

Vergleichende Betrachtungen europäischer Bauprodukten- Normen mit nationalen Bestimmungen

Teilprojekt:
Erstellung von Eigenschaftsprofilen von Brettschichtholz (E-92/7i)

von

F. Colling, J. Ehlbeck und L. Kurzweil

Inhaltsübersicht:

- 1 Einleitung
- 2 Auswertung bisheriger Versuche
- 3 Simulationsrechnungen
 - 3.1 Eingangsdaten für das Rechenmodell
 - 3.2 Trägerabmessungen und Trägeraufbau
 - 3.3 Variationen
- 4 Ergebnisse und Diskussion
 - 4.1 Simulierte Keilzinkenfestigkeiten
 - 4.2 Simulierte Brett-Zugfestigkeiten
 - 4.3 Simulierte Brettschichtholz-Biegefestigkeiten
- 5 Zusammenfassung
- 6 Literatur

1 Einleitung

Der EUROCODE 5 Teil 1 (ENV 1995-1-1) regelt die Bemessung von Holzkonstruktionen und stellt somit das europäische Pendant zur DIN 1052 dar. Im Gegensatz zur DIN 1052 werden im EUROCODE 5 (EC 5) keine Angaben über Werkstoffeigenschaften gemacht, sondern dieser bezieht sich auf eine Vielzahl von begleitenden und unterstützenden Normen, in denen die Eigenschaften von Werkstoffen geregelt sind.

Die Eigenschaften von Brettschichtholz (BSH) sollen in prEN 1194 geregelt werden, die derzeit noch in Bearbeitung ist. Hier gilt es, die deutschen Interessen dahingehend zu vertreten, daß die zu vereinbarenden europäischen Festigkeitsklassen auf das in Deutschland hergestellte BSH mit den verwendeten Sortierklassen der Bretter möglichst gut abgestimmt sind.

Da aber noch keine gesicherten Erkenntnisse über die Tragfähigkeit von BSH mit den in DIN 4074 neu aufgenommenen maschinellen Sortierklassen vorliegen, bestand der Bedarf an diesbezüglichen Untersuchungen.

Ziel dieses Vorhabens war somit, auf der Grundlage vorliegender Versuchsdaten und Erfahrungen, insbesondere jedoch mit Hilfe von Simulationsrechnungen mit dem sogenannten 'Karlsruher Rechenmodell' (KAREMO), die Tragfähigkeit (Biegefestigkeit) von BSH mit den in Deutschland eingesetzten Brett-Sortierklassen unter definierten Randbedingungen (z.B. 600 mm Trägerhöhe) abzuschätzen.

2 Auswertung bisheriger Versuche

Colling [1] sammelte eine Vielzahl von in der nationalen und internationalen Literatur verfügbaren Daten zu Versuchen mit Brettschichtholz- (BSH-) Trägern (insgesamt 1767 Einzelversuche). Diese Daten bildeten die Grundlage für die nachfolgenden Auswertungen.

In Bild 2.1 sind sämtliche Versuchsergebnisse für BSH aus den Holzarten Fichte/Tanne zusammengefaßt. In dieser Darstellung wird nach der Versagensart, nicht jedoch nach der Trägergröße oder der Brettqualität unterschieden. Es wird deutlich, daß die Träger, die aufgrund eines Versagens im Bereich einer Keilzinkenverbindung zu Bruch gingen, eine geringere Tragfähigkeit aufweisen, als die Träger mit Holzversagen im Bereich eines Astes. Dies unterstreicht die Bedeutung der Keilzinkenverbindung für die Tragfähigkeit von BSH-Trägern.

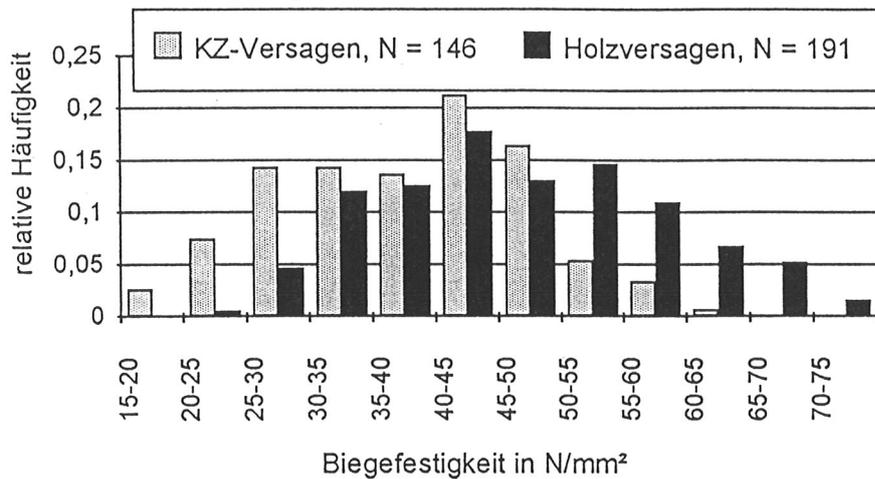


Bild 2.1: Tragfähigkeit von BSH-Trägern

Will man die vorliegenden Versuche detaillierter auswerten - z.B. in Abhängigkeit von der Trägergröße oder der Brettqualität -, so steht man vor dem Problem, daß oftmals keine statistisch abgesicherten Aussagen möglich sind, weil die Anzahl der verwertbaren Versuchsergebnisse hierzu nicht ausreichen. Es wurde z.B. die weitaus überwiegende Zahl von Versuchen mit kleinen Trägern (Höhen unter 500 mm) durchgeführt, so daß eine Höhenabhängigkeit ('Volumeneinfluß') nicht statistisch gesichert angegeben werden kann (siehe Bild 2.2).

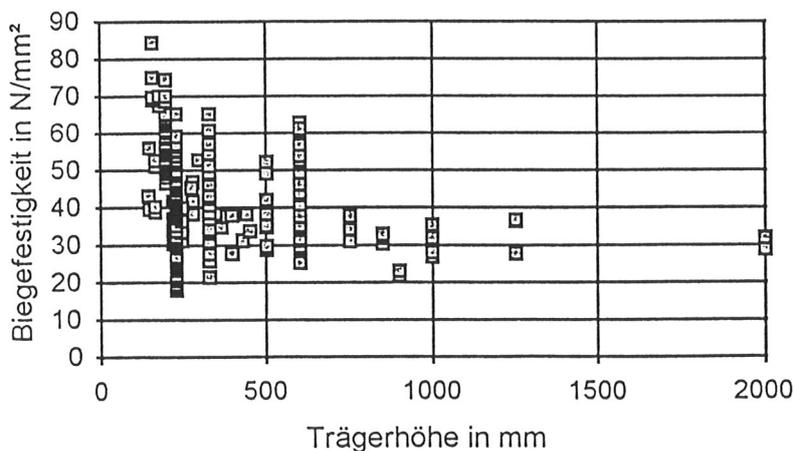


Bild 2.2: Biegefestigkeit von BSH-Trägern in Abhängigkeit von der Trägerhöhe (Alle Träger, ohne Unterscheidung nach Versagensart oder Brettqualität)

Erschwert wird eine Aussage über den Einfluß der Trägergröße zusätzlich dadurch, daß die für die verschiedenen Sortierklassen verfügbaren Daten beschränkt sind, da entweder die Brettqualität nicht bekannt ist oder speziell ausgesuchte Sonderbretter verwendet wurden, die keiner Sortierklasse nach DIN 4074 zugeordnet werden können.

Aufgrund der vorliegenden Versuche ist es somit kaum möglich, Angaben zur Tragfähigkeit von 600 mm hohen BSH-Trägern aus Brettern unterschiedlicher Sortierklassen zu machen. Insbesondere über die Tragfähigkeit von BSH-Trägern mit maschinell sortierten Brettern nach DIN 4074 liegen keine Erkenntnisse vor. Daher wurden die im nächsten Abschnitt beschriebenen Simulationsrechnungen mit dem KAREMO durchgeführt.

3 Durchführung von Simulationsrechnungen

3.1 Allgemeines

Das KAREMO wurde in den letzten Jahren mehrfach eingesetzt, um das Trag- und Verformungsverhalten von BSH-Trägern, das durch Versuche bestimmt wurde, auch rechnerisch zu ermitteln (siehe z.B. [1], [2] und [3]). Die Übereinstimmung, die hierbei erzielt wurde, war sehr gut: so lagen z.B. die Abweichungen zwischen berechneten [2] und versuchsmäßig [4] ermittelten Werten unter 5%. Das KAREMO kann somit als geeignetes Mittel zur Abschätzung der Tragfähigkeit von BSH-Trägern angesehen werden.

Da die nachfolgend aufgeführten Eingangsdaten für das Rechenmodell nicht mit denen übereinstimmten, die das KAREMO bislang verarbeiten konnte, waren z.T. erhebliche Modifikationen des Programms notwendig. Auf eine Darstellung dieser Veränderungen wird hier jedoch verzichtet.

3.2 Eingangsdaten für das Rechenmodell

Eingangsdaten für das Rechenmodell sind Verteilungen für die Längen der Bretter und deren Holzeigenschaften Ästigkeit (größter in einem Brett auftretender KAR-Wert), Rohdichte und mittlerer Längs-(Zug-)Elastizitätsmodul.

Die Keilzinkenfestigkeiten werden entweder über Regressionsgleichungen in Abhängigkeit vom Keilzinkenprofil (15 mm oder 20 mm) und den Holzeigenschaften berechnet oder auf der Grundlage von vorgegebenen Verteilungen für die Zugfestigkeit simuliert. Nähere Angaben sind in [1] gegeben.

Für die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Berechnungen wurden die nachfolgend aufgeführten Daten zugrundegelegt.

3.2.1 Holzeigenschaften

Die Verteilungswerte für die Holzeigenschaften sind in **Tabelle 3.1** angegeben. Diese stammen aus umfangreichen Untersuchungen an Brettern, die am Institut für Holzforschung der Universität München unter Leitung von Prof. Glos durchgeführt wurden¹.

Tabelle 3.1: Zugrundegelegte Verteilungen der Holzeigenschaften der Bretter

Mittelwert m / 5% bzw. 95 % Fraktile	S 7	MS 7	S 10	MS 10	S 13	MS 13	MS 17
max KAR [-] m/x_{95}	0,38/ 0,52	0,33/ 0,50	0,29/ 0,41	0,29/ 0,44	0,20/ 0,30	0,25/ 0,40	0,21/ 0,36
Rohdichte ρ_{12} [g/cm ³] m/x_5	0,45/ 0,38	0,42/ 0,36	0,45/ 0,39	0,43/ 0,38	0,46/ 0,38	0,46/ 0,41	0,50/ 0,44
E-Modul E_{BA} [N/mm ²] m/x_5	10200/ 6800	8900/ 6400	11100/ 7800	10300/ 8400	12300/ 8400	12100/ 10100	14300/ 11800

Bei den maschinell sortierten Brettern (MS-Klassen) wurden mehrere Sortierparameter gleichzeitig zum Ansatz gebracht, so daß z.B. hohe Festigkeiten auch beim Auftreten großer Äste erreicht werden können, wenn eine entsprechend hohe Rohdichte vorliegt. Umgekehrt kann auch ein Brett mit niedriger Rohdichte und kleinen Ästen eine hohe Festigkeit aufweisen. Daher besteht bei den maschinell sortierten Brettern eine gewisse Abhängigkeit zwischen den Sortierparametern Rohdichte und Ästigkeit, die in **Bild 3.1** dargestellt ist.

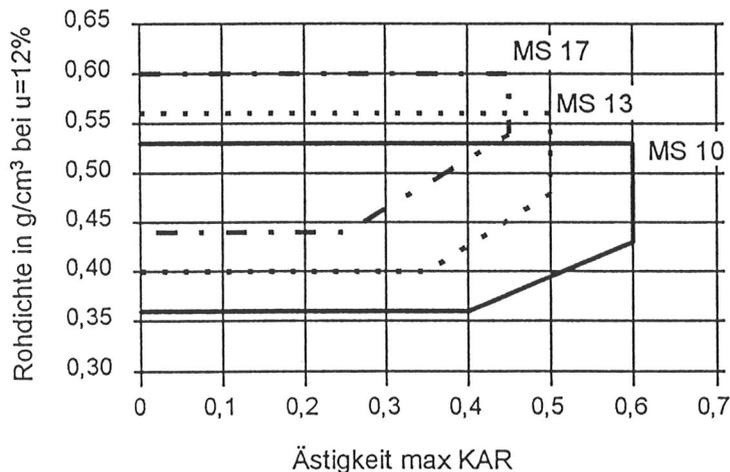


Bild 3.1: Hüllkurven für die Holzeigenschaften der maschinell sortierten Bretter

Mit Hilfe dieser Hüllkurven werden bei den Simulationsrechnungen die Holzeigenschaften so eingegrenzt, daß die simulierten Bretter Festigkeitswerte liefern, die der gewählten Sortierklasse zugeordnet werden können. So wird z.B. ausgeschlossen, daß in der Sortierklasse MS 17 eine Rohdichte von 0,45 g/cm³ und gleichzeitig ein KAR-Wert von 0,4 simuliert wird, weil die Festigkeit dieses Brettes zu gering wäre.

¹ Herrn Prof. Glos sei an dieser Stelle für die Bereitstellung der Daten gedankt.

Weiterhin muß erwähnt werden, daß bei den am Institut für Holzforschung durchgeführten Versuchen eine Prüflänge vom neunfachen der Brettbreite verwendet wurde, so wie dies in EN 408 vorgeschrieben wird. Hierbei wurde der augenscheinlich schwächste Querschnitt in den Prüfbereich gelegt. Der Längs-Elastizitätsmodul wurde dabei über eine Länge von 600 mm gemessen, mit dem schwächsten Querschnitt im Meßbereich. Der bei diesen Versuchen gemessene E-Modul entspricht somit dem E-Modul eines Brettabschnittes (BA), und nicht dem des gesamten Brettes, so wie er im KAREMO erwartet wird. Daher war eine Umrechnung der Versuchsdaten erforderlich, die nachfolgend beschrieben ist.

Die am Institut für Holzforschung ermittelte Abhängigkeit zwischen dem Längs-Elastizitätsmodul E_{BA} eines geprüften Brettabschnittes und der Rohdichte berechnet sich nach Gl.(1) und ist in **Bild 3.2** als **Gerade A** dargestellt.

$$E_{BA} = 42\,500 * \rho_{12} - 7\,600 \quad (1)$$

mit

ρ_{12} = Rohdichte in g/cm^3 bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$

Die von Colling/Görlacher [5] ermittelte, für ganze Bretter gültige Abhängigkeit ist als **Gerade B** eingezeichnet und berechnet sich nach Gl.(2):

$$E_B = 40\,170 * \rho_{12} - 5\,520 \quad (2)$$

ebenfalls mit

ρ_{12} = Rohdichte in g/cm^3 bei einer Holzfeuchte von $u=12\%$

Bei den Simulationsrechnungen wurde nun folgendermaßen vorgegangen:

1. Aus einer gegebenen Verteilung für den E-Modul (siehe **Tabelle 3.1**) wurde ein zufälliger Wert E_{BA} gewählt (Monte-Carlo-Simulation).
2. Auf der Grundlage von Gl.(1) und Gl.(2) wurde dieser Wert mit Hilfe von Gl.(3) auf einen zugehörigen Brett-E-Modul E_B umgerechnet:

$$E_B = (40\,170 / 42\,500) E_{BA} + (40\,170 / 42\,500) * 7600 - 5\,520 \quad (3a)$$

$$E_B = 0,9454 E_{BA} + 1665 \quad (3b)$$

Mit diesem Verfahren war es möglich, den E-Modul eines geprüften Brettabschnittes auf den vom Rechenprogramm verwendeten Brett-E-Modul umzurechnen.

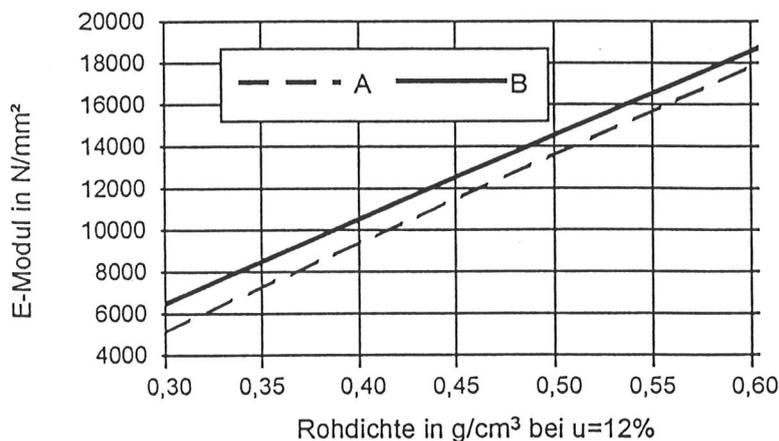


Bild 3.2: Abhängigkeiten zwischen E-Modul und Rohdichte
Gerade A: Abhängigkeit für 600 mm Brettabschnitte nach Glos
Gerade B: Abhängigkeit für Bretter nach Colling/Görlacher [5]

3.2.2 Keilzinkenfestigkeiten

Die in [3] durchgeführten Zugversuche mit Keilzinkenverbindungen ergaben die in **Bild 3.3** dargestellten Abhängigkeiten zwischen der Zugfestigkeit und der kleineren Rohdichte der beiden miteinander verbundenen Bretter. In diesem Bild wurde zwischen den beiden untersuchten Profilen (15 mm und 20 mm) unterschieden.

Die zugehörigen Regressionsgleichungen für die Zugfestigkeit f_t in N/mm^2 , die auch bei den Simulationsrechnungen verwendet wurden, sind:

$$15 \text{ mm-Profil} \quad f_{t,KZ15} = 116 \rho_{12} - 11,2 \quad (4)$$

mit einem Korrelationskoeffizienten $R = 0,45$ und einer Reststreuung $s_R = 7,29 N/mm^2$;

$$20 \text{ mm-Profil} \quad f_{t,KZ20} = 89,4 \rho_{12} - 6,5 \quad (5)$$

mit einem Korrelationskoeffizienten $R = 0,55$ und einer Reststreuung $s_R = 5,32 N/mm^2$.

Hierbei ist ρ_{12} jeweils in g/cm^3 einzusetzen.

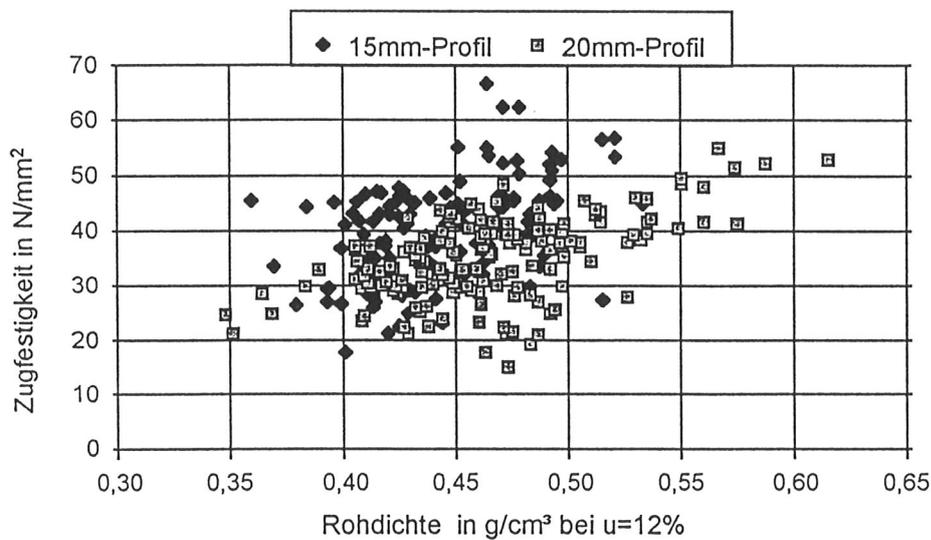


Bild 3.3: Keilzinken-Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Keilzinkenprofil und der Rohdichte

3.3 Trägerabmessungen und Trägeraufbau

Bei den Simulationsrechnungen wurde der in **Bild 3.4** dargestellte BSH-Träger zugrundegelegt.

