesmal jedoch mit dem Flansch oben auf der Druckseite. Das Tragverhalten war spröde, wie von der Berechnungsmethode vorausgesagt (Bild 6). Allerdings war für beide Probekörper die Bruchlast wesentlich grösser als berechnet – offensichtlich war die Holzqualität besser als der Normwert. Nach der plastischen Berechnungsmethode hätte der Biegezugwiderstand wesentlich kleiner sein sollen als derjenige des identischen T-Balkens mit Zug im Flanshbereich. Diese wichtige



7

Versuche mit einem Holzbalken, der mit einem auf der Zugseite aufgeklebten Stahlblech verstärkt war. Deutlich ersichtlich unten: die Holzstauchung auf der Biegedruckseite



8

I-Balken, auf Zugseite verstärkt

Aussage konnte mit nur drei Versuchskörpern nicht bestätigt werden.

In der dritten Versuchsserie kamen zwei Holzprobekörper zum Einsatz, die auf der Zugseite mit einem aufgeklebten Stahlblech verstärkt waren. Durch die Plastifizierung sowohl im Holz auf der Biegedruckseite wie auch im Stahlblech auf der Zugseite ergab sich ein besonders hohes duktiles Tragverhalten, wie von der Theorie vorausgesagt worden war (Bild 7). Auf der rechten Seite ist die Stauchung in der Biegedruckzone deutlich sichtbar.

In den letzten beiden Versuchsserien kamen I-Balken zum Einsatz, die auf der einen Seite mit einem aufgeklebten Holzbrett verstärkt wurden. Vier Proben wurden mit der Verstärkung oben auf der Druckseite getestet, die anderen vier mit der Verstärkung unten auf der Zugseite. Um die Gefahr eines vorzeitigen Schubversagens zu bannen, wurden bei allen Proben zusätzliche seitliche Lamellen aus Spanplatten aufgeklebt. Die Versuche haben die Resultate des plastischen Berechnungsmodells weit gehend bestätigt. Die Balken mit der Verstärkung auf der Zugseite erreichten höhere Traglasten und wiesen ein duktiles Tragverhalten auf (Bild 8), während sich die I-Balken mit der Verstärkung auf der Druckseite spröde verhielten.

Schlussfolgerungen

Die Hauptaussagen dieses Artikels können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bisher ist der Rechteckquerschnitt die Regel im Holzbau. Seit einigen Jahren findet man auf dem Markt

auch Holzbalken mit zusammengesetzten Querschnitten, die für Spezialaufgaben immer mehr zum Einsatz kommen.

– Die Schwachstelle eines Holzbalkens liegt in der spröden Zugzone. Beim Entwurf eines Balkens mit zusammengesetztem Querschnitt kann es sinnvoll sein, die heikle Zugzone ungleich mehr als die duktile Druckzone zu verstärken.

– Holzbalken, die in der Zugzone verstärkt sind, können ein verbessertes duktilen Tragverhalten aufweisen.

– Das Tragverhalten solcher Balken kann am besten mit einer nichtlinearen Bemessungsmethode nachgerechnet werden. Die elastische Berechnungsmethode gemäss den europäischen Holzbaunormen eignet sich schlecht für ein duktilen Tragwerk.

Belastungsversuche mit Holzbalken, die nur in der Zugzone verstärkt sind, bestätigen die Voraussagen der vorgestellten, plastischen Berechnungsmethode. Es ist offenbar möglich, duktile Holzbalken zu entwerfen, indem man sie auf der spröden Zugseite genügend verstärkt. Diese wichtige Aussage wird in anderen Versuchsberichten bestätigt, z.B. [9], [10]. In dieser Arbeit wird ein mit konkreten Zahlenwerten beschriebenes Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Bauholz vorgeschlagen, das beim Entwurf und bei der vollständigen Berechnung des Tragverhaltens von duktilen, auf der Zugseite verstärkten Holzbalken hilfreich eingesetzt werden könnte.

Maurice Brunner, dipl. Bauingenieur ETH/SIA,
Marco Schnüriger, dipl. Bauingenieur ETH,
SH-Holz, Solothurnstr. 102, 2504 Biel, René
Oguey, dipl. Bauingenieur ETH/SIA, EIVD, route de
Cheseaux 1, 1400 Yverdon-les-Bains

Literatur

- [1] Kollmann/Côté: Technologie des Holzes und der Werkstoffe, Abschnitt 7.4, Springer Verlag, Berlin 1984.
- [2] Gehri E.: Normkonzept, Einführung in die Norm SIA 164, Publikation Nr. 81–1, S. 12, ETH Zürich 1981.
- [3] Brunner M.: Zum plastischen Tragverhalten von Holzbalken, SI+A Nr. 25/2000, Zürich, Juni 2000.
- [4] Brunner M.: Strengthening of old timber beams on the tension side only – a plastic design approach, International Workshop on Urban Heritage and Building Maintenance VI, ETH Zurich, September 2000.
- [5] Steiger R.: Mechanische Eigenschaften von schweiz. Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M-N-Belastung, IBK-Bericht Nr. 221, Birkhäuser-Verlag, Basel, Juni 1996.
- [6] Brunner M.: Schnüriger M.: Möglichkeiten der nichtlinearen Bemessung für biegezugseitig verstärkte Holzbalken, unveröffentlichter Bericht der SH-Holz, Biel 2001.
- [7] Hugi H.: Einführung in die Statik der Tragkonstruktionen, Verlag der Fachvereine Zürich, ETH Zürich 1992.
- [8] Oguey R.: Ferwood, un assemblage hi-tech invisible, Conférence, Nancy 1999.
- [9] Fuhrer Ch., Steurer A.: Massnahmen zur Leistungssteigerung bei Kleinquerschnitten in Holz, IBK-Bericht 208, ETH Zürich 1995.
- [10] Tingley D.: Fibre reinforced technology: Information Packet. Wood Composites Engineering, 6320 SW Reservoir Avenue, Corvallis OR, 97333-2939.

Bilder

Schweizerische Hochschule für die Holzwirtschaft Biel