

104

Untersuchungen zur Zugfestigkeit von Brettschichtholz im Hinblick auf Normungsvorschläge

von

H.J. Blaß, J. Ehlbeck und L. Kurzweil

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abteilung Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ.-Professor Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß
1998

Untersuchungen zur Zugfestigkeit von Brettschichtholz im Hinblick auf Normungsvorschläge

von

H.J. Blaß, J. Ehlbeck und L. Kurzweil -

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abteilung Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ.-Professor Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß
1998

Vorwort

Für die in Deutschland verwendeten Festigkeitsklassen fehlten bisher systematische Untersuchungen zur Zugfestigkeit des Brettschichtholzes in Faserrichtung. Im Vergleich zur Biegefestigkeit erschienen die verwendeten Rechenwerte für die Bemessung von Zugbauteilen recht hoch. Da im Bereich des Vollholzes neue, niedrigere Werte im A1-Papier zu DIN 1052 festgelegt worden waren, erschien eine Überprüfung der Werte für Brettschichtholz dringend erforderlich. Aus diesem Grund wurde ein Forschungsvorhaben durchgeführt, um die Zugfestigkeit des Brettschichtholzes sowohl experimentell als auch theoretisch zu untersuchen. Der experimentelle Teil der Untersuchungen wurde an der Technischen Universität München von den Herren Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Kreuzinger und Dr.-Ing. R. Spengler durchgeführt. Dieser Teil ist in einem eigenen Forschungsbericht dokumentiert.

Das Forschungsvorhaben entstand im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) mit finanzieller Unterstützung des Deutschen Instituts für Bautechnik in Berlin. Die mechanische und stochastische Modellbildung für die Anpassung des Karlsruher Rechenmodells KAREMO auf zugbeanspruchte Bauteile, die Durchführung der Simulationsrechnungen sowie die Erstellung des Forschungsberichtes wurden von Herrn Dipl.-Ing. L. Kurzweil vorgenommen. In der Anfangsphase dieser theoretischen Bearbeitung hat Herr Dr. Colling mit wertvollen Hinweisen geholfen. Die Prüfkörper wurden von den Firmen Burgbacher in Trossingen-Schura sowie Losberger in Eppingen kostenlos zur Verfügung gestellt. Bei der Auswertung haben die Herren cand.ing. Christoph Duppel und Markus Rathschlag tatkräftig mitgewirkt.

Allen Beteiligten ist für die Mitarbeit zu danken.

Jürgen Ehlbeck

Hans Joachim Blaß

1	Problematik - Zielsetzung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Überarbeitung des Simulationsprogramms	2
3	Simulationsrechnungen	3
3.1	Versuchsträger	3
3.2	Variationen	7
3.2.1	Einfluß der Trägerhöhe.....	8
3.2.2	Einfluß der Trägerlänge.....	10
3.2.3	Einfluß der Keilzinken-Zugfestigkeit	12
3.2.4	Einfluß des Trägeraufbaus	12
4	Vergleich der Ergebnisse mit Rechenwerten der Biegefestigkeit	13
5	Zusammenfassung	15
6	Literatur	17

1 Problematik - Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation

Die in DIN 1052, Ausgabe April 1988, angegebenen zulässigen Biegespannungen für Brettschichtholz sind im Vergleich zu den Werten für Vollholz um etwa 10% größer. Diese zulässigen Werte für Brettschichtholz (BSH) basieren zum Teil auf einer Einschätzung des Homogenisierungseffekts durch den Aufbau der Querschnitte aus Brettlamellen, sind aber auch durch zahlreiche experimentelle Untersuchungen an Biegeträgern mit kleinen Abmessungen begründet. Da bislang keine systematischen Untersuchungen zur Zugfestigkeit von BSH vorlagen, wurden die gleichen zulässigen Spannungen wie für Vollholz (VH) festgelegt.

Im Ausland werden die in DIN 1052 festgelegten zulässigen Zugspannungen als sehr hoch eingeschätzt. Im Rahmen der Harmonisierung der europäischen Baubestimmungen wurde daher für Vollholz im Eurocode 5 mit dem zugehörigen Nationalen Anwendungsdokument ein Verhältniswert von Zugfestigkeit zur Biegefestigkeit von 0,6 festgelegt. Für BSH ergaben sich jedoch weiterhin höhere Verhältniswerte, die zwischen 0,69 und 0,73 liegen. Um das im Eurocode 5 vorausgesetzte einheitliche Sicherheitsniveau zu garantieren, erschien es notwendig zu überprüfen, ob für Zugbauteile aus Brettschichtholz dieses geforderte Sicherheitsniveau gewährleistet werden kann.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens war die Ermittlung realistischer Werte für die charakteristische Zugfestigkeit von BSH durch Versuche und Simulationsrechnungen. Dabei sollten die Prüfkörper baupraktische Abmessungen aufweisen. Es wurde vorgeschlagen, die Simulationen mit dem sogenannten „Karlsruher Rechenmodell“ (KAREMO) durchzuführen, mit dem bereits die Biegefestigkeit von BSH-Trägern realitätsnah berechnet wurde. Hierfür sollte das Programm, mit dem bisher nur Biegeträger simuliert werden konnten, so überarbeitet werden, daß die Tragfähigkeit von zugbeanspruchten Trägern berechnet werden konnte. Die Zuverlässigkeit des Rechenprogramms war durch einen Vergleich der Ergebnisse aus den an der Technischen Universität München durchgeführten Versuchen und den Simulationsrechnungen für diese Träger zu überprüfen. Letztlich sollten für die verschiedenen BSH-Festigkeitsklassen die zugehörigen charakteristischen Werte der Zugfestigkeit mit dem Rechenprogramm bestimmt werden.

2 Überarbeitung des Simulationsprogramms

Das Karlsruher Rechenmodell ist ein Finite-Elemente-Programm, welches zweidimensionale Elemente verwendet, denen ein anisotropes und nichtlineares Materialverhalten zugewiesen ist. Mit dem Programm wird der Trägeraufbau eines BSH-Trägers simuliert und dessen Tragfähigkeit berechnet. Bei der Simulation des Trägeraufbaus werden jedem Element Werte für Rohdichte, Ästigkeit, Elastizitätsmodul und Zug- bzw. Druckfestigkeit auf dem Prinzip der Monte Carlo Simulation zugewiesen. Hierbei werden natürliche, durch das Wachstum des Baumes bedingte Regelmäßigkeiten, wie zum Beispiel charakteristischer Astabstand und geringe Streuung des E-Moduls und der Festigkeit innerhalb eines Brettes, berücksichtigt.

Die bisherige Version des KAREMO wurde speziell zur wissenschaftlichen Berechnung der Tragfähigkeit von Biegeträgern aus BSH, wie in Bild 1 dargestellt, entwickelt. Eine genaue Beschreibung des Rechenprogramms findet sich in COLLING (1992). Der zu simulierende Träger kann in Längsrichtung in drei unterschiedlich große Bereiche L_i und über die Trägerhöhe in drei unterschiedliche Bereiche H_i unterteilt werden. Diesen Bereichen können jeweils unterschiedliche Materialeigenschaften und Zellengrößen zugewiesen werden. Die Belastung wird in Form von Einzellasten an Endknoten aufgebracht. Den Zellen, die an die Auflager grenzen, werden Materialeigenschaften von Stahl zugewiesen, damit die an den Auflagern entstehenden Spannungsspitzen von diesen Elementen aufgenommen werden können (Bild 1).

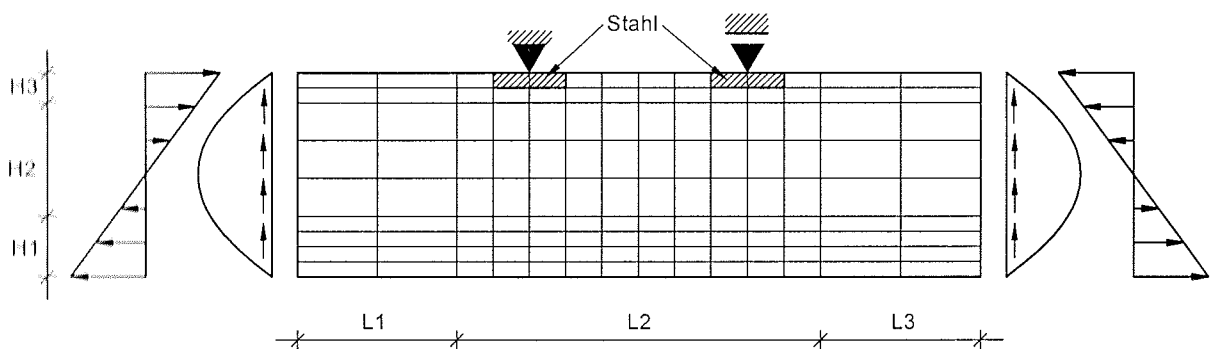


Bild 1: Unterteilung, Lastanordnung und Auflagerung eines Biegeträgers nach COLLING (1992)

Infolge der Überarbeitung des Rechenprogramms kann die Zugfestigkeit von Trägern aus Brettschichtholz, wie in Bild 2 dargestellt, simuliert werden. Die Zugbelastung des Trägers erfolgt durch Knotenlasten an einem Trägerende, während am gegenüberliegenden Ende des Trägers Auflager angebracht sind. Analog zur Generierung des FE-Netzes für Biegeträger, werden den den

Auflagern benachbarten Zellen Materialeigenschaften von Stahl zugewiesen. Die Möglichkeit einer Unterteilung in jeweils drei verschiedene Bereiche über die Höhe und die Länge des Trägers wurde beibehalten, um kombiniert aufgebaute BSH-Träger simulieren zu können. An der Zuweisung der Materialeigenschaften der Zellen wurden ebenfalls keine Änderungen vorgenommen, mit Ausnahme der oberhalb der Systemlinie liegenden Zellen. Diesen Zellen eines Biegeträgers wurden bisher Druckfestigkeitswerte zugewiesen, die eine Plastizierung in druckbeanspruchten Trägerbereich ermöglichten. Da hier jedoch alle Zellen ausschließlich auf Zug beansprucht werden, mußte dies bei der Zuweisung der Materialeigenschaften entsprechend berücksichtigt werden.

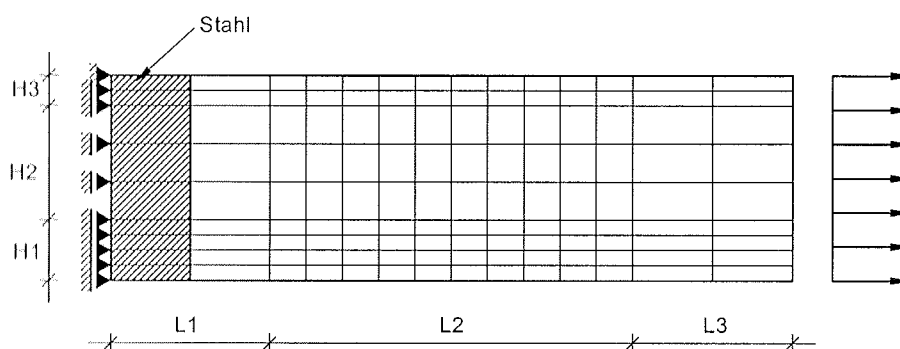


Bild 2: Unterteilung, Lastanordnung und Auflagerung eines Zugprüfkörpers

3 Simulationsrechnungen

3.1 Versuchsträger

Um die Zuverlässigkeit des Simulationsprogramms zu überprüfen, wurden an der Technischen Universität München Zugversuche mit BSH-Trägern in Bauteilgröße durchgeführt. Vor der Herstellung der Prüfkörper wurden die relevanten Materialeigenschaften der verwendeten Lamellen wie Elastizitätsmodul, Rohdichte und Ästigkeit bestimmt. Die Lamellen wurden an den Stirnflächen gekennzeichnet, damit bei den Simulationsrechnungen den einzelnen Lamellen die entsprechenden Eigenschaften zugewiesen und deren Anordnung beim Trägeraufbau berücksichtigt werden konnten. Den Firmen Burgbacher in Schura und Losberger in Eppingen sei an dieser Stelle herzlich für die Herstellung und das kostenlose Zurverfügungstellen der Prüfkörper gedankt.

Insgesamt wurden 30 Träger geprüft, wobei zunächst zehn Prüfkörper aus MS13 und MS17-Lamellen hergestellt und als Vorversuche geprüft wurden. Die Prüfkörper der Hauptversuchsreihe wurden aus S10, S13, MS13 und MS17-

Lamellen hergestellt, wobei jede Versuchsreihe einen Umfang von fünf Prüfkörpern aufwies.

In den Anlagen 1 bis 5 ist der Aufbau jedes Trägers mit Angabe des Elastizitätsmoduls in N/mm^2 und der Rohdichte in kg/m^3 jeder Lamelle angegeben. Die Lamellendicke betrug 33 mm bei den Vorversuchen und 32 mm bei den Hauptversuchen. Bei den Simulationsrechnungen der Zugtragfähigkeit wurden jeder Lamelle die entsprechenden ermittelten Eigenschaften zugewiesen. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für die Vorversuchsreihe sind in Tabelle 1 zusammengestellt. In Spalte 1 ist die Prüfkörperbezeichnung, in den Spalten 2 und 3 der Mittelwert bzw. der charakteristische Wert der Zugfestigkeit der simulierten Träger, in Spalte 4 die charakteristische Brettzugfestigkeit, in Spalte 5 die im Versuch ermittelte Zugfestigkeit des Trägers und in den beiden letzten Spalten die prozentuale Abweichung der simulierten Werte der charakteristischen Zugfestigkeit bzw. der Mittelwerte von den durch Versuche ermittelten Zugfestigkeiten angegeben. Der Simulationsumfang betrug für jeden Versuchskörpertyp jeweils 1000 Träger.

Tabelle 1: Simulierte Werte der Zugfestigkeit der Brettschichtholzträger der Vorversuche

1	2	3	4	5	6	7
Versuchs-körper	$f_{t,0,g,mean}$	$f_{t,0,g,k}$	$f_{t,Brett,k}$	$f_{t,0,g,Versuch}$	Abw. x_5	Abw. x_{50}
	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[%]	[%]
1A	37,5	32,0	27,7	40,1	-20,2	-6,5
1B	34,5	29,5	25,7	31,1	-5,1	+10,9
2A	35,7	29,0	22,9	33,2	-12,7	+7,5
2B	28,9	24,0	20,4	17,3	+38,7	+67,1
3A	31,5	26,0	22,0	28,0	-7,1	+12,5
3B	28,4	23,2	20,7	19,5	+19,0	+45,6
4A	32,7	27,4	24,4	28,1	-2,5	+16,4
4B	31,8	26,6	22,6	27,3	-2,6	+16,5
5A	31,7	26,7	23,7	30,3	-11,8	+4,6
5B	32,3	27,5	25,3	37,3	-26,3	-13,4

In Bild 3 sind die in den Vorversuchen ermittelten Werte der Zugfestigkeit der Träger den simulierten charakteristischen Zugfestigkeiten gegenübergestellt. Zusätzlich sind jeweils die kleinste und größte Zugfestigkeit der simulierten Träger dargestellt.

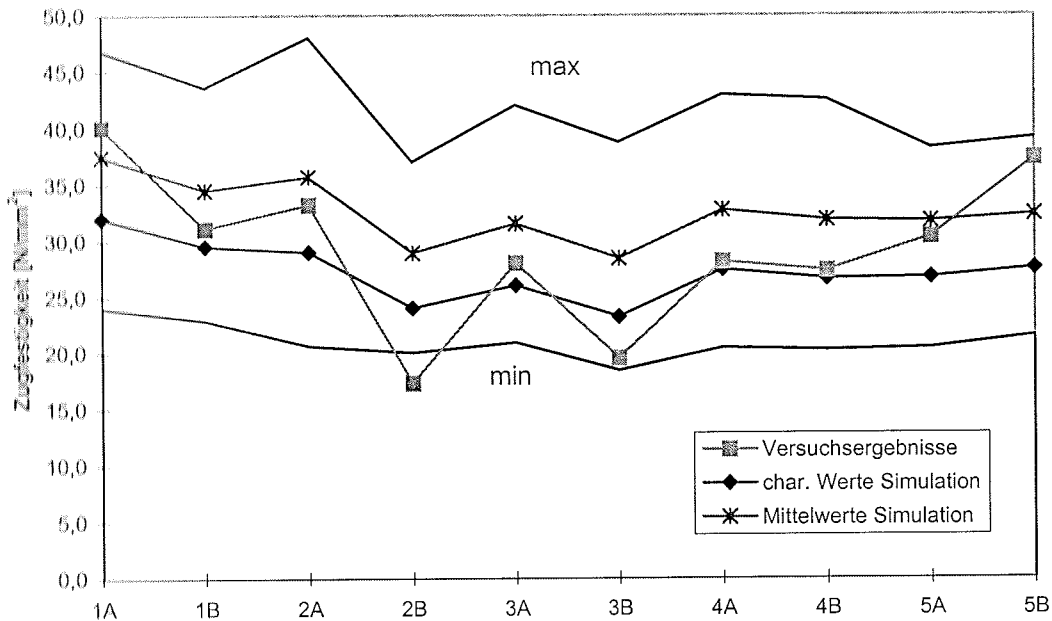


Bild 3: Vergleich Simulationen und Versuchsergebnisse der Vorversuche

Aus Bild 3 wird ersichtlich, daß die Simulationsrechnungen bis auf zwei Ausnahmen niedrigere charakteristische Zugfestigkeiten liefern als die durch Versuche bestimmten Tragfähigkeiten. Der Verlauf der Simulationsergebnisse folgt qualitativ den Versuchsergebnissen, ebenso wie die Kleinst- und Größtwerte der simulierten Zugfestigkeiten. Die Versuchskörper 2B und 3B wiesen lokale Störungen in Form von sehr großen Ästen auf, worauf die sehr niedrige tatsächliche Tragfähigkeit zurückzuführen ist.

Die Träger der Hauptversuchsreihe waren homogen aus Lamellen einer Sortierklasse aufgebaut. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für diese Versuchskörper sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellt. Für den Versuchsträger 111 konnten die Elastizitätsmoduln der Lamellen nicht bestimmt werden. Aus diesem Grund wurden auch keine Simulationsrechnungen für diesen Träger durchgeführt.

Tabelle 2: Simulierte Werte der Zugfestigkeit der Brettschichtholzträger aus S10 und S13

1	2	3	4	5	6	7
Versuchskörper	$f_{t,0,g,mean}$	$f_{t,0,g,k}$	$f_{t,Brett,k}$	$f_{t,0,g,Versuch}$	Abw. x_5	Abw. x_{50}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]
116 - S10	25,7	22,0	31,9	19,2	+14,6	+33,9
117 - S10	24,7	21,2	31,0	20,3	+4,4	+21,7
118 - S10	24,9	21,0	30,7	29,2	-28,0	-14,7
119 - S10	26,0	21,5	32,2	26,8	-19,8	-3,0
120 - S10	26,8	22,0	33,6	20,6	+6,8	+30,0
111 - S13				24,0		
112 - S13	27,1	22,5	35,2	24,0	-6,3	+12,9
113 - S13	27,5	23,2	33,8	23,6	-1,7	+16,5
114 - S13	28,7	24,4	35,1	29,6	-17,5	-3,0
115 - S13	27,7	23,2	35,4	24,6	-5,7	+12,6

Tabelle 3: Simulierte Werte der Zugfestigkeit der Brettschichtholzträger aus MS13 und MS17

1	2	3	4	5	6	7
Versuchskörper	$f_{t,0,g,mean}$	$f_{t,0,g,k}$	$f_{t,Brett,k}$	$f_{t,0,g,Versuch}$	Abw. x_5	Abw. x_{50}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]
101 - MS13	32,1	27,3	40,2	33,0	-17,3	-2,7
105 - MS13	32,8	27,2	41,1	30,8	-11,7	+6,5
106 - MS13	32,8	27,7	41,0	34,7	-20,2	-5,5
107 - MS13	33,5	28,1	41,6	33,1	-15,1	+1,2
108 - MS13	34,2	29,0	42,9	33,8	-14,2	+1,2
102 - MS17	32,5	27,1	40,4	33,3	-18,6	-2,4
103 - MS17	32,5	27,3	40,1	35,3	-22,7	-7,9
104 - MS17	32,8	27,5	40,8	40,1	-31,4	-18,2
109 - MS17	34,3	28,6	42,3	33,7	-15,1	+1,8
110 - MS17	32,8	27,9	40,6	36,5	-23,6	-10,1

Für die Hauptversuche sind die simulierten charakteristischen Zugfestigkeiten und die aus den Versuchen ermittelten Zugfestigkeiten in Bild 4 dargestellt.

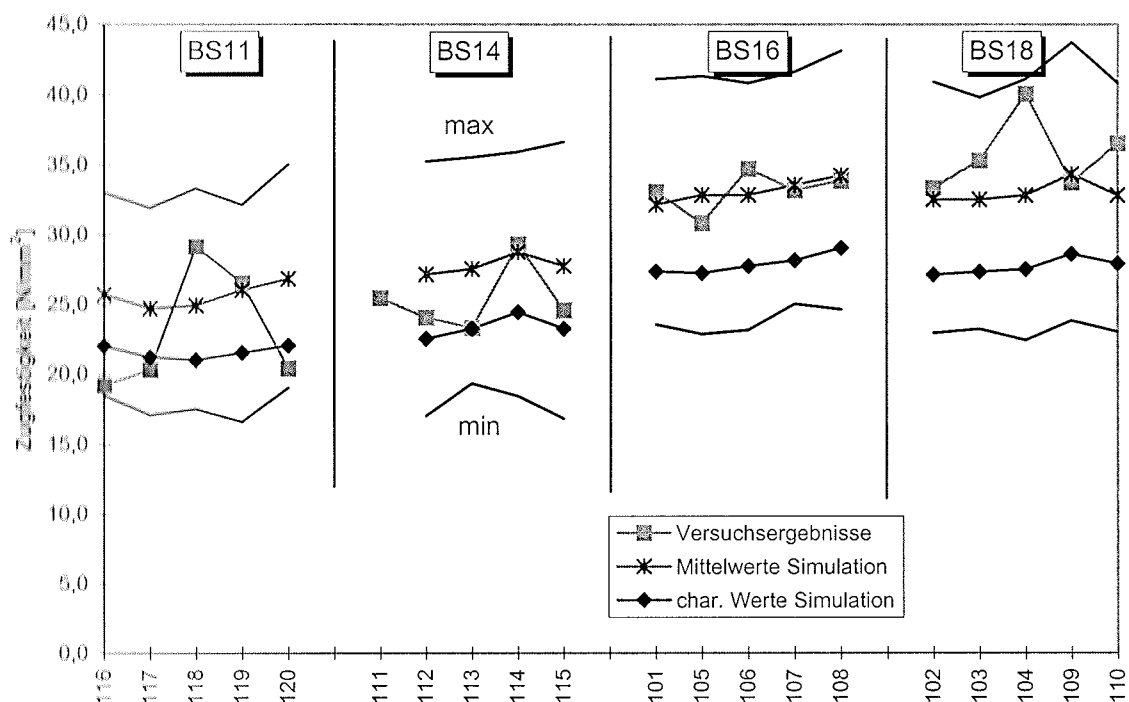


Bild 4: Vergleich Simulationen und Versuchsergebnisse der Hauptversuche

Auch bei den Hauptversuchen zeigt der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den simulierten Zugfestigkeiten, daß das Rechenprogramm wirklichkeitsnahe Ergebnisse liefert. Somit kann davon ausgegangen werden, daß allgemeine Simulationen für die verschiedenen BSH-Festigkeitsklassen sinnvolle Ergebnisse liefern werden.

3.2 Variationen

Außer den Berechnungen der Zugtragfähigkeit der Versuchsträger mit bekannten Lamelleneigenschaften wurden beliebige Träger simuliert, deren Lamellen Materialeigenschaften der Sortierklassen S10, MS10, S13, MS13 und MS17 zugewiesen wurden. Untersucht wurden bei diesen Berechnungen verschiedene mögliche geometrische und materialabhängige Parameter, welche die Zugfestigkeit beeinflussen können.

Die Verteilungswerte für die Holzeigenschaften, wie Elastizitätsmodul, Normalrohddichte und Größtwert der Ästigkeit (max KAR) eines Brettes sind für die untersuchten Sortierklassen in **Tabelle 4** angegeben.

Tabelle 4: Zugrundegelegte Verteilungen der Holzeigenschaften der Bretter

Mittelwert m		S10	MS10	S13	MS13	MS17
5% bzw. 95% Fraktile						
E-Modul	m	11100	10300	12300	12100	14300
[N/mm ²]	x ₅	7800	8400	8400	10100	11800
Normalrohddichte	m	0,45	0,43	0,46	0,46	0,50
[g/cm ³]	x ₅	0,39	0,38	0,38	0,41	0,44
Ästigkeit max KAR	m	0,29	0,29	0,20	0,25	0,21
[-]	x ₉₅	0,41	0,44	0,30	0,40	0,36

Als geometrische Parameter wurden die Trägerhöhe und die Trägerlänge variiert, materialabhängige Parameter stellten die Keilzinkenzugfestigkeit und der Trägeraufbau mit unterschiedlichen Sortierklassen der Lamellen dar. Analog zu den Hauptversuchen wurde beim Trägeraufbau eine konstante Lamellendicke von 32 mm angenommen. Der Simulationsumfang betrug je Sortierklasse und Einflußparameter 1000 Träger.

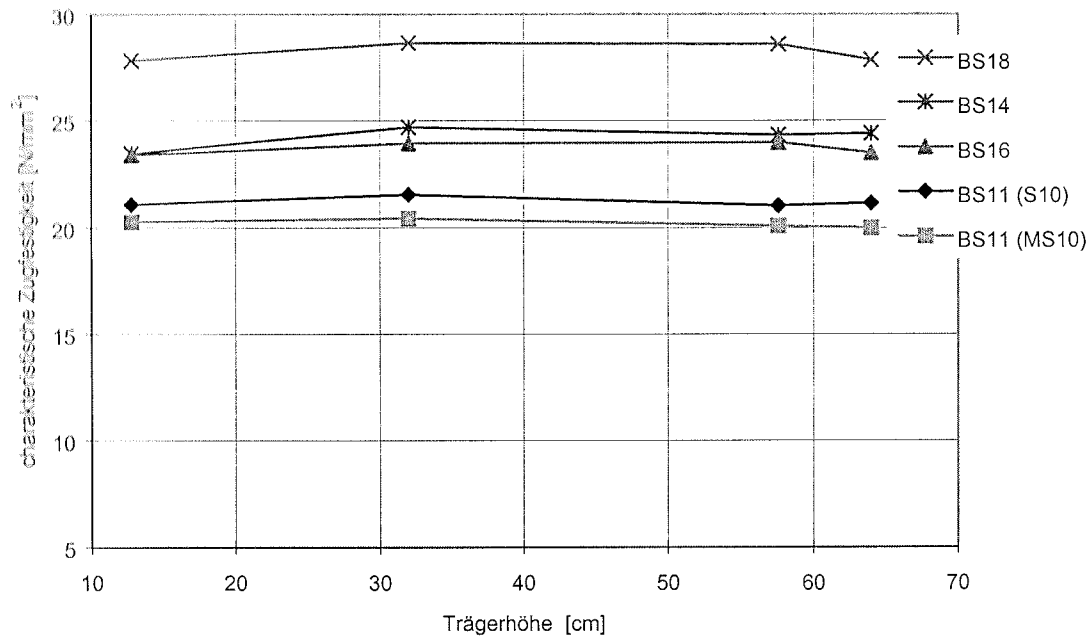
3.2.1 Einfluß der Trägerhöhe

Berechnet wurde die Tragfähigkeit von Trägern mit einer Höhe von 12,8 cm, 32,0 cm, 57,6 cm und 64,0 cm bei einer Trägerlänge von 5,10 m. Diese Höhen entsprechen einer Anzahl von 4, 10, 18 und 20 übereinander liegenden Lamellen. In Tabelle 5 sind für die simulierten Brettschichtholz-Festigkeitsklassen die berechneten Mittelwerte und charakteristischen Werte der Zugfestigkeit angegeben.

Tabelle 5: Variation der Trägerhöhe - Festigkeitswerte

			Trägerhöhe [cm]			
			12,8	32,0	57,6	64,0
Festigkeitsklasse						
BS11 (S10)	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	26,6	26,0	25,2	25,0
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	21,1	21,5	21,0	21,2
BS11 (MS10)	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	25,2	24,6	23,8	23,5
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	20,3	20,4	20,1	20,0
BS14h	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	30,3	29,7	28,9	28,7
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	23,5	24,7	24,3	24,4
BS16h	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	29,5	28,8	28,0	27,7
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	23,4	23,9	24,0	23,5
BS18h	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	32,3	33,6	32,8	32,3
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	27,8	28,6	28,6	27,9

Zur Verdeutlichung sind in Bild 5 die simulierten Werte der charakteristischen Zugfestigkeit der einzelnen Festigkeitsklassen in Abhängigkeit von der Trägerhöhe dargestellt.

**Bild 5:** Einfluß der Trägerhöhe

Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen wird deutlich, daß die Trägerhöhe bei gleicher Länge der Träger keinen signifikanten Einfluß auf die Zugfestigkeit gezeigt hat. Dies liegt daran, daß die Trägerhöhe für den Zugträger ein paralleles System darstellt, bei dem eine Lamelle mit geringer Zugfestigkeit durch eine Lamelle mit hoher Zugfestigkeit ausgeglichen werden kann. Mit

zunehmender Trägerhöhe steigt die Wahrscheinlichkeit, daß der Träger Lamellen mit niedriger und hoher Zugfestigkeit enthält. Die Belastungsanteile, die eine schwache Lamelle nicht mehr aufnehmen kann, können die Lamellen mit höherer Festigkeit übernehmen.

3.2.2 Einfluß der Trägerlänge

Um einen möglichen Einfluß der Trägerlänge auf die Zugfestigkeit zu untersuchen, wurden Träger mit verschiedenen Längen simuliert, und zwar mit 195, 510, 1005 und 1995 cm Länge, welche einer Anzahl von Elementen in Trägerlängsrichtung von 13, 34, 67 und 133 bei einer Elementlänge von 150 mm entsprechen. Die Trägerhöhe betrug hierbei jeweils 32 cm, die Träger waren aus Lamellen der jeweiligen Sortierklasse homogen aufgebaut. Die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen sind in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Variation der Trägerlänge - Festigkeitswerte

			Trägerlänge [m]			
			1,95	5,10	10,05	19,95
Festigkeitsklasse						
BS11 (S10)	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	28,1	26,0	24,6	23,2
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	23,1	21,5	20,7	19,8
BS11 (MS10)	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	26,4	24,6	23,2	22,0
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	21,3	20,4	19,7	18,7
BS14h	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	32,2	29,7	28,0	26,3
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	26,4	24,7	23,2	22,0
BS16h	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	30,8	28,8	27,3	25,8
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	25,0	23,9	23,0	22,0
BS18h	$f_{t,0,g,mean}$	[N/mm ²]	36,2	33,6	32,0	30,7
	$f_{t,0,g,k}$	[N/mm ²]	29,8	28,6	27,4	26,9

Der berechnete Zusammenhang zwischen charakteristischer Zugfestigkeit der Träger und der Trägerlänge ist in Bild 6 aufgezeigt. Dabei ist zu erkennen, daß mit zunehmender Trägerlänge die Zugfestigkeit der Träger abnimmt. Der Einfluß der Trägerlänge auf die Zugfestigkeit kann durch ein serielles System erklärt werden, bei dem die Gesamttragfähigkeit des Trägers von der Zugfestigkeit des schwächsten Querschnittes abhängt. Theoretisch besitzt eine Endloslamelle keine Zugfestigkeit, da eine Ästigkeit von 1,0 oder eine Keilzinkenverbindung mit vernachlässigbarer Zugfestigkeit möglich ist. Durch die Holzsortierung wird die Ästigkeit jedoch auf einen oberen Grenzwert beschränkt. Da ein Träger aus mehreren Lamellen aufgebaut ist und die Keilzinkungen nicht übereinander liegen

sollen, ist zu erwarten, daß im Falle des anfänglichen Versagens einer Lamelle die übrigen Lamellen die Belastung übernehmen können. Somit fällt mit zunehmender Trägerlänge die Zugfestigkeit der Träger auf einen konstanten Wert ab, was in Bild 6 erkennbar ist.

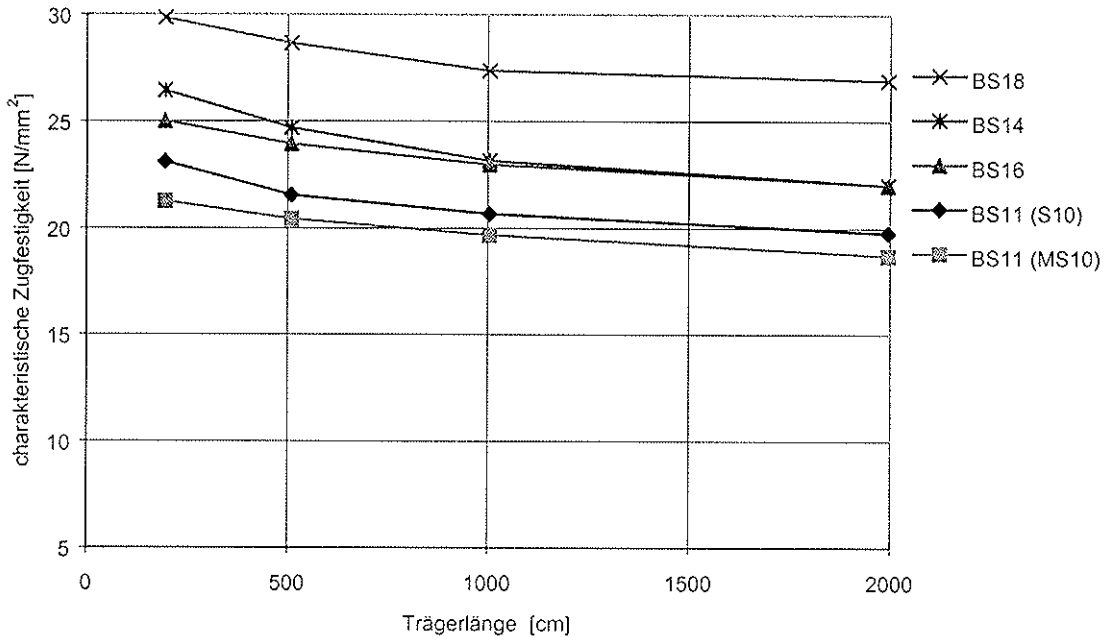


Bild 6: Einfluß der Trägerlänge

In Tabelle 7 ist das Verhältnis von Trägern mit Holzversagen (HV) zu Trägern mit Keilzinkenversagen (KZ-V) angegeben. Hier ist deutlich zu erkennen, daß mit zunehmender Trägerlänge die Zugfestigkeit eines BSH-Trägers mehr und mehr von der Festigkeit der Keilzinkungen bestimmt wird, bzw. der Anteil an Trägern, bei denen ein Keilzinkenversagen bruchursächlich wird, steigt.

Tabelle 7: Variation der Trägerlänge - Versagensart

Trägerlänge [m]			1,95	5,10	10,05	19,95
Festigkeitsklasse						
BS11 (S10)	HV / KZ-V	[% / %]	68,2 / 31,8	62,6 / 37,4	59,0 / 41,0	56,3 / 43,7
BS11 (MS10)	HV / KZ-V	[% / %]	70,6 / 29,4	63,5 / 36,5	57,3 / 42,7	58,1 / 41,9
BS14h	HV / KZ-V	[% / %]	54,4 / 45,6	44,8 / 55,2	39,3 / 60,7	35,0 / 65,0
BS16h	HV / KZ-V	[% / %]	69,1 / 30,9	60,7 / 39,3	60,7 / 39,3	57,3 / 42,7
BS18h	HV / KZ-V	[% / %]	68,4 / 31,6	60,0 / 40,0	59,6 / 40,4	56,6 / 43,4

homogenen und einem einfach kombinierten Aufbau, die in Bild 8 dargestellt sind. Bei den kombiniert aufgebauten Trägern entsprachen jeweils die 12 inneren Lamellen der nächst niedrigeren Sortierklasse. Die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen sind in Tabelle 8 angegeben.

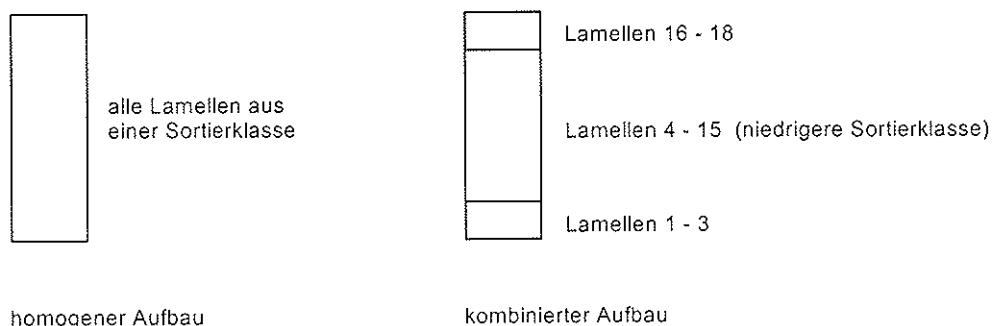


Bild 8: Homogen und kombiniert aufgebauter Träger

Tabelle 8: Variation des Trägeraufbaus

Festigkeitsklasse	Trägerlänge 5,10 m		Trägerlänge 19,95 m	
	$f_{t,0,g,mean}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,g,k}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,g,mean}$ [N/mm ²]	$f_{t,0,g,k}$ [N/mm ²]
BS11 (S10)	25,2	21,0	22,6	19,8
BS11 (MS10)	23,8	20,1	21,3	18,5
BS14h	28,9	24,3	25,6	22,3
BS14k	26,5	22,4	23,6	20,5
BS16h	27,9	24,0	25,1	21,7
BS16k	25,1	21,3	22,5	19,6
BS18h	32,8	28,6	29,8	26,3
BS18k	29,5	24,7	26,7	23,7

Erwartungsgemäß zeigen kombiniert aufgebaute Träger eine geringere charakteristische Zugfestigkeit als die homogen aufgebauten Träger der gleichen Festigkeitsklasse. Das Verhältnis der charakteristischen Zugfestigkeiten der kombiniert aufgebauten Träger zu denen der homogen aufgebauten beträgt im Mittel 0,9.

4 Vergleich der Ergebnisse mit Rechenwerten der Biegefestigkeit

Im folgenden werden die durch Simulationen ermittelten charakteristischen Zugfestigkeiten für 20 m lange Träger mit entsprechenden durch Simulationen

ermittelten Rechenwerten der Biegefestigkeit verglichen. In Spalte 2 sind die durch Simulationsrechnungen ermittelten Werte der charakteristischen Zugfestigkeit und in Spalte 3 die berechneten Werte der charakteristischen Biegefestigkeit angegeben. Diese wurden von Colling et al. (1995) im Rahmen des Forschungsvorhabens E-92/7i - Eigenschaftsprofile von Brettschichtholz - bestimmt.

Tabelle 9: Vergleich Zugfestigkeit - Biegefestigkeit

1	2	3	4	5	6	7	8
	Simulationen			NAD			
Sortierklasse	$f_{t,0,g,k}$	$f_{m,g,k}$	2 / 3	$f_{t,0,g,k}$	$f_{m,g,k}$	5 / 6	2 / 6
	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
BS11 (S10)	19,8	24,5	0,808	17,0	24,0	0,708	0,825
BS11 (MS10)	18,5	23,7	0,781	17,0	24,0	0,708	0,771
BS14h	22,3	27,4	0,814	20,5	28,0	0,732	0,796
BS14k	20,5	27,0	0,759	17,5	28,0	0,625	0,732
BS16h	21,7	27,7	0,783	23,0	32,0	0,719	0,678
BS16k	19,6	26,0	0,734	18,5	32,0	0,578	0,613
BS18h	26,3	33,7	0,780	25,0	36,0	0,694	0,731
BS18k	23,7	32,3	0,734	23,5	36,0	0,653	0,658

In Bild 9 sind die Verhältniswerte der charakteristischen Zug- zur charakteristischen Biegefestigkeit für homogen aufgebaute Brettschichtholzträger dargestellt, wie sie sich aus den Simulationen bzw. aus den im Nationalen Anwendungsdokument (NAD) angegebenen Festigkeitswerten ergeben. Das durch Simulationsrechnungen erhaltene Verhältnis von Zugfestigkeit zur Biegefestigkeit für die verschiedenen Festigkeitsklassen liegt im Mittel bei 0,8, während die im NAD angegebenen Werte im Mittel bei einem Verhältnis von 0,7 liegen.

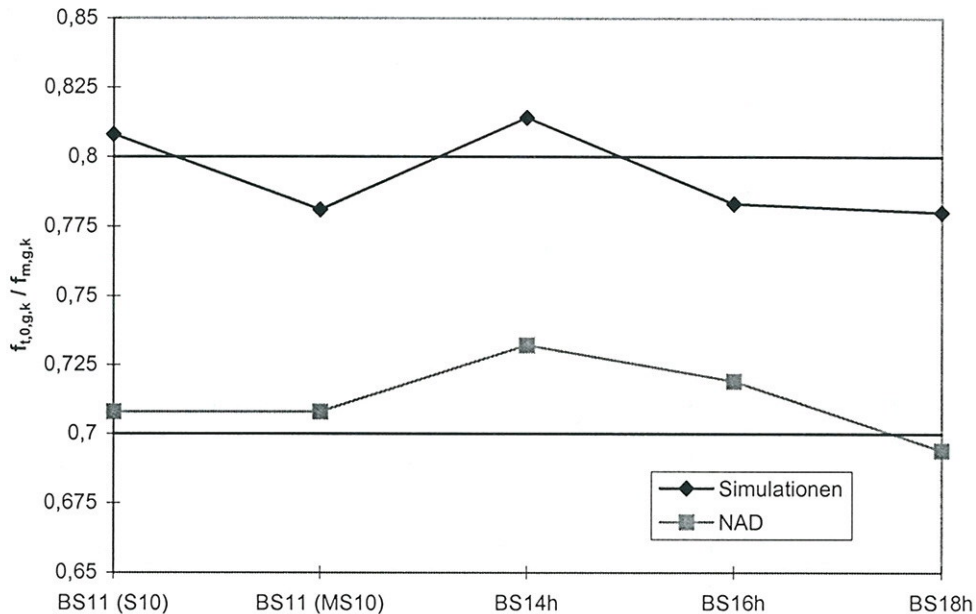


Bild 9: Verhältnis Zugfestigkeit zur Biegefestigkeit

Die durchgeführten Versuche und Simulationsrechnungen zeigen, daß die im NAD angegebenen Werte für die charakteristischen Zugfestigkeiten von Brettschichtholz parallel zur Faser erreicht werden. Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben kann das Verhältnis von Zugfestigkeit zu Biegefestigkeit für BSH nach DIN 1052 offenbar auf mindestens 0,75 angehoben werden.

5 Zusammenfassung

Unterschiedliche Verhältnisse von Zugfestigkeit zur Biegefestigkeit von Brettschichtholz nach europäischen Normen bzw. von zulässigen Zug- zu Biegespannungen nach DIN 1052 ließen es notwendig erscheinen, Untersuchungen zur Zugfestigkeit in Faserrichtung von Brettschichtholz durchzuführen. Hierfür sollte das bereits für umfangreiche Simulationsrechnungen zur Biegefestigkeit von Brettschichtholz eingesetzte Rechenprogramm Karlsruher Rechenmodell (KAREMO) verwendet und dahin geändert werden, daß die Zugfestigkeit von Trägern aus Brettschichtholz berechnet werden kann. Zur Überprüfung des Rechenprogramms wurden Versuche in Bauteilgröße durchgeführt, wobei die Materialeigenschaften der hierfür verwendeten Lamellen bestimmt wurden, damit entsprechende Träger simuliert werden konnten.

Ein Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und den Ergebnissen der Simulationsrechnungen zeigt, daß das geänderte Rechenprogramm realistische Werte für die Zugfestigkeit liefert und somit für allgemeine Berechnungen der

Zugfestigkeit von Brettschichtholz angewendet werden kann. Bei den Simulationsrechnungen zur Ermittlung der Zugfestigkeit von Brettschichtholzträgern wurden die Einflüsse von Trägerhöhe, Trägerlänge, Keilzinkenfestigkeit und Trägeraufbau für die verschiedenen Festigkeitsklassen untersucht. Dabei wurde deutlich, daß die Trägerhöhe keinen signifikanten Einfluß auf die Zugtragfähigkeit hat, während die Trägerlänge und die Keilzinkenfestigkeit die Zugfestigkeit von BSH beeinflussen.

Aus den Rechenergebnissen geht hervor, daß die im NAD angegebenen Rechenwerte der charakteristischen Zugfestigkeiten für Brettschichtholz das geforderte Sicherheitsniveau gewährleisten. Das Verhältnis der charakteristischen Zugfestigkeit parallel zur Faser zur charakteristischen Biegefestigkeit beträgt für alle Festigkeitsklassen von Brettschichtholz im Mittel etwa 0,8. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen können insbesondere für BSH der Festigkeitsklassen bis zu BS14 höhere Rechenwerte für die charakteristischen Zugfestigkeiten vorgeschlagen werden.

6 Literatur

COLLING, F., (1992), Karlsruher Rechen-Modell, Ein Handbuch mit Erläuterungen zu den Eingabedaten, unveröffentlicht

COLLING, F., EHLBECK, J., KURZWEIL, L., (1995), Vergleichende Betrachtungen europäischer Bauproduktennormen mit nationalen Bestimmungen - Teilprojekt: Erstellung von Eigenschaftsprofilen von Brettschichtholz (E-92/7i), Deutschland

Zitierte Normen, Vornormen und Normentwürfe

DIN 1052 Teil1, April1988	Holzbauwerke - Teil 1: Berechnung und Ausführung
DIN 1052-1/A1, Oktober 1996	Holzbauwerke - Teil 1: Berechnung und Ausführung
DIN V ENV 1995 Teil 1-1, Juni 1994	Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holztragwerken, Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau
Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1995-1-1, Februar 1995	Nationales Anwendungsdokument (NAD)

Prüfkörper	1A		1B	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	15838	490	14538	464
2	16160	490	15267	486
3	16394	488	15564	478
4	15583	451	15368	458
5	16771	519	15428	480
6	17516	510	15622	501
7	19840	577	15802	512
8	18644	544	15920	458
9	17599	530	15639	473
10	16981	505	15579	502
11	15675	452	15372	469
12	16405	495	15724	490
13	16163	501	15317	485
14	15921	505	14855	489

Prüfkörper	2A		2B	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	13113	441	10584	413
2	13688	458	11772	397
3	15052	555	11931	408
4	17569	487	12797	402
5	20057	533	12502	427
6	13962	434	11782	463
7	13260	399	10974	432

Prüfkörper	3A		3B	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	12952	479	11561	365
2	11390	387	MS13	
3	14078	467	12087	471
4	14833	463	10754	396
5	13373	451	12078	503
6	12093	409	10769	370

Prüfkörper	4A		4B	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	13839	424	14950	472
2	13996	464	16080	490
3	14184	483	12291	481
4	14278	434	12998	426
5	14389	497	13322	435
6	14547	482	13436	426
7	14715	509	13459	425
8	14468	435	13392	468
9	14298	474	13192	439
10	14193	463	12722	455
11	14164	478	16109	501
12	13866	446	14952	445

Prüfkörper	5A		5B	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	13700	461	16445	460
2	11963	446	14663	414
3	14633	440	14693	473
4	14724	480	14776	422
5	14948	49	15005	468
6	16320	487	15351	445
7	16878	490	17002	497
8	16972	510	18006	482
9	16852	508	16226	456
10	16300	484	15111	495
11	14794	469	14956	479
12	14692	505	14742	438
13	12713	398	14687	429
14	13734	471	16698	518

Prüfkörper	101 - MS13		102 - MS17	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	14154	457	14547	464
2	14703	476	14566	462
3	12980	411	16235	488
4	15232	444	14087	460
5	14075	458	16255	475
6	15716	463	13770	414
7	13613	477	13677	427
8	16520	482	14571	491
9	16268	510	15861	499
10	14481	442	15235	492

Prüfkörper	103 - MS17		104 - MS17	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	13336	458	13808	463
2	13655	419	15479	488
3	16762	496	15067	453
4	15719	457	14819	490
5	14333	389	14944	383
6	15794	485	15870	531
7	15088	432	16451	493
8	14594	495	15509	526
9	15229	488	12635	399
10	12968	418	16121	468

Prüfkörper	105 - MS13		106 - MS13	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	16004	499	15215	405
2	17510	400	15574	487
3	16169	454	15471	400
4	15001	493	16139	480
5	15255	454	13790	444
6	14794	436	14774	434
7	14390	465	15203	476
8	14163	473	14345	454
9	13841	436	15608	457
10	15890	505	14812	466

Prüfkörper	107 - MS13		108 - MS13	
Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	15108	462	14368	474
2	17511	465	14929	422
3	14383	453	14436	483
4	15183	472	15491	452
5	13542	445	16558	480
6	16061	455	17684	528
7	14744	467	18189	490
8	17900	464	17122	488
9	15595	432	15010	433
10	14662	415	16590	506

Prüfkörper Lamelle Nr.	109 - MS17		110 - MS17	
	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	14965	424	15196	516
2	15490	476	16237	462
3	15565	444	13480	468
4	15136	489	15705	489
5	18394	510	15358	515
6	15009	439	14243	471
7	15485	538	16755	549
8	16472	526	14331	475
9	16919	553	13711	453
10	14310	468	14956	460

Prüfkörper Lamelle Nr.	111 - S13		112 - S13	
	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1		485	10724	441
2		432	11742	462
3		410	9778	450
4		506	12216	441
5		435	12689	412
6		463	12181	418
7		453	14178	481
8		411	11856	430
9		414	13982	414
10		432	16898	451

Prüfkörper Lamelle Nr.	113 - S13		114 - S13	
	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]
1	10512	415	10561	416
2	13668	480	12243	462
3	13003	451	12692	447
4	12806	454	14332	466
5	10343	379	14416	485
6	11247	452	12344	439
7	10656	398	13415	433
8	14331	488	12174	462
9	13325	469	12714	452
10	11073	424	12030	468

Prüfkörper	115 - S13		116 - S10	
	Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]
1	11121	425	11259	420
2	10708	414	9299	402
3	13109	469	12786	437
4	12226	470	10917	387
5	11544	444	11766	404
6	12083	439	10320	423
7	13732	447	10693	442
8	14562	450	12283	424
9	16403	494	12108	443
10	13560	454	10373	417

Prüfkörper	117 - S10		118 - S10	
	Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]
1	14450	465	9037	390
2	12267	464	9129	396
3	7761	361	10204	394
4	7751	372	11992	401
5	11760	405	14789	459
6	12042	426	14069	460
7	9161	402	10770	442
8	11250	422	7592	392
9	11190	462	8689	414
10	10324	449	12106	439

Prüfkörper	119 - S10		120 - S10	
	Lamelle Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]
1	13312	459	13313	454
2	9096	404	13563	457
3	11219	428	13916	424
4	12971	488	12239	430
5	8625	384	10113	404
6	11099	411	13497	461
7	13196	442	12401	444
8	10477	419	11836	417
9	13177	418	8535	364
10	11617	440	12375	424