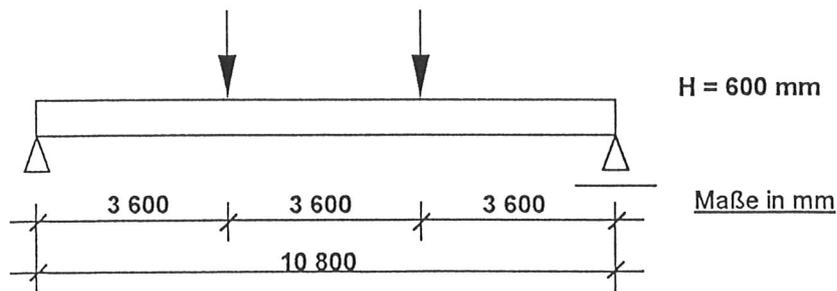


Bild 3.4: Trägerabmessungen

Weiterhin wurde festgelegt, daß der Träger aus insgesamt 18 Brettlagen mit einer Dicke von jeweils 33,3 mm zusammengesetzt ist. Für die im nächsten Abschnitt beschriebenen Trägervarianten wurde der Querschnitt in fünf Bereiche eingeteilt (siehe **Bild 3.5**).

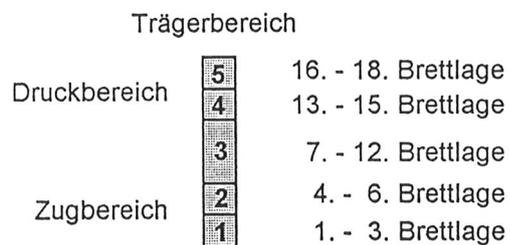


Bild 3.5: Trägeraufbau

3.4 Variationen

3.4.1 Variation des Trägeraufbaus

Zunächst wurde die Tragfähigkeit von homogen aufgebauten Trägern (Kennzeichnung "h") berechnet, bei denen jeweils nur Bretter einer Sortierklasse verwendet wurden. Die verschiedenen Trägertypen sind mit den zugehörigen Brett-Sortierklassen in **Tabelle 3.2** angegeben.

Tabelle 3.2: Homogene Trägertypen, Bezeichnung und Trägeraufbau

	homogene Trägertypen				
Trägerbereich	S10 _h	S13 _h	MS10 _h	MS13 _h	MS17 _h
1 - 5	S10	S13	MS10	MS13	MS17

Berichtetes als einfach abgestufte kombinierte Träger bezeichnet (Kennzeichnung "k₁"). Der Trägeraufbau wurde hierbei sowohl symmetrisch (Kennzeichnung "s") als auch asymmetrisch (Kennzeichnung "a") zur Mittelachse vorgenommen. Die untersuchten Trägertypen sind in **Tabelle 3.3** angegeben.

Tabelle 3.3: Einfach abgestufte, kombinierte Trägertypen, Bezeichnung und Trägeraufbau

Trägerbereich	einfach abgestufte Trägertypen					
	S13 _{k1s}	S13 _{k1a}	MS13 _{k1s}	MS13 _{k1a}	MS17 _{k1s}	MS17 _{k1a}
1	S13	S13	MS13	MS13	MS17	MS17
2 - 4	S10	S10	MS10	MS10	MS13	MS13
5	S13	S10	MS13	MS10	MS17	MS13

Abschließend wurden kombinierte Trägertypen untersucht, bei denen drei verschiedene Brett-Sortierklassen eingesetzt wurden. Diese werden im weiteren Verlauf als zweifach abgestufte Träger bezeichnet (Kennzeichnung "k₂"). Auch bei diesen Trägern wurden symmetrische und asymmetrische Trägeraufbauten untersucht. Die untersuchten Trägertypen sind in **Tabelle 3.4** angegeben.

Tabelle 3.4: Zweifach abgestufte, kombinierte Trägertypen, Bezeichnung und Trägeraufbau

Trägerbereich	zweifach abgestufte Trägertypen					
	S13 _{k2s}	S13 _{k2a}	MS13 _{k2s}	MS13 _{k2a}	MS17 _{k2s}	MS17 _{k2a}
1	S13	S13	MS13	MS13	MS17	MS17
2	S10	S10	MS10	MS10	MS13	MS13
3	S7	S7	MS7	MS7	MS10	MS10
4	S10	S10	MS10	MS10	MS13	MS13
5	S13	S10	MS13	MS10	MS17	MS13

3.4.2 Variation der Keilzinkenfestigkeiten

Die bei den Simulationsrechnungen zugrundegelegten Regressionsgleichungen für die Keilzinkenfestigkeit (siehe Gl.(4) und Gl.(5)) wurden anhand von Proben ermittelt, die aus mehreren Betrieben entnommen wurden. Die mit diesen Regressionsgleichungen berechneten Trägerfestigkeiten entsprechen somit den Werten, die im Mittel für eine bestimmte Gruppe von Leimbaubetrieben (z.B. Betriebe mit gleichen Keilzinkenprofilen) zu erwarten ist.

Künftig werden sowohl national als auch international Mindestanforderungen an die Keilzinkenfestigkeit gestellt werden, so daß weniger die Frage interessiert, wie groß die im Mittel zu erwartende charakteristische BSH-Festigkeit unter Verwendung eines bestimmten Keilzinkenprofils ist, sondern vielmehr, welche Keilzinkenfestigkeit erforderlich ist, um eine vorgegebene BSH-Festigkeit zu erreichen. Diese geforderten Keilzinkenfestigkeiten müssen von jedem Leimbaubetrieb erfüllt und nachgewiesen werden.

Zur Beantwortung dieser Frage wurden bei den Simulationsrechnungen folgende Vorgehensweisen gewählt:

1. Zunächst wurde die Verteilung der Keilzinken-Zugfestigkeiten variiert, wobei die charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit zwischen 10 und 50 N/mm² lag.
2. In einem zweiten Schritt wurden zur Erreichung der unter Pkt. 1 ermittelten erforderlichen Keilzinkenfestigkeiten Mindestrohddichten der Bretter vorgegeben, die schrittweise gesteigert wurden. Bei diesen Berechnungen wurden wiederum die Regressionsgleichungen (4) und (5) verwendet. Die Vorgabe einer Mindestrohddichte der Bretter führt nicht nur zu höheren Keilzinkenfestigkeiten, sondern auch zu höheren Brettfestigkeiten.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Allgemeines

Die Tragfähigkeit von BSH-Trägern wird von der Qualität der Bretter und der Qualität der Keilzinkenverbindungen bestimmt. Da die Größe der zugehörigen Festigkeitswerte auch für die Bewertung der Rechenergebnisse von großer Bedeutung ist, werden nachfolgend zunächst die simulierten Keilzinken- und Brettfestigkeiten behandelt, bevor die Rechenergebnisse für die BSH-Träger diskutiert werden.

4.2 Simulierte Keilzinkenfestigkeiten

In **Tabelle 4.1** sind die simulierten Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit vom Keilzinkenprofil und der Sortierklasse der Bretter angegeben. Ebenfalls angegeben ist die erwartete zugehörige charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,j,k}$, wobei ein konstantes Verhältnis $f_{t,j,k} / f_{m,j,k} = 0,7$ angenommen wurde (vgl. [3]).

Tabelle 4.1: Simulierte Keilzinkenfestigkeiten

Sortier- klasse	Keilzinken - Profil					
	15 mm			20 mm		
	Mittelwert					
	$f_{t,j,mean}$ N/mm ²	$f_{t,j,k}$ N/mm ²	$f_{m,j,k}^{1)}$ N/mm ²	$f_{t,j,mean}$ N/mm ²	$f_{t,j,k}$ N/mm ²	$f_{m,j,k}^{1)}$ N/mm ²
S 10	37,8	24,4	34,9	31,3	21,4	30,6
S 13	39,8	25,6	36,6	32,8	22,3	31,9
MS 10	36,1	23,6	33,7	30,1	20,9	29,9
MS 13	40,4	27,9	39,9	33,3	24,1	34,4
MS 17	46,1	33,5	47,9	37,7	28,4	40,6

¹⁾ Annahme: $f_{t,j,k} / f_{m,j,k} = 0,7$ nach [3]

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die Festigkeitswerte für Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Sortierklassen S10 und MS10 sind etwa gleich hoch.
- Die Festigkeitswerte für Keilzinkenverbindungen aus MS13-Brettern sind höher als die für Keilzinkenverbindungen aus S13-Brettern. Dies kann mit der geringeren Streuung der Rohdichte bei MS13-Brettern und der zugehörigen höheren charakteristischen Rohdichte erklärt werden (vgl. Tabelle 3.1).
- Die Keilzinkenverbindungen aus MS17-Brettern liefern erwartungsgemäß die höchsten Festigkeiten. Dies kann erneut mit den Holzeigenschaften erklärt werden.
- Die simulierten charakteristischen Zugfestigkeiten für Keilzinkenverbindungen mit einem 15 mm-Profil liegen durchweg etwa 15% über den zugehörigen Werten des 20 mm-Profiles.

Dieses Ergebnis war durch die Zugrundelegung unterschiedlicher Regressionsgleichungen für die beiden Keilzinkenprofile auch zu erwarten (vgl. Gl.(4) und Gl.(5)).

4.3 Simulierte Brett-Zugfestigkeiten

Bei der Simulation des Trägeraufbaus und der Brettabschnittseigenschaften wurde von jedem Brett die zugehörige Zugfestigkeit bestimmt. Hierbei wurde als Brett-Zugfestigkeit die kleinste Zugfestigkeit aller in diesem Brett enthaltenen Brettabschnitte genommen.

Hierbei ist folgendes zu berücksichtigen:

- Bei der Ermittlung der simulierten Brett-Zugfestigkeit wurden alle Brettabschnitte eines Brettes betrachtet. Dies bedeutet, daß die ermittelten Werte für Bretter mit einer Länge von im Mittel 4 m gelten.
- Die zugrundegelegten Regressionsgleichungen zur Berechnung der Brettabschnitts-Zugfestigkeiten gelten für Brettabschnitte, die einem ebenen Dehnungszustand unterworfen sind, und bei denen die rechnerische Zugfestigkeit nicht durch Zusatzspannungen infolge von seitlichen Auslenkungen, wie bei Zugversuchen üblich, reduziert wird.

Die in **Tabelle 4.2** angegebenen Werte für die simulierten Brett-Zugfestigkeiten sind somit nur bedingt mit Ergebnissen an Brettabschnitten mit einer Länge von 600 mm zu vergleichen.

Tabelle 4.2: Simulierte Brett-Zugfestigkeiten

Sortierklasse	Zugfestigkeit	
	$f_{t,lam,mean}$ N/mm ²	$f_{t,lam,k}$ N/mm ²
S 10	33,7	19,2
S 13	40,5	23,3
MS 10	31,6	18,3
MS 13	37,8	21,8
MS 17	44,7	26,9

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die Zugfestigkeiten von S10- und MS10-Brettern sind etwa gleich groß.
- Im Gegensatz zu den Keilzinkenverbindungen liegen die simulierten Zugfestigkeiten von MS13-Brettern unter denen der S13-Brettern. Dies deutet darauf hin, daß die höheren Rohdichten der MS13-Klasse nicht zum Tragen kommen, sondern daß der Einfluß der in **Tabelle 3.1** angegebenen größeren Ästigkeit dieser Klasse überwiegt. Die Simulationsrechnungen deuten somit darauf hin, daß die in **Abschnitt 3.2** erläuterten und in **Bild 3.1** dargestellten Hüllkurven nicht die erwartete Wirkung hatten.
- Die höchsten Werte für die Brett-Zugfestigkeit liefern erwartungsgemäß die MS17-Bretter, wobei die Steigerung gegenüber z.B. den S13-Brettern nicht so deutlich ausfällt wie bei den

Keilzinkenverbindungen. Auch dies kann mit der verhältnismäßig großen Ästigkeit der MS17-Klasse erklärt werden.

4.4 Brettschichtholz-Biegefestigkeiten

Für sämtliche nachfolgend beschriebenen Trägertypen und Variationen wurden jeweils 1000 Simulationen durchgeführt, wobei die charakteristischen Festigkeitswerte durch Abzählen bestimmt wurden.

4.4.1 Homogene Träger

In **Tabelle 4.3** sind die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für homogen aufgebaute Brettschichtholzträger für die beiden untersuchten Keilzinkenprofile angegeben. Ebenfalls angegeben ist die Anzahl der Träger mit Holzversagen (H-V) und der Träger mit Keilzinkenversagen (KZ-V).

Tabelle 4.3: Simulierte Brettschichtholz-Biegefestigkeiten für homogen aufgebaute Träger

	Keilzinken - Profil					
	15 mm			20 mm		
	$f_{m,g,mean}$ N/mm ²	$f_{m,g,k}$ N/mm ²	H-V/KZ-V % / %	$f_{m,g,mean}$ N/mm ²	$f_{m,g,k}$ N/mm ²	H-V/KZ-V % / %
S10h	33,2	24,5	62/38	30,7	22,7	32/68
S13h	37,3	27,4	47/53	33,5	24,5	17/83
MS10h	31,4	23,7	61/39	29,1	21,3	34/66
MS13h	36,2	27,7	59/41	33,1	24,3	30/70
MS17h	42,7	33,7	58/42	38,2	29,8	20/80

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die charakteristische Biegefestigkeit $f_{m,g,k}$ von Brettschichtholzträgern unter Verwendung eines 15mm-Keilzinkenprofils liegt etwa 12% über der zugehörigen Festigkeit von Brettschichtholzträgern mit 20mm-Keilzinkenverbindungen. Dies bedeutet, daß die Qualität der Keilzinkenverbindungen die Festigkeit des Endproduktes Brettschichtholz in sehr starkem Maße beeinflusst.
- Das Verhältnis der Brettfestigkeit zur Keilzinkenfestigkeit spiegelt sich in der Auftretenshäufigkeit der Versagensarten wider:

Mit steigender Sortierklasse nimmt die Anzahl der Träger mit Holzversagen ab, weil die Keilzinkenverbindungen zunehmend maßgebend werden.

Weiterhin ist der Anteil der Träger mit Keilzinkenversagen bei Brettschichtholzträgern mit 20mm-Keilzinkenverbindungen deutlich höher als bei Brettschichtholz mit 15mm-Keilzinkenverbindungen. Wegen der geringeren Festigkeit der 20mm-Keilzinkenverbindungen werden diese häufiger für das Versagen eines Brettschichtholzträgers maßgebend als die 15mm-Keilzinkenverbindungen.

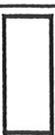
- Die Tragfähigkeit von BSH-Trägern aus S13-Brettern ist etwa gleich groß wie die von BSH-Trägern aus MS13-Brettern. Dies deutet darauf hin, daß bei der Klasse MS13 die geringere Brettfestigkeit durch die höhere Keilzinkenfestigkeit ausgeglichen wurde. Wegen der nach Tabelle 3.1 zu großen zulässigen Ästigkeit der MS13-Bretter konnten jedoch keine höheren Tragfähigkeiten erreicht werden.
- BSH-Träger mit MS17-Brettern ergaben erwartungsgemäß die höchsten Tragfähigkeiten, wobei jedoch auch hier auf den Einfluß der Ästigkeit hinzuweisen ist.

Die Simulationsrechnungen deuten somit darauf hin, daß Brettschichtholzträger aus Brettern der Sortierklassen MS13 und MS17 nicht die erwarteten charakteristischen Biegefestigkeiten von 32 und 36 N/mm² erreichen. Dies kann zumindest teilweise mit den zugrundegelegten Ästigkeitsverteilungen erklärt werden.

4.4.2 Einfluß des Trägersaufbaus

In **Tabelle 4.4** sind die Simulationsergebnisse für nicht homogen aufgebaute Träger in Abhängigkeit vom Keilzinkenprofil zusammengestellt. Für die Bezeichnung der Träger siehe Abschnitt 3.4.1.

Tabelle 4.4: Simulationsergebnisse für kombiniertes Brettschichtholz

	Trägertyp	Keilzinkenprofil					
		15 mm			20 mm		
		$f_{m,g,mean}$	$f_{m,g,k}$	H-V/KZ-V	$f_{m,g,mean}$	$f_{m,g,k}$	H-V/KZ-V
	S13k _{1s}	36,5	27,0	46/54	32,8	24,1	17/83
	MS13k _{1s}	34,8	26,7	59/41	31,9	23,5	30/70
	MS17k _{1s}	41,0	32,3	58/42	36,7	28,6	20/80
	S13k _{2s}	36,4	27,2	47/53	32,7	24,2	16/84
	MS13k _{2s}	34,6	26,6	59/41	31,7	23,3	31/69
	MS17k _{2s}	40,8	32,0	57/43	36,6	28,5	20/80
	S13k _{1a}	35,9	26,7	46/54	32,2	23,7	17/83
	MS13k _{1a}	33,9	26,1	59/41	31,0	22,9	30/70
	MS17k _{1a}	39,8	31,4	57/43	35,7	27,9	21/79
	S13k _{2a}	35,7	26,5	47/53	32,1	23,8	17/83
	MS13k _{2a}	33,8	25,9	60/40	30,9	22,8	31/69
	MS17k _{2a}	39,6	31,1	57/43	35,6	27,7	20/80

Die Ergebnisse der Tabellen 4.3 und 4.4 sind für das 15 mm - Keilzinkenprofil in **Bild 4.1** graphisch dargestellt.

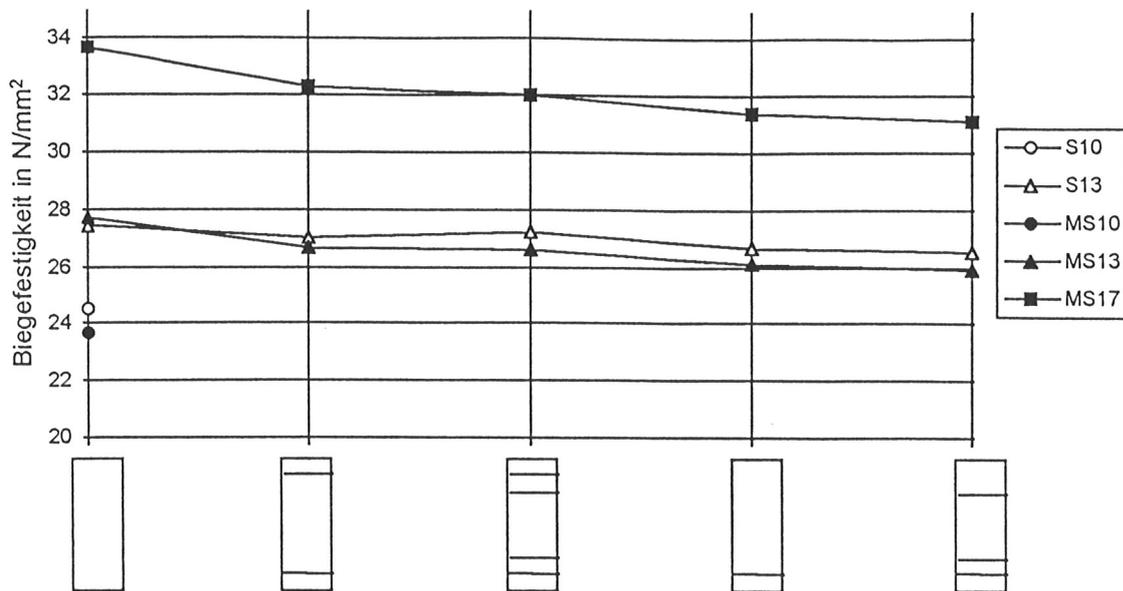


Bild 4.1: Charakteristische Biegefestigkeit von BSH-Trägern in Abhängigkeit vom Trägeraufbau

In **Bild 4.2** sind die Simulationsergebnisse nochmals im Verhältnis zu den Werten der homogen aufgebauten Träger dargestellt.

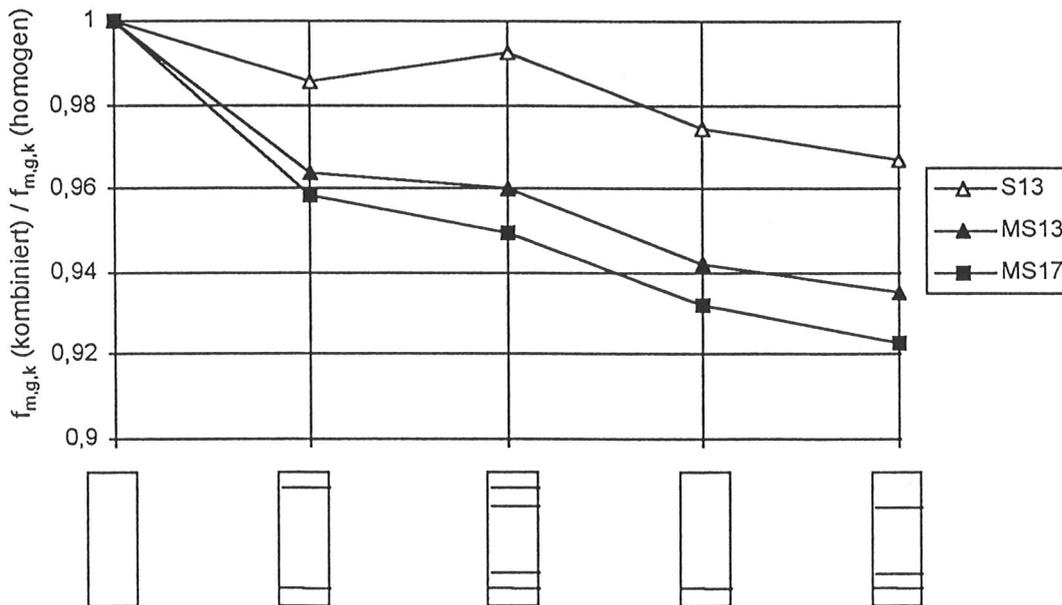


Bild 4.2: Einfluß des Trägeraufbaus

Aus den Rechenergebnissen ist folgendes zu erkennen:

- Bei den symmetrisch aufgebauten Trägern (Kennzeichnung „s“) bewirkt die Verwendung von Brettern geringerer Qualität im inneren Trägerbereich eine Abnahme der charakteristischen Biegefestigkeit von 1 bis 5%.

- Der Verzicht von hochwertigen Brettern im Druckbereich (asymmetrisch aufgebaute Träger, Kennzeichnung „a“) bewirkt einen weiteren Tragfähigkeitsverlust, der jedoch lediglich in der Größenordnung von 2-3% liegt. Die Tragfähigkeiten dieser Träger liegen somit etwa 3 bis 8% unter denen der zugehörigen homogenen Träger.
- Der Tragfähigkeitsverlust bei kombiniertem Brettschichtholz ist größer bei maschinell sortierten Brettern als bei visuell sortierten Brettern. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei maschinell sortierten Brettern mit planmäßig unterschiedlichen Elastizitätsmoduln verwendet werden, so daß hier die äußeren Bretter wegen der vorhandenen Spannungumlagerung (Verbundträgerwirkung) stärker belastet werden.

4.4.3 Einfluß der Keilzinkenfestigkeit

In Bild 4.3 sind für einige Trägertypen die simulierten charakteristischen Biegefestigkeiten in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit dargestellt.

Aus diesem Bild sind drei Bereiche zu erkennen:

- Liegt die charakteristische Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen unterhalb von etwa 25 N/mm^2 , so wird die charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern ausschließlich von der Keilzinkenfestigkeit bestimmt. Die Brettfestigkeit spielt hier keine Rolle. Folgende Abhängigkeit ist zu erkennen:

$$f_{m,g,k} \approx f_{t,j,k}$$

- Im Bereich $25 < f_{t,j,k} < 35 \text{ N/mm}^2$ gewinnt die Brettfestigkeit zunehmend an Bedeutung und der erzielbare Tragfähigkeitsgewinn mit steigender Keilzinkenfestigkeit nimmt ab. In diesem Bereich wird die Brettschichtholzfestigkeit somit von beiden Faktoren Keilzinkenverbindung und Brettqualität beeinflusst.

Im Bereich $f_{t,j,k} > 35 \text{ N/mm}^2$ verliert die Keilzinkenfestigkeit zunehmend an Bedeutung, so daß die Tragfähigkeit nahezu ausschließlich von der Sortierklasse der Bretter bestimmt wird.

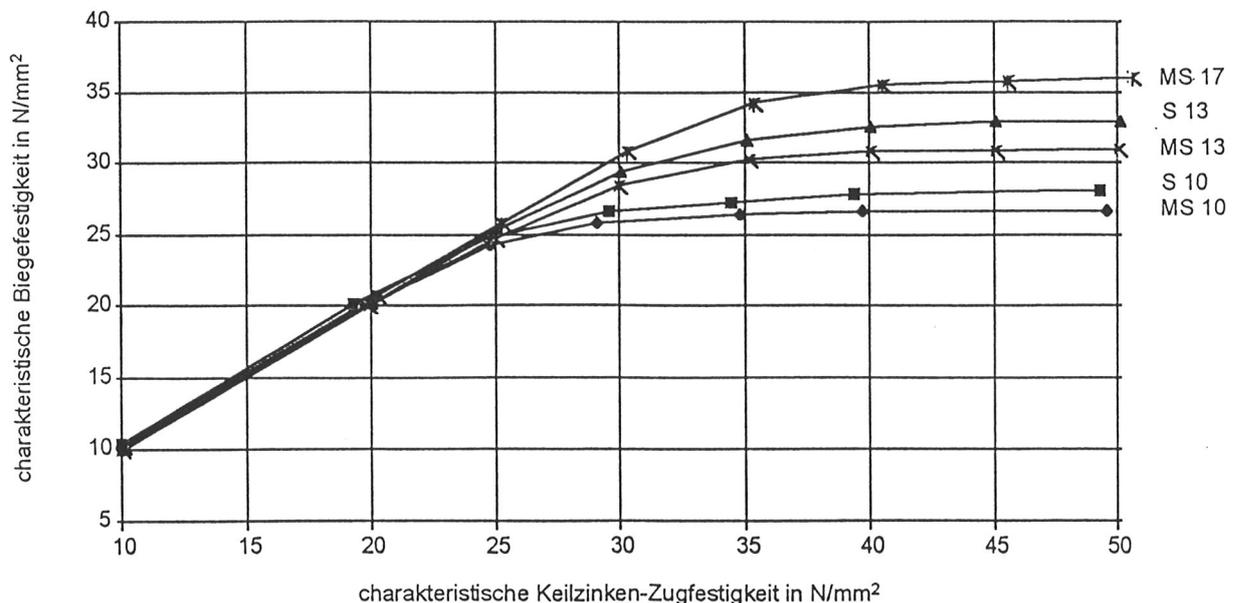


Bild 4.3: Einfluß der Keilzinken-Zugfestigkeit

Aus Bild 4.3 wird erneut deutlich, daß die zugrundegelegten Ästigkeitsverteilungen die Rechenergebnisse beeinflussen. So liegen auch hier die Tragfähigkeiten der visuell sortierten Träger (S13 und S10) über denen der zugehörigen maschinell sortierten Träger (MS13 und MS10).

4.4.4 Einfluß der Mindest-Rohdichte

Die Forderung einer Mindest-Rohdichte bewirkt, daß sowohl die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen als auch die der Bretter beeinflusst wird. In Bild 4.4 sind für einige Trägertypen die Simulationsergebnisse in Abhängigkeit von der geforderten Mindest-Rohdichte dargestellt (15 mm-Keilzinkenprofil).

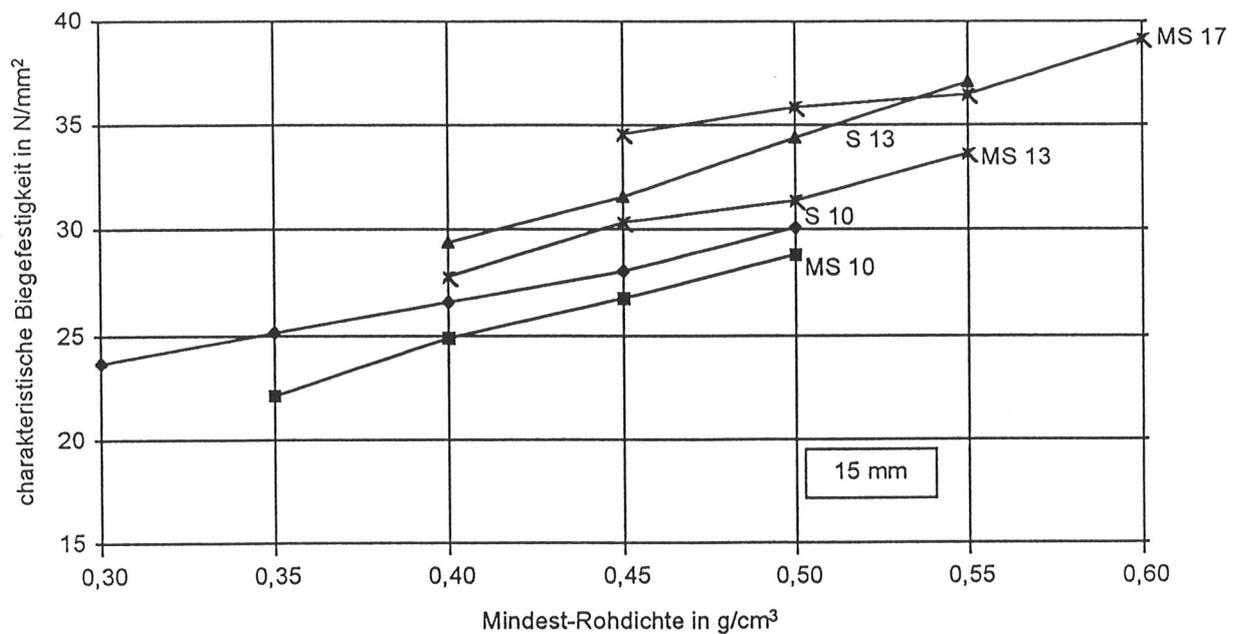


Bild 4.4: Einfluß der Mindest-Rohdichte der Brettlagen

Aus diesem Bild ist zu erkennen, daß durch eine Forderung einer Mindest-Rohdichte eine Tragfähigkeitserhöhung erzielt werden kann. Die auftretenden Versagensarten zeigen, daß dann die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern nahezu ausschließlich von der Brettqualität, und kaum noch von der Keilzinkenfestigkeit bestimmt wird.

5 Zusammenfassung

Mit Hilfe eines Simulationsprogramms (Karlsruher Rechenmodell) wurde das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit vom Trägeraufbau, der Keilzinkenfestigkeit und der Mindest-Rohdichte der Bretter untersucht.

In den Simulationsrechnungen wurden Bretter der Sortierklassen S10, S13, MS10, MS13 und MS17 einbezogen. Die Eingangsdaten für die angegebenen Sortierklassen wurden vom Institut für Holzforschung der Universität München zur Verfügung gestellt.

Variationen des Aufbaus der BSH-Träger ergaben, daß eine Abstufung mit schlechter werdenden Sortierklassen zum Trägerkern hin nur eine geringfügige Verringerung der Tragfähigkeit gegenüber homogen aufgebauten Trägern zur Folge hat. Dies gilt sowohl für symmetrisch als auch für asymmetrisch aufgebaute Trägertypen.

Die Simulationsrechnungen mit variierender Keilzinkenfestigkeit zeigten, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern bis zu einer charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit von etwa 35 N/mm² sehr stark von der Keilzinkenqualität bestimmt wird. Über diesen Wert hinaus wird die Brettschichtholzfestigkeit nahezu ausschließlich von der Brettfestigkeit beeinflusst.

Bei den Simulationsrechnungen wurde deutlich, daß die den Berechnungen zugrundegelegten Ästigkeitsverteilungen die Rechenergebnisse beeinflussen. Da bei maschinell sortierten Brettern eine große Ästigkeit durch eine hohe Rohdichte ausgeglichen werden kann, konnte bei diesen Brettern eine größere maximale Astgröße zugelassen werden, als bei visuell sortierten Brettern. Die damit zwischen der Rohdichte und der Ästigkeit bestehende Abhängigkeit wurde augenscheinlich durch die zugrundegelegten Hüllkurven nur unzureichend berücksichtigt.

6 Literatur

- [1] Colling, F. 1990: Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Dissertation der Universität Karlsruhe
- [2] Aasheim, E.; Colling, F.; Ehlbeck, J.; Falk, R.; Görlacher, R.; Solli, K. 1993: Norwegian bending tests with glued laminated beams - comparative calculations with the 'Karlsruhe calculation model'. CIB-W18, Georgia, USA
- [3] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1992: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brett lamellen im Hinblick auf Normungsvorschläge. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe
- [4] Falk, R.; Solli, K.; Aasheim, E. 1992: The performance of glued laminated beams manufactured from machine stress graded norwegian spruce. Norsk Treteknisk Institutt, meddelelse 77
- [5] Colling, F.; Görlacher, R. 1989: Eigenschaften des in Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes. Bauen mit Holz 91: 327 - 331