

**Biegefestigkeit von Brettschichtholz in
Abhängigkeit von den Eigenschaften
der Brettlamellen im Hinblick auf
Normungsvorschläge**

T 2398

T 2398

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

**Biegefestigkeit von Brettschichtholz
in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen
im Hinblick auf Normungsvorschläge**

von

Jürgen Ehlbeck und François Colling

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abteilung Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ.-Professor Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck

1992

Vorwort

Im ersten und zweiten Teil dieser Forschungsreihe wurde ein Rechenmodell auf der Basis der Finiten Elemente entwickelt, mit dem es möglich ist, die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern auf rechnerischem Wege zu bestimmen. Ziel dieser Forschungsreihe war es, das komplexe Tragverhalten von Brettschichtholzträgern mit Hilfe von Simulationsrechnungen zu untersuchen, um so den versuchstechnischen Aufwand auf die Überprüfung einzelner Rechenergebnisse reduzieren zu können. Mit dem entwickelten "Karlsruher Rechenmodell" war es möglich, die festigkeitsbestimmenden Einflußparameter zu erkennen und deren Einfluß rechnerisch abzuschätzen.

Im Rahmen dieses dritten und abschließenden Teiles konnten die bisher gewonnenen Erkenntnisse durch gezielte Untersuchungen weiter ergänzt und im Hinblick auf die Erarbeitung von Normungsvorschlägen verwertet werden. Die Ergebnisse dieser Forschungsreihe bildeten in den letzten Jahren die Grundlage zur Erarbeitung von Festlegungen und Regelungen im Rahmen der europäischen Harmonisierung der Normenwerke (Eurocode 5, CEN), so daß diese Untersuchungen ein Musterbeispiel für den direkten Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis (Normung) darstellen.

Ein besonderer Dank gilt hierbei der Holzindustrie für deren Unterstützung bei den Untersuchungen über die Holzeigenschaften des in deutschen Leimbaubetrieben verwendeten Schnittholzes sowie bei der Herstellung von keilgezinkten Proben und Brettschichtholzträgern nach genau festgelegten Vorgaben.

Die vorliegende Arbeit entstand im Auftrag der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. mit finanzieller Unterstützung durch das Institut für Bautechnik, Berlin.

Mit der Bearbeitung dieses Vorhabens war Herr Dr.-Ing. F. Colling hauptverantwortlich betraut. Für den reibungslosen Ablauf und die zuverlässige Durchführung der Versuche sorgten die Herren H. Heck, J. Lafferthorn und G. Rüd. Die studentischen Hilfskräfte cand.-ing. B. Hauswirth, P. Metzger und R. Schober zeichneten sich durch ihre Zuverlässigkeit bei der Auswertung und Darstellung der Ergebnisse sowie durch ihr Engagement bei den Untersuchungen in den Leimbaubetrieben aus. Bei diesen Untersuchungen waren zeitweise auch die Herren Dipl.-Ing. M. Kromer und cand.-ing. T. Baur behilflich.

Allen Beteiligten sei für die Mitarbeit gedankt.

Jürgen Ehlbeck

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Derzeitiger Kenntnisstand	3
2.1	Einfluß der Ästigkeit des Gesamtträgers	3
2.2	Einfluß der Versagensart	6
2.3	Holzeigenschaften	8
2.4	Trägergröße	10
3	Streuung der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes	18
3.1	Grundlegende Überlegungen	18
3.2	Versuche, Diskussion der Ergebnisse	20
4	Eigenschaften des in deutschen Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes	35
4.1	Allgemeines	35
4.2	Versuchsmaterial	35
4.3	Darstellung der Ergebnisse	37
4.3.1	Alle Werte	37
4.3.2	Unterscheidung nach Herkunftsgebiet	37
4.4	Diskussion der Ergebnisse	41
4.5	Schlußfolgerungen	45
5	Theoretisches Modell	46
5.1	Aufteilung des Endproduktes Brettschichtholz in die beiden "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz	46
5.2	Bestimmung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz	49
5.3	Bestimmung der Auftretenshäufigkeit einer bestimmten Versagensart	54
5.4	Zahlenbeispiel	54

	Seite	
6	Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der "Materialien"	
	Keilzinkenverbindung und Holz	56
6.1	Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen	59
6.1.1	Allgemeines	59
6.1.2	Einfluß der Keilzinkenzugfestigkeit	62
6.1.3	Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart	63
6.1.3.1	Einfluß der Trägerlänge	64
6.1.3.2	Einfluß der Trägerhöhe	68
6.1.3.3	Einfluß der Belastungsart	70
6.1.4	Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften	72
6.2	Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen	74
6.2.1	Allgemeines	74
6.2.2	Einfluß der Holzeigenschaften	77
6.2.3	Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart	83
6.2.3.1	Einfluß der Trägerlänge	84
6.2.3.2	Einfluß der Trägerhöhe	85
6.2.3.3	Einfluß der Belastungsart	87
6.3	Zusammenstellung der Simulationsergebnisse	89
6.3.1	Träger mit Keilzinkenversagen	89
6.3.2	Träger mit Holzversagen	93
7	Überprüfung des theoretischen Modells mit Hilfe von Trägerversuchen	95
7.1	Darstellung der Versuche	95
7.2	Prognosen des theoretischen Modells	101
7.3	Vergleich zwischen Versuch und Rechnung	106

	Seite	
8	Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinken- verbindungen	110
8.1	Allgemeines	110
8.2	Bisherige Untersuchungen	112
8.3	Eigene Versuche	113
8.3.1	Probenentnahme	113
8.3.2	Biegeversuche	115
8.3.3	Zugversuche	116
8.4	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	117
8.4.1	Allgemeines	117
8.4.2	Alle Proben	118
8.4.2.1	Holzeigenschaften	118
8.4.2.2	Festigkeiten	120
8.4.2.3	Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit	122
8.4.3	Proben mit überwiegendem Versagen im Keilzinkenbereich	128
8.4.3.1	Allgemeines	128
8.4.3.2	Festigkeiten	128
8.4.3.3	Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit	131
8.4.4	Einfluß der Versagensart	131
8.4.5	Einfluß der Markröhre	136
8.5	Zusammenfassung	139
9	Bemessung	141
9.1	Grundlagen	141
9.2	Bemessungsvorschlag	148
9.3	Alternativvorschläge	149
9.3.1	Bemessung ohne Verbundtheorie aber mit Volumeneffekt	149
9.3.2	Bemessung ohne Verbundtheorie und ohne Volumeneffekt	152
10	Zusammenfassung	156
11	Literatur	161

1 Ziel des Forschungsvorhabens

Im Rahmen des 1984 abgeschlossenen Forschungsvorhabens "Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern" [16] wurde ein Rechenmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern entwickelt. Dieses Rechenmodell, das auf der Methode der Finiten Elemente basiert, wurde mit Hilfe von 24 Biegeversuchen mit 300 mm hohen Brettschichtholzträgern, die nach genau vorgegebenen Kriterien hergestellt wurden, überprüft. Hierbei konnte eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden.

Im Rahmen des weiterführenden Forschungsvorhabens "Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elastizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkungen im Träger sowie von der Trägerhöhe, Teil A: Karlsruher Untersuchungen" [20], konnte dieses Rechenmodell durch gezielte Untersuchungen über die Verteilung der Ästigkeit und des Elastizitätsmoduls entlang eines Brettes weiter verbessert werden. Vergleichsrechnungen zu insgesamt 9 Trägerversuchen mit Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Höhe ergaben Abweichungen von maximal 10% zwischen berechneter und tatsächlich ermittelter Bruchlast.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde auch der Einfluß der Trägergröße ("Volumeneffekt") auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern untersucht. Das Vorhandensein eines solchen Einflusses wurde mit Hilfe von insgesamt 42 Versuchen mit Trägerhöhen von 167 - 1250 mm zweifelsfrei nachgewiesen. Bei diesen Versuchen zeigte sich aber erneut der Einfluß der "Fehlstelle" Keilzinkenverbindung: im Gegensatz zu den Trägern mit Holzversagen konnte bei den Trägern mit Keilzinkenversagen kein eindeutiger Volumeneffekt nachgewiesen werden. Der Einfluß der Trägergröße auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern konnte somit nicht eindeutig geklärt werden.

Weiterhin wurde mit Hilfe des Rechenmodells die Auswirkungen von verschiedenen Möglichkeiten einer Holzsortierung - visuell, maschinell und kombiniert visuell/maschinell - auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern untersucht. Hierbei bestätigte sich, daß die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern sowohl von der Holzqualität, sprich den Holzeigenschaften der Bretter, als auch von der Keilzinkenqualität abhängig ist. Obwohl die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung ebenfalls von den Holzeigenschaften der zu verbindenden Bretter

abhängig ist, wird sie aber auch maßgeblich von herstellungsbedingten Faktoren bestimmt, so daß die Keilzinkenverbindung als eigenständiger und z.T. unabhängiger Einflußparameter angesehen werden muß.

Weiterhin zeigten die Simulationsrechnungen, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern nicht nur von der absoluten Festigkeit der Bretter und der Keilzinkenverbindungen abhängig ist, sondern auch vom gegenseitigen Verhältnis dieser beiden beeinflussenden Faktoren. So kann bei schlechter Keilzinkenqualität eine hohe Brettqualität nicht ausgenutzt werden, weil die Brettschichtholzträger vermehrt unter geringen Lasten im Bereich von Keilzinkenverbindungen zu Bruch gehen.

Ziel des dritten und letzten Teiles dieser Forschungsreihe war es, das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern weiterführend zu untersuchen, wobei das Hauptaugenmerk auf die Erarbeitung von Bemessungsvorschlägen auszurichten war. Hierbei waren sowohl die Holzeigenschaften der Brettlamellen als auch die Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen zu berücksichtigen. Weiterhin sollte der Volumeneffekt mit Hilfe von Simulationsrechnungen weiter geklärt werden.

2 Derzeitiger Kenntnisstand

COLLING [13] gibt einen Überblick über die Entwicklung der Brettschichtholzbauweise in Nordamerika und im europäischen Raum. Zur Erfassung der Einflußfaktoren auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern wurden bei der Durchsicht der Literatur alle verfügbaren Biegeversuche mit Brettschichtholzträgern gesammelt und in einer Datenbank zusammengefaßt, die insgesamt 1767 Versuche (Einzelwerte) erfaßte. In diese Datenbank wurden, falls vorhanden, Angaben über die Holzart, Trägerabmessungen, Versagensart usw. aufgenommen.

Im folgenden werden die bisher durchgeführten Untersuchungen und deren wichtigste Ergebnisse in verkürzter Form beschrieben.

2.1 Einfluß der Ästigkeit des Gesamtträgers

In einem auf Biegung beanspruchten Träger stellt sich unter der Annahme eines homogenen Materials eine dreieckförmige Spannungsverteilung über die Trägerhöhe ein, so daß die äußeren Trägerbereiche am stärksten beansprucht werden. Die Brettschichtholzbauweise ermöglicht es jetzt, die Anordnung der Lamellen dieser Spannungsverteilung anzupassen, indem man die "guten" Lamellen nach außen und die "schlechten" Lamellen nach innen verlegt. Die Lamellen, die im Trägerinnern angeordnet sind, dürfen hierbei eine geringere Festigkeit (Qualität) besitzen als die hochbeanspruchten Lamellen im äußeren Bereich, ohne daß die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger dadurch beeinträchtigt wird.

Diese Überlegungen führten zu dem in den USA und Kanada noch heute benutzten I_K/I_G -Konzept, wobei der I_K/I_G -Wert dem Verhältnis des Flächenmoment 2. Grades aller in einem Querschnitt auftretenden Äste ($I_K = I_{Knot}$) zum Brutto-Flächenmoment 2. Grades des Brettschichtholzträgers ($I_G = I_{Gross}$) entspricht. Der I_K/I_G -Wert beschreibt also die Schwächung des Trägheitsmomentes des Brettschichtholzträgers infolge der auftretenden Äste.

Dieses aus den Grundlagen der Technischen Mechanik abgeleitete Konzept berücksichtigt sowohl die Anzahl der auftretenden Äste, als

auch deren Lage im Brettschichtholzträger, so daß es geeignet schien, den Einfluß von Ästen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern zu erfassen.

Gegen Ende der 40er Jahre untersuchten WILSON/COTTINGHAM [50] die Tragfähigkeit von 305 mm hohen Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von dem an der Bruchstelle vorhandenen I_K/I_G -Wert und ermöglichten so eine zahlenmäßige Abschätzung des Einflusses der Äste auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern.

FREA/SELBO [26] stellten ein statistisches Rechenverfahren vor, mit dem es möglich ist, die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern abzuschätzen, die aus beliebigen Lamellen mit bekannter Güte aufgebaut sind.

Die Übertragbarkeit des an 300 mm hohen Brettschichtholzträgern abgeleiteten I_K/I_G -Konzeptes auf größere Träger wurde jedoch in der Folgezeit angezweifelt. Grund hierfür waren Untersuchungen mit großen Brettschichtholzträgern, deren Ergebnisse nicht mit den Vorhersagen dieses Konzeptes übereinstimmten.

So stellte z.B. BOHANNAN [8] beim Vergleich von drei fehlerfreien Brettschichtholzträgern mit drei "normalen" Brettschichtholzträgern fest, daß die Abnahme der Biegefestigkeit aufgrund der vorhandenen Äste weitaus stärker war, als dies vom I_K/I_G -Konzept erwartet wurde, während die Tragfähigkeiten der von SHULER et al. [47] untersuchten Träger durchweg über den vorhergesagten Werten lagen. Versuche von MADSEN/LITTLEFORD [36] zeigten außerdem, daß das Versagen nur in einigen wenigen Fällen an der Stelle mit dem größten I_K/I_G -Wert eintrat.

Daraufhin führten BOHANNAN/MOODY [9] Versuche mit 600-800 mm hohen Brettschichtholzträgern durch, bei denen die Güte der Decklamelle, d.h. der äußeren Zuglamelle, variiert wurde. Diese Untersuchungen bestätigten die bereits von BOHANNAN [6] festgestellte Tendenz, daß der Einfluß der Decklamelle vom I_K/I_G -Konzept unterschätzt wird, d.h. daß geringe Änderungen der Astigkeit der Decklamelle, die sich auf den I_K/I_G -Wert des Trägers kaum auswirken, größere Änderungen in der Tragfähigkeit zur Folge haben.

Andere Untersuchungen zeigten, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern deutlich gesteigert werden kann, ohne dabei den

I_K/I_G -Wert der Träger zu verändern, und zwar indem man im äußeren Zugbereich Lamellen mit hohem Elastizitätsmodul anordnet (siehe hierzu auch *Abschnitt 2.3*).

MOODY [43] schlug daraufhin ein abgewandeltes Verfahren vor, das bei der Berechnung der charakteristischen I_K/I_G -Werte den Elastizitätsmodul der einzelnen Lamellen berücksichtigt. Die durchgeführten Versuche, u.a. mit Verbundquerschnitten aus unterschiedlichen Holzarten, konnten dieses modifizierte I_K/I_G -Konzept jedoch nur teilweise bestätigen.

Weiterhin zeigten Versuche, daß die Lamellen in der Druckzone von geringerer Qualität sein dürfen, ohne hierbei Einbußen in der Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger in Kauf nehmen zu müssen (siehe hierzu auch *Abschnitt 2.3*). Nach dem I_K/I_G -Konzept jedoch geht die Güte der Drucklamellen genauso stark ein wie die der Zuglamellen.

In der Folgezeit bestätigten auch Versuche mit kleinen Brettschichtholzträgern mit Trägerhöhen unter 230 mm die Unstimmigkeiten zwischen Theorie und Praxis, obwohl bei diesen Trägern der I_K/I_G -Wert noch eher von der Güte der Decklamelle abhängig ist als bei vielschichtigen großen Trägern. Daraufhin schlugen MARX/MOODY [38] für kleine Brettschichtholzträger ein neues Bemessungskonzept vor, das ausschließlich auf der Ästigkeit der äußeren Zuglamelle basiert.

Ein solches Bemessungskonzept, das sich eigentlich zwangsläufig aufgrund der Versuche aufdrängt, konnte sich bis jetzt allerdings noch nicht durchsetzen, obwohl die durchgeführten Versuche übereinstimmend zeigten, daß die äußere(n) Zuglamelle(n) von ausschlaggebender Bedeutung sind, während die Güte der inneren Lamellen nur eine untergeordnete Rolle spielt: Träger mit hochwertigen Decklamellen zeigten hohe Tragfähigkeiten, unabhängig davon, welcher Holzart oder welcher Güte die restlichen Lamellen angehörten.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen deuten somit darauf hin, daß das I_K/I_G -Konzept nicht dazu in der Lage ist, das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Holzigenschaften der Brettlamellen treffend zu beschreiben. Auch ist es mit diesem Konzept nicht möglich, den dominanten Einfluß der auftretenden Keilzinkenverbindungen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern zu erfassen.

2.2 Einfluß der Versagensart

Wie im vorigen Abschnitt bereits angedeutet, wurden viele Untersuchungen mit Hilfe von kleinen Brettschichtholzträgