

Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen

J. Ehlbeck und F. Colling, Universität Karlsruhe

Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen *

J. Ehlbeck und F. Colling, Universität Karlsruhe

1 Allgemeines

Im Rahmen der 1. Stufe eines Forschungsvorhabens über das Tragverhalten von Biegeträgern aus Brettschichtholz (BSH) [2] wurde ein Rechenmodell entwickelt, mit dem die Tragfähigkeit von BSH-Biegeträgern berechnet werden kann. In diesem Rechenmodell, das auf der Methode der Finiten Elemente basiert, werden die Brettlamellen in 15 cm lange Brettabschnitte (im folgenden Zellen genannt) unterteilt. Kennt man die Rohdichte und die Ästigkeit jeder Zelle, so können ihr Elastizitätsmodul und ihre

Festigkeit mit Hilfe von Regressionsgleichungen berechnet werden. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß zwei Zellen mit gleicher Rohdichte und Ästigkeit unterschiedliche Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften besitzen können, werden aus den Reststreuungen der Regressionsgleichungen zufällige Werte (die auch negativ sein können) gewählt und den berechneten Werten hinzugezählt. Diese Reststreuungen sind aus Versuchen (siehe z. B. [3]) bekannt und sind repräsentativ für das in den deutschen

Leimbaubetrieben verwendete Schnittholz. Sind jedoch weder die Ästigkeit noch die Rohdichte der Bretter bekannt, so muß der Aufbau eines BSH-Trägers simuliert werden, d. h. jeder Zelle müssen Werte für die Rohdichte und die Ästigkeit in einem Simulationsprogramm zugeordnet werden. Untersuchungen über die Ästigkeitsverteilung von insgesamt 456 Brettern [4] ermöglichen eine Simulation der Ästigkeit in Brett längsrichtung unter Berücksichtigung der durch das Wachstum des Baumes bedingten Regelmäßigkeiten. Die Rohdichte eines Brettes wurde wie in [2] als über die Brettlänge konstant angenommen. Eine weitere Verbesserung des Rechenmodells konnte durch Untersuchungen über den Elastizitätsmodul von 640 Brettabschnitten aus insgesamt 100 Brettern [5] erreicht werden. Es zeigte sich dabei, daß die Streuung des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes geringer ist als die Reststreuung der allgemeinen, für das gesamte Holzangebot gültigen Regressionsgleichungen.

Weiterhin wurden in zwei Leimbaubetrieben Untersuchungen über die in einem BSH-Träger auftretenden Keilzinkenabstände (= Länge der eingebauten Bretter) durchgeführt. Hierbei ergaben sich deutliche Unterschiede, die auf die jeweilige Gütesortierpraxis der beiden Betriebe zurückzuführen sind. Während bei der einen Firma etwa 85 % aller Bretter ungekürzt in den BSH-Träger eingebaut wurden, war dies bei der anderen Firma nur bei etwa 30 % der Bretter der Fall. Hier bestand der überwiegende Teil aus gekappten, gekürzten Brettern, die durch das Herausschneiden von großen Fehlstellen (Äste) entstehen.

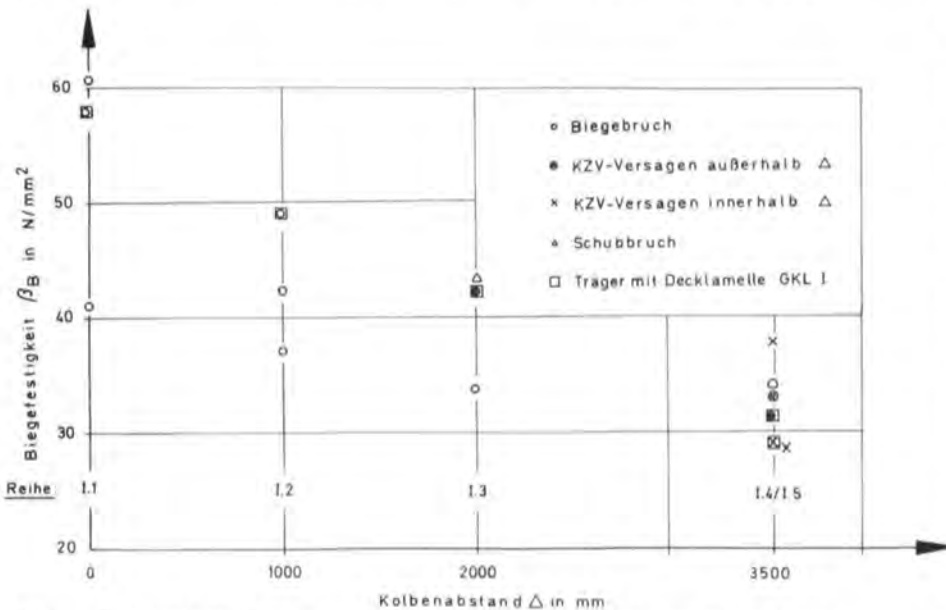


Bild 1: Biegefestigkeit β_B in Abhängigkeit vom Kolbenabstand Δ (Höhe $H = 330$ mm)

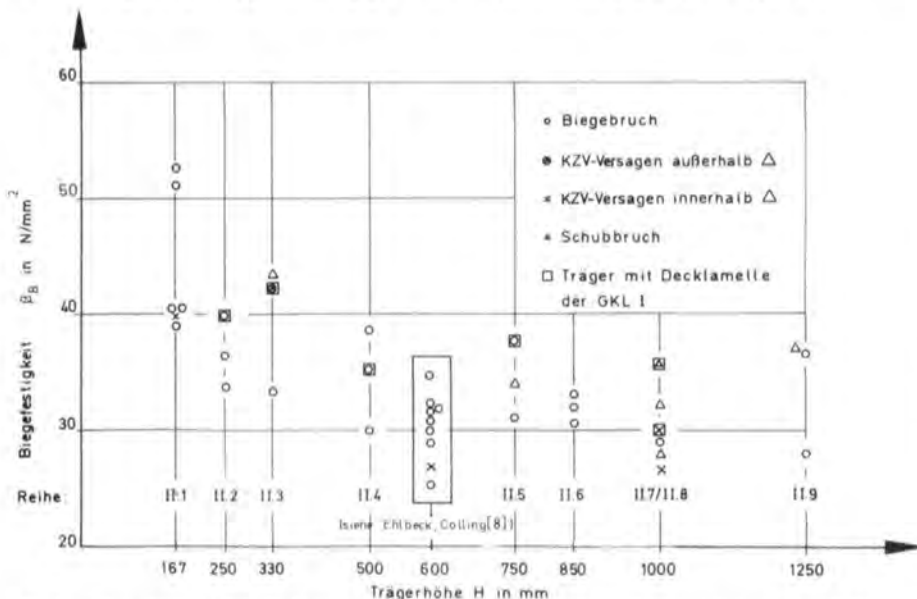


Bild 2: Biegefestigkeit β_B in Abhängigkeit von der Trägerhöhe H (Kolbenabstand $\Delta = 2000$ mm)

* Kurzfassung der Karlsruher Untersuchungen eines gemeinsamen Karlsruher / Münchner Forschungsvorhabens [1]

Tabelle 1: Trägerabmessungen, Versuchsanordnung und Versuchsergebnisse (Serie I)

Versuch Nr.	Trägerabmessungen			Elastizitätsmodul E N/mm ²	Biegefestigkeit		Bruchursache
	L mm	Δ mm	H mm		Einzelwert β _B N/mm ²	Mittelwert β̄ _B N/mm ²	
I.1-1 I.1-2 I.1-3	3750	0	330	10 420 11 990 9 760	57,1 60,8 40,9	52,9	Ast Ast Ast
I.2-1 I.2-2 I.2-3	3750	1000	330	11 880 10 500 9 800	49,2 42,5 37,2	43,0	Ast Ast Ast
I.3-1 I.3-2 I.3-3	4650	2000	330	12 280 12 460 11 270	42,4 43,1 33,4	39,6	KZV ¹ außerhalb von Δ: β _B = 26,1 N/mm ² Schubversagen bei τ = 2,7 N/mm ² Ast
I.4-1 I.4-2 I.4-3	6900	3500	330	12 460 11 820 12 730	31,7 34,2 33,3	33,1	KZV ¹ außerhalb von Δ: β _B = 27,8 N/mm ² Ast KZV ¹ außerhalb von Δ: β _B = 28,4 N/mm ²
I.5-1 I.5-2 I.5-3	6900	3500	330	13 350 11 450 10 220	29,2 37,9 29,1	32,1	KZV ¹ KZV ¹ KZV ¹

¹ KZV = Keilzinkenverbindung

Für die Simulationen wurde eine »gemittelte« Verteilung verwendet, d. h. es wurde davon ausgegangen, daß jeweils die Hälfte der Bretter ungekürzt bzw. gekürzt eingebaut wird. Hierbei wurde für die entsprechenden Brettängen jeweils eine Normalverteilung mit einem Mittelwert von 4,30 m bzw. 2,15 m bei einer Standardabweichung von 0,70 m bzw. 0,50 m zugrunde gelegt.

2 Vergleichende Keilzinken-Zugversuche

Die im ersten Teil dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Biegeversuche mit 330 mm hohen BSH-Trägern zeigten deutlich, daß ihre Biegefestigkeit in besonderem Maße von der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen abhängig ist. Aus diesem Grunde wurde die Zugfestigkeit der am Herstellungstag der Versuchsträger (siehe Abschnitt 3) produzierten Keilzinkenverbindungen bestimmt. Aus den insgesamt 21 Versuchen ergab sich eine mittlere Zugfestigkeit von 32,7 N/mm² bei einer Standardabweichung von 6,8 N/mm².

3 Trägerversuche

Eine Aufgabe innerhalb dieses Projektes war es, den Einfluß der Trägergröße auf die Biegefestigkeit von BSH-Trägern (Volumeneffekt) zu untersuchen. Während bei allen Versuchen die Trägerbreite mit B = 100 mm konstant gehalten wurde, wurde der Einfluß der Trägerlänge und -höhe getrennt in zwei Versuchsserien untersucht:

Serie I (Versuchsreihe I.1 bis I.5): bei konstanter Trägerhöhe (H = 330 mm) wurde der Kolbenabstand Δ (= Abstand zwischen den Einzellasten) variiert: Δ = 0 bis 3500 mm;

Serie II (Versuchsreihe II.1 bis II.9): bei konstantem Kolbenabstand (Δ = 2000 mm) wurde die Trägerhöhe zwischen H = 167 mm und 1250 mm variiert.

Von nahezu allen Versuchsträgern waren die Eigenschaften der beiden äußeren Lamellen auf der Zugseite bekannt, und zwar Lage und Größe der Äste, Rohdichte sowie dynamischer Elastizitätsmodul (siehe [6]) der Bretter. Hierbei wurden im Gegensatz zu früheren Versuchen an die Lamellen keine besonderen Anfor-

Tabelle 2: Trägerabmessungen, Versuchsanordnung und Versuchsergebnisse (Serie II)

Versuch Nr.	Trägerabmessungen			Elastizitätsmodul E N/mm ²	Biegefestigkeit		Bruchursache
	L mm	Δ mm	H mm		Einzelwert β _B N/mm ²	Mittelwert β̄ _B N/mm ²	
II.1-1 II.1-2 II.1-3	3 700	2000	167	— — —	38,9 40,3 40,3	43,9	Ast Ast Ast
II.1-4 II.1-5 II.1-6	—	—	—	— — —	51,1 52,6 39,9	—	Ast Ast KZV ²
II.2-1' II.2-2' II.2-3'	3 300	2000	250	12 660 12 280 11 590	39,9 33,6 36,4	36,6	Ast Ast Ast
II.3-1 II.3-2 II.3-3	4 650	2000	330	12 280 12 460 11 270	42,4 43,1 33,4	39,6	KZV ² außerhalb von Δ: β _B = 26,1 N/mm ² Schubversagen bei τ = 2,7 N/mm ² Ast
II.4-1' II.4-2' II.4-3'	4 650	2000	500	10 960 10 430 10 610	35,3 38,5 29,9	34,6	Ast Ast Ast
II.5-1 II.5-2 II.5-3	6 000	2000	750	10 730 10 220 9 730	37,7 34,1 31,1	34,2	Ast Schubversagen bei τ = 3,2 N/mm ² Ast
II.6-1 II.6-2 II.6-3	9 000	2000	850	9 750 10 140 10 750	30,5 32,0 33,0	31,8	Ast Ast Ast
II.7-1 II.7-2 II.7-3'	7 500	2000	1000	9 640 9 940 8 680	35,6 28,1 28,9	30,9	Schubversagen bei τ = 3,2 N/mm ² Schubversagen bei τ = 2,6 N/mm ² Ast
II.8-1' II.8-2 II.8-3'	7 500	2000	1000	10 780 10 680 9 730	30,0 31,9 26,9	29,6	KZV ² Schubversagen bei τ = 2,9 N/mm ² KZV ²
II.9-1 II.9-2 II.9-3	11 800	2000	1250	9 950 9 720 10 030	36,6 27,9 36,8	33,8	Ast Ast Schubversagen bei τ = 2,3 N/mm ²

¹ Die Tragfähigkeit dieser Träger wurde zusätzlich mit Hilfe des Rechenmodells berechnet (siehe Abschnitt 4.1)

² KZV = Keilzinkenverbindung

derungen gestellt, sondern die Bretter wurden in beliebiger Reihenfolge den einzelnen Versuchsträgern zugeordnet. Jeweils einer von drei Trägern einer Versuchsreihe besaß eine Decklamelle der Güteklasse I nach DIN 4074, während die anderen Träger ausschließlich aus Brettern der Güteklasse II aufgebaut waren.

Um zu verhindern, daß ein beim Holz möglicherweise vorhandener Volumeneinfluß durch die »Fehlstelle« Keilzinkenverbindung verwischt wird, wurde weiterhin darauf geachtet, daß in den beiden äußeren Zuglamellen keine Keilzinken im hochbeanspruchten Bereich lagen. Lediglich bei zwei vergleichenden Versuchsreihen (Reihe I.5 und II.8) wurden planmäßig Keilzinken in den Bereich zwischen den Einzellasten angeordnet. Die Trägerabmessungen, Lastanordnungen sowie die Versuchsergebnisse sind in **Tabelle 1** und **2** angegeben und in **Bild 1** und **2** graphisch dargestellt.

Aus **Bild 1** ist zu erkennen, daß die Biegefestigkeit von BSH-Trägern mit Holzversagen mit wachsendem Kolbenabstand deut-

lich abnimmt. Tritt jedoch eine Keilzinkenverbindung im hochbeanspruchten Bereich auf, so wächst auch die Wahrscheinlichkeit, daß diese für das Versagen verantwortlich ist. Bei BSH-Trägern mit baupraktischen Abmessungen kommt die in Bild 1 dargestellte Abhängigkeit somit nicht zum Tragen. Der Einfluß der Trägerlänge wird hier vornehmlich von der Auftretenshäufigkeit einer Keilzinkenverbindung im hochbeanspruchten Bereich bestimmt.

In Bild 2 ist zu erkennen, daß die Tragfähigkeit von BSH-Trägern mit wachsender Trägerhöhe abnimmt. Ab einer Höhe von $H = 500$ mm kann die Biegefestigkeit jedoch als konstant angesehen werden.

Auffallend an diesen Versuchen ist, daß insgesamt 6 Träger infolge eines Schubversagens bei geringen, rechnerischen Schubspannungen (zwischen 2,3 und 3,2 N/mm²) in den Leimfugen zu Bruch gingen. Vergleichende Scherversuche ergaben, daß bei den Versuchsträgern die Scherfestigkeit in der Leimfuge ca. 30 % geringer war als die Scherfestigkeit des Holzes. Somit waren die beobachteten Schubbrüche auf vergleichsweise schwache Leimfugen zurückzuführen.

Für die Träger mit $H \geq 250$ mm und $\Delta \geq 2000$ mm, bei denen das Versagen auf einen Holzfehler zurückzuführen war, ergab

sich aus diesen Versuchen eine mittlere Biegefestigkeit von 33,7 N/mm² bei einer Standardabweichung von 3,5 N/mm².

Für die Träger mit $H \geq 330$ mm, bei denen das Versagen auf eine Keilzinkenverbindung zurückzuführen war, ergab sich eine mittlere rechnerische Biegefestigkeit von 29,4 N/mm² bei einer Standardabweichung von 3,7 N/mm². Hierbei wurde für die Keilzinkungen, die nicht im hochbeanspruchten Bereich zwischen den Einzellasten lagen, mit der an der Stelle der Keilzinkung vorhandenen Biegerandspannung gerechnet. Vergleicht man die mittlere Biegefestigkeit dieser Träger mit der in Abschnitt 2 ermittelten Keilzinkenzugfestigkeit von 32,7 N/mm², so erkennt man, daß beide Festigkeitswerte in der gleichen Größenordnung liegen. Dies zeigt, daß im Bereich der Keilzinkung keine Festigkeitssteigerung infolge Verleimen der Brettlamellen (sog. Laminierungseffekt) zu erwarten ist. Auch konnte bei diesen Trägern kein Einfluß der Trägerhöhe festgestellt werden, denn die Bruchspannungen an der Stelle der Keilzinkung lagen bei den 330 mm hohen Trägern in der gleichen Größenordnung wie bei den 1000 mm hohen Trägern.

4 Berechnungen mit dem »Karlsruher Rechenmodell«

4.1 Versuchsträger

Mit Hilfe des weiterentwickelten Rechenmodells wurde die Tragfähigkeit von 9 beliebig ausgewählten Versuchsträgern (s. Tabelle 2) berechnet. Von den beiden äußeren Zuglamellen dieser Träger waren die Ästigkeit, die Rohdichte und der Elastizitätsmodul sowie die Lage der Keilzinkungen bekannt. Für jeden dieser Versuchsträger wurden 30 Simulationsrechnungen durchgeführt. Bei der Auswertung wurde unterschieden, ob eine Keilzinkung oder ein Holzfehler (Ast) für das Versagen verantwortlich war. Anhand der Auftretenshäufigkeit dieser beiden Versagensarten ist es mit Hilfe der Berechnungen möglich, auch die wahrscheinliche Bruchursache des Trägers vorherzusagen. Hierbei konnte in allen Fällen eine Übereinstimmung zwischen der erwarteten und der im Versuch festgestellten Bruchursache erzielt werden.

In Bild 3 ist der Vergleich zwischen Rechen- und Versuchsergebnissen dargestellt. Die Abweichungen zwischen berechneter und ermittelter Tragfähigkeit betragen höchstens 10 %. Bei den im Rahmen der 1. Stufe dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Simulationsrechnungen wurden in 9 von 24 Fällen Abweichungen festgestellt, die größer als 10 % betragen (in Einzelfällen sogar bis zu 30 %!). Die erreichte Verbesserung des Rechenmodells ist zum einen auf die Berücksichtigung der geringeren Streuung des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes zurückzuführen, zum anderen war auch die Kenntnis der am Herstellungstag der BSH-Träger produzierten Keilzinkenqualität von großer Wichtigkeit.

4.2 Tragfähigkeit von BSH-Trägern unter Berücksichtigung verschiedener Gütesortierkriterien

In diesem Abschnitt wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Holzsortierungen – visuell, maschinell und kombiniert visuell/maschinell – auf die Biegefestigkeit von BSH-Trägern untersucht. Die Anforderungen, die hierbei an die beiden äußeren Zuglamellen gestellt wurden, sind in Tabelle 3 angegeben. Von jeder Reihe wurden 30 Simulationsrechnungen durchgeführt. Insgesamt wurde die in Tabelle 3 angegebene Serie (bestehend aus den 7 Reihen) dreimal durchgerechnet, und zwar mit folgenden Variationen:

- Serie (A): ● Keilzinkenabstände nach Larsen [7] (Mittelwert 4,30 m, Standardabweichung 0,71 m)
- Keilzinkenqualität, wie sie im Mittel von den deutschen Leimbaubetrieben hergestellt wird [2] (mittlere Zugfestigkeit 34,8 N/mm², Standardabweichung 8,4 N/mm²)

Tabelle 3: Anforderungen an die Bretter der beiden äußeren Zuglamellen

Sortierung	Reihe	Anforderungen an die Bretter		
		Ästigkeit ²	Darr-Rohdichte ρ_0 g/cm ³	Elastizitätsmodul E N/mm ²
visuell	Kl. I Kl. II KAR	Gkl. I' Gkl. II' KAR $\leq 0,10$	- -	- -
maschinell	RHO EMO	Gkl. II Gkl. II	$\rho_0 \geq 0,50$ -	- E $\geq 15\ 000$
visuell/ maschinell	KARHO KAREMO	KAR $\leq 0,10$ KAR $\leq 0,10$	$\rho_0 \geq 0,50$ -	- E $\geq 15\ 000$

¹ nach [4]

² KAR-Wert = auf den Brettquerschnitt bezogene Astfläche (Knot Area Ratio)

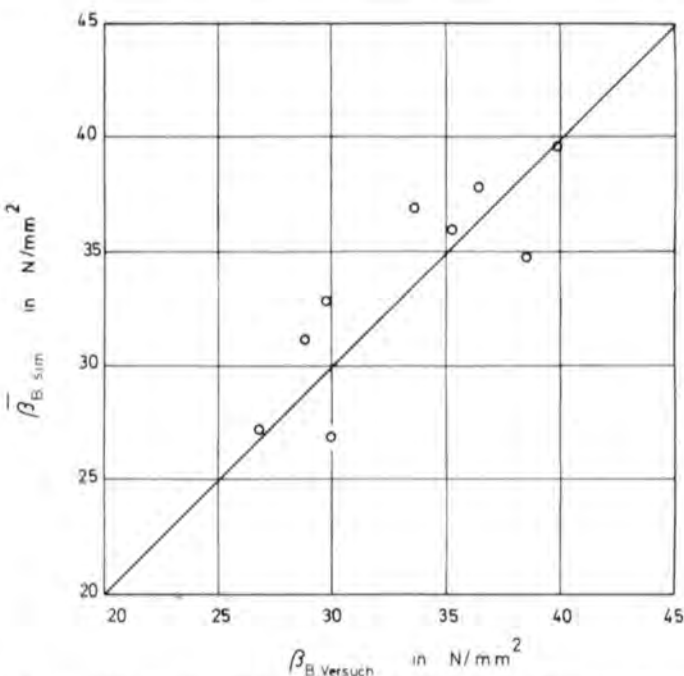


Bild 3: Vergleich zwischen mittlerer, berechneter Biegefestigkeit $\bar{\beta}_{B, \text{sim}}$ und tatsächlicher Biegefestigkeit $\beta_{B, \text{Versuch}}$

Serie (B): ● Keilzinkenabstände nach Abschnitt 1 (geringere Abstände wegen der gekappten Bretter)
 ● Keilzinkenqualität wie bei Serie (A)
 Bei dieser Serie sollte der Einfluß von häufiger auftretenden Keilzinkenverbindungen untersucht werden.

Serie (C): ● Keilzinkenabstände wie bei Serie (B)
 ● 20 % höhere Keilzinkenzugfestigkeiten als bei Serie (A) und (B)
 Bei dieser Serie sollten die Auswirkungen von erhöhten Keilzinkenzugfestigkeiten untersucht werden.

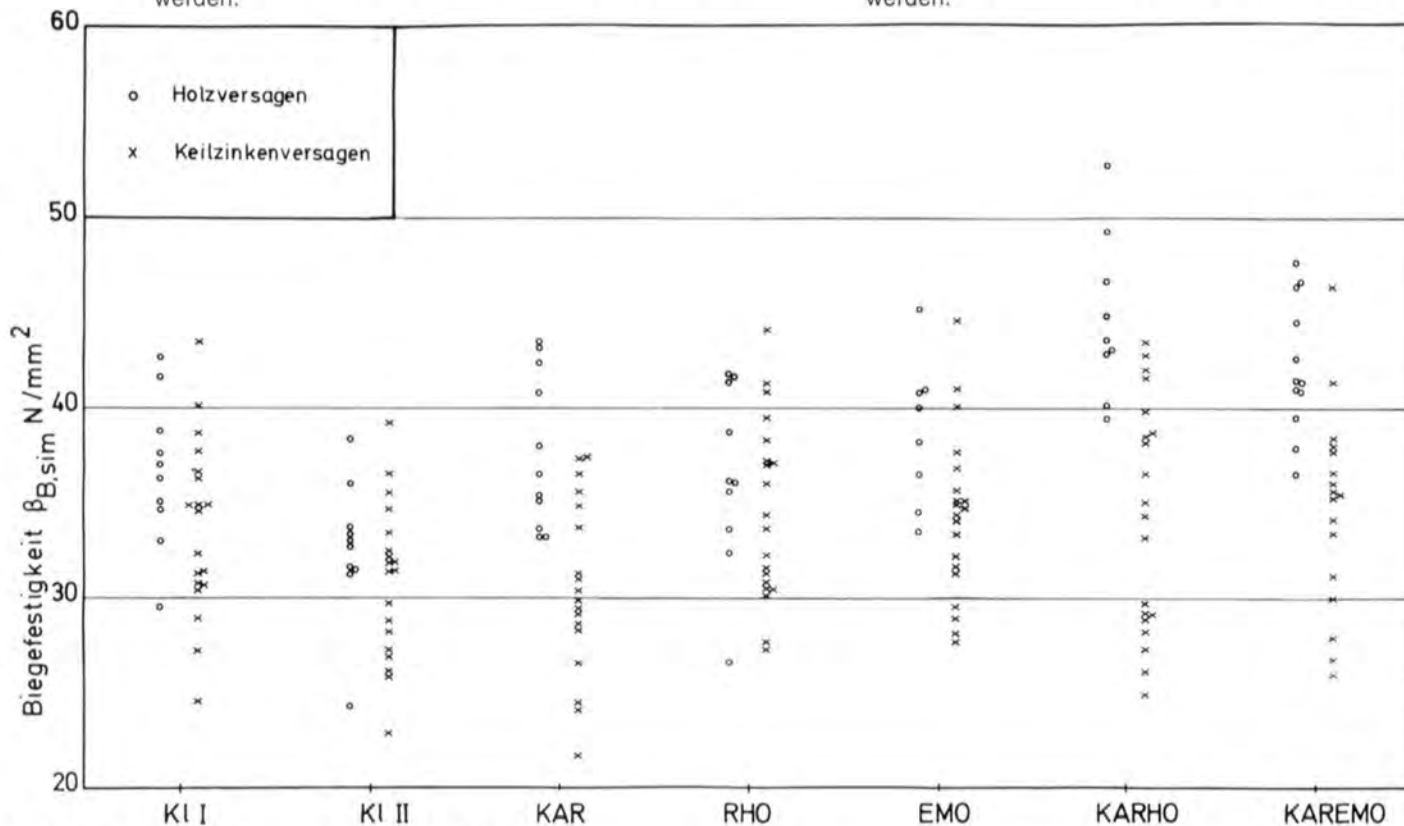


Bild 4: Ergebnisse der Berechnungen, Serie (A)

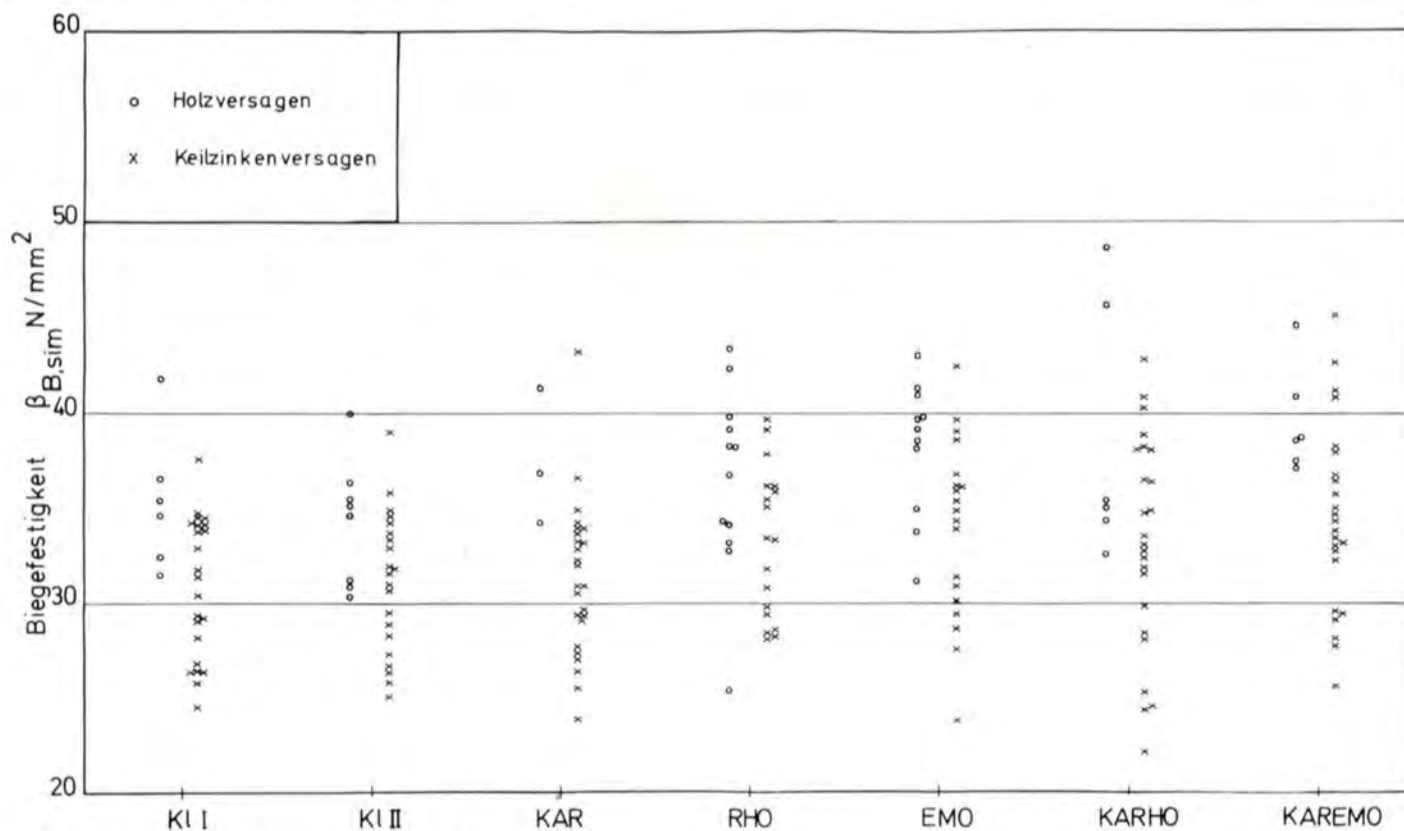


Bild 5: Ergebnisse der Berechnungen, Serie (B)

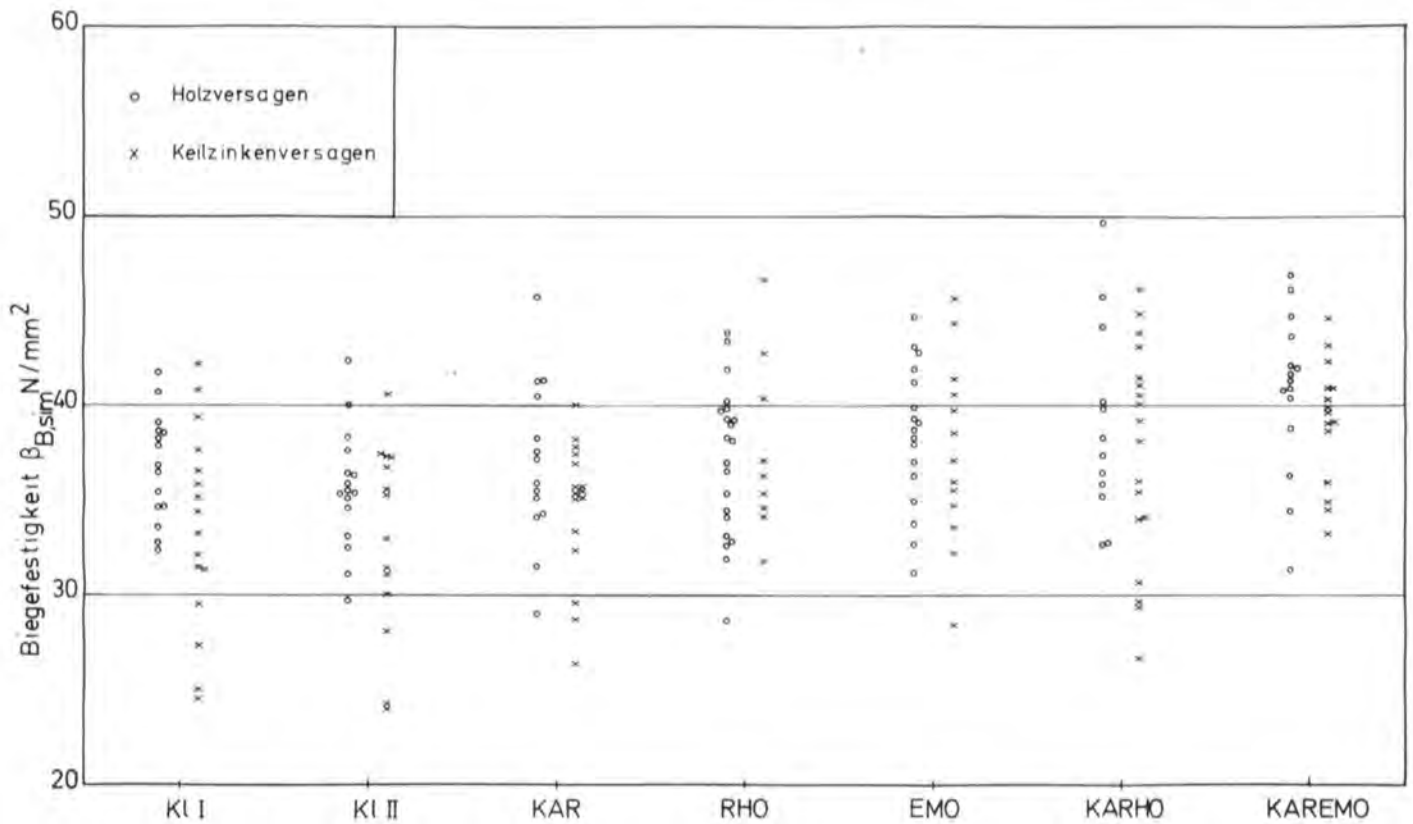


Bild 6: Ergebnisse der Berechnungen, Serie ©

Bei der Auswertung der Rechenergebnisse wurde wiederum unterschieden, ob ein Holzfehler (Ast) oder eine Keilzinkenverbindung für das Versagen verantwortlich war. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild 4 bis 6 dargestellt. Aus Bild 4 und 5 ist zu erkennen, daß infolge der häufiger auftretenden Keilzinkenverbindungen bei Serie © der Anteil der Träger mit Keilzinkenversagen (ca. 75%) höher ist als bei Serie A (ca. 65%). Die Biegefestigkeit der Träger der Serie © orientiert sich somit stärker an der geringeren Keilzinkenfestigkeit, was zu einem Absinken der (mittleren) Tragfähigkeit dieser Träger führt. Eine Erhöhung der Keilzinkenzugfestigkeit (Serie ©) bewirkt, daß der Anteil der Träger mit Keilzinkenversagen wieder abnimmt (ca. 50%), so daß im Mittel höhere Biegefestigkeiten möglich sind.

Besonders bei den Serien B und © ist die Tendenz erkennbar, daß eine Verschärfung der visuellen Sortierung nur bedingt zu einer Festigkeitserhöhung führt, weil dies ein häufigeres Auftreten eines Keilzinkenversagens bewirkt, so daß die höhere Holzfestigkeit nicht ausgenutzt werden kann.

Erst mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung anhand der Rohdichte (Reihe RHO) bzw. des Elastizitätsmoduls (Reihe EMO) der Bretter sind höhere Keilzinkenfestigkeiten und somit auch höhere Tragfähigkeiten der BSH-Träger möglich (bei gleichzeitig weniger häufigem Auftreten eines Keilzinkenversagens). Die Holzfestigkeit und die Keilzinkenfestigkeit dieser Träger gleichen sich an, was auch zu einer Reduzierung der Streuung führt.

Der Nachteil einer Sortierung, welche nur einen Sortierparameter berücksichtigt, liegt darin, daß z. B. der festigkeitssteigernde Einfluß eines kleinen Astes durch eine geringe Rohdichte genauso zunichte gemacht werden kann, wie der festigkeitssteigernde Einfluß einer hohen Rohdichte durch einen großen Ast. Erst eine kombinierte visuelle/maschinelle Holzsortierung (Reihe KARHO und KAREMO) schließt solche Ausreißer aus und ermöglicht hohe Holzfestigkeiten. Aus Bild 5 geht jedoch hervor, daß diese hohen Festigkeiten bei der z. Z. im Mittel produzierten Keilzinkenqualität nur ungenügend ausgenutzt werden können (häufiges Keilzinkenversagen!). Der Vorteil einer kombinierten visuellen/maschinellen Sortierung kommt somit nur bei überdurchschnittli-

cher Keilzinkenqualität (Serie ©) zum Tragen. Der Erfolg einer Holzsortierung hängt also auch von der Ausgewogenheit der Faktoren »Holzfestigkeit« und »Keilzinkenfestigkeit« ab, denn die Verbesserung nur eines dieser Faktoren führt zu einer größeren Streuung der Versuchswerte, die eine höhere mittlere Tragfähigkeit wieder entwerten kann.

Im folgenden werden unter Berücksichtigung sämtlicher Rechenergebnisse (Serie A, B, und ©) die Auswirkungen der unterschiedlichen Holzsortierungen auf die Tragfähigkeit von BSH-Trägern untersucht, und zwar getrennt nach Trägern mit Holz- bzw. Keilzinkenversagen.

In Tabelle 4 sind die Rechenergebnisse für die Träger mit Holzversagen zusammengefaßt. Aus den Berechnungen ergibt sich für die Träger der Reihe Kl. II eine mittlere Biegefestigkeit von $\bar{x} = 34,4 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $s = 3,5 \text{ N/mm}^2$. Bei den in Abschnitt 3 beschriebenen Trägerversuchen wurde eine mittlere Biegefestigkeit von $\bar{x} = 33,7 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $s = 3,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Dies bestätigt die bereits in Abschnitt 4.1 festgestellte, sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Karlsruher Rechenmodells mit den Trägerversuchen.

Tabelle 4: Rechenergebnisse; Träger mit Holzversagen (Serie A, B und ©)

Reihe	Mittelwert \bar{x} N/mm ²	Standardabweichung s N/mm ²	Variationskoeffizient v %
Kl. I	36,4	3,3	9
Kl. II	34,4	3,5	10
KAR	37,3	4,0	11
RHO	36,7	4,4	12
EMO	38,4	3,6	9
KARHO	40,9	5,8	14
KAREMO	41,0	3,8	9

Tabelle 5: Rechenergebnisse, Träger mit Keilzinkenversagen

Reihe	Mittelwert \bar{x} N/mm ²			Standard- abweichung s N/mm ²		Variations- koeffizient v %	
	(A) + (B)	(C)	(A) + (B)	(C)	(A) + (B)	(C)	
Kl. I	32,1	33,5	4,3	5,3	13	16	
Kl. II	31,0	33,0	3,8	5,1	12	15	
KAR	30,9	34,5	4,2	3,8	14	11	
RHO	33,9	37,6	4,4	4,7	13	13	
EMO	34,0	37,5	4,8	4,8	14	13	
KARHO	34,0	37,4	6,0	5,8	18	16	
KAREMO	34,5	39,1	4,9	3,3	14	8	

Mit Hilfe einer verschärften *visuellen Holzsortierung* (Reihe Kl. I bzw. KAR) ist eine Steigerung der Tragfähigkeit um 6 bzw. 8 % zu erwarten.

Mit einer *maschinellen Sortierung* nach der Rohdichte (Reihe RHO) sind um etwa 7 % und nach dem Elastizitätsmodul der Bretter (Reihe EMO) sind um etwa 12 % höhere Biegefestigkeiten zu erwarten, und zwar bei gleicher Ästigkeit wie bei Kl. II. Eine weitere Steigerung der Tragfähigkeit ist nur durch eine kombinierte *visuelle/maschinelle Holzsortierung* zu erreichen. Bei Reihe KARHO und KAREMO sind dies nahezu 20 % im Vergleich zur Reihe Kl. II. Die geringere Streuung der Reihe KAREMO läßt jedoch einen höheren Wert für die charakteristische Biegefestigkeit erwarten, wonach diese Art der Holzsortierung (Ästigkeit und Elastizitätsmodul) einer Sortierung nach der Ästigkeit und der Rohdichte überlegen zu sein scheint.

Die Rechenergebnisse für die Träger mit Keilzinkenversagen sind in **Tabelle 5** zusammengefaßt. Bei den in Abschnitt 3 beschriebenen Trägerversuchen wurde bei einer mittleren Keilzinkenzugfestigkeit von 32,7 N/mm² (siehe Abschnitt 2) für die Träger mit Keilzinkenversagen eine mittlere Biegefestigkeit von 29,4 N/mm² ermittelt. Die entspricht etwa 90 % der Keilzinkenzugfestigkeit. Aus den Berechnungen ergab sich für die Reihen Kl. I, Kl. II und KAR (Serien (A) und (B)) eine mittlere Biegefestigkeit von 31,3 N/mm², was ebenfalls etwa 90 % der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit von 34,8 N/mm² entspricht. Bei der Serie (C) beträgt die mittlere Biegefestigkeit der Träger dieser Reihen hingegen nur etwa 80 % der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit (= 1,20 · 34,8 N/mm²).

Die Tendenz, daß sich die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen mit steigender Qualität der Keilzinkenverbindung von der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit entfernt, kann folgendermaßen erklärt werden. Bei schlechter Keilzinkenqualität versagt nahezu jeder Versuchsträger wegen einer Keilzinkenverbindung, so daß die Biegefestigkeit der BSH-Träger praktisch gleich der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung ist. Bei sehr guter Keilzinkenqualität jedoch versagt ein Großteil der Träger aufgrund eines Holzfehlers, und nur die Träger mit verhältnismäßig schlechten Keilzinkenverbindungen gehen auch in der Keilzinkenverbindung zu Bruch. Der Mittelwert für die Biegefestigkeit dieser Träger mit Keilzinkenversagen liegt somit naturgemäß weit unter der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit.

Aus Tabelle 5 ist ebenfalls zu erkennen, daß die visuelle Holzsortierung die Tragfähigkeit von BSH-Trägern mit Keilzinkenversagen nicht beeinflusst. Die mittleren Biegefestigkeiten der Reihen Kl. I, Kl. II und KAR liegen in der gleichen Größenordnung, und auch die Tragfähigkeiten der Reihen RHO, EMO, KARHO und KAREMO sind miteinander vergleichbar.

5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen über die Ästigkeit- und Elastizitätsmodul-Verteilung entlang eines Brettes konnte eine Verbesserung des im 1. Teil dieses Forschungsvorhabens

entwickelten Rechenmodells erzielt werden. Bei vergleichenden Berechnungen der Tragfähigkeiten von insgesamt 9 Versuchsträgern wurden zwischen berechneter und tatsächlicher Biegefestigkeit Abweichungen von höchstens 10 % festgestellt.

Bei den Trägerversuchen wurde zwar eine Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Trägerhöhe beobachtet, ab einer Höhe von 500 mm kann diese jedoch praktisch als konstant angesehen werden. Bei den Trägern, bei denen das Versagen auf eine Keilzinkenverbindung zurückzuführen war, konnte keine Abhängigkeit von der Trägerhöhe festgestellt werden. Die Biegefestigkeit dieser Träger lag in der Größenordnung der Zugfestigkeit der Keilzinken. Die Einführung eines sog. »Höhenfaktors« erscheint hiernach also nicht gerechtfertigt. Bei diesen Versuchen bestätigte sich erneut der dominante Einfluß der Keilzinkenverbindung auf die Biegefestigkeit von BSH-Trägern. In einigen Fällen versagten sogar Keilzinken, die nicht im hochbeanspruchten Bereich des Trägers lagen.

Mit Hilfe des Rechenmodells wurden weiterhin die Auswirkungen von verschiedenen Möglichkeiten der Holzsortierung auf die Tragfähigkeit von BSH-Trägern untersucht. Beeinflusst wird diese Biegefestigkeit von zwei z. T. voneinander unabhängigen Faktoren, nämlich der Holzfestigkeit und der Keilzinkenfestigkeit. Eine schärfere visuelle Sortierung beeinflusst die Keilzinkenfestigkeit nicht und bewirkt nur, daß häufiger ein Keilzinkenversagen auftritt, so daß eine höhere Holzfestigkeit nicht ausgenutzt werden kann. Erst eine maschinelle Sortierung anhand der Rohdichte oder des Elastizitätsmoduls der Bretter läßt auch höhere Keilzinkenfestigkeiten erwarten.

Der Erfolg einer Holzsortierung hängt aber auch von der Ausgewogenheit der zwei beeinflussenden Faktoren ab, denn die Erhöhung nur eines dieser Faktoren bewirkt eine größere Streuung der Versuchswerte, die eine höhere mittlere Festigkeit wieder abwertet, weil man sich auf untere Fraktilewerte beziehen muß. Mit Hilfe des »Karlsruher Rechenmodells« war es somit möglich, die Auswirkungen, aber auch die Grenzen von verschiedenen Holzsortierungen auf die Biegefestigkeit von BSH-Trägern qualitativ und quantitativ abzuschätzen. Es bleiben noch weitere Fragen zu klären, die in einem geplanten 3. Forschungsabschnitt untersucht werden sollen mit dem Endziel, unter bestimmten Randbedingungen hinsichtlich Holz Auswahl und Qualitätsgarantie der Keilzinkenverbindungen zu Vorschlägen für verbesserte Tragfähigkeitsnachweise für biegebeanspruchte BSH-Träger zu gelangen.

Literatur

- [1] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elastizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie von der Trägerhöhe, Teil A: Karlsruher Untersuchungen. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe
- [2] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Holz Roh-Werkstoff 43: 333–337, 369–373, 439–442
- [3] Heimeshoff, B.; Glos, P. 1980: Zugfestigkeit und Biege-E-Modul von Fichten-Brettlamellen. Holz Roh-Werkstoff 38: 51–59
- [4] Colling, F.; Dinort, R. 1987: Die Ästigkeit des in den Leimbaubetrieben verwendeten Schnittholzes. Holz Roh-Werkstoff 45: 23–26
- [5] Colling, F.; Scherberger, M. 1987: Die Streuung des Elastizitätsmoduls in Brett längsrichtung. Holz Roh-Werkstoff 45: 95–99
- [6] Görlacher, R. 1984: Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. Holz Roh-Werkstoff 42: 219–222
- [7] Larsen, H. J. 1980: Strength of glued laminated beams. Part 2 (Properties of glulam lamination). Report Nr. 8004, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Aalborg, Danmark
- [8] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Tragfähigkeit von mit Glasfaser-Verbund-Profilen verstärkten Brettschichtholzträgern. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe.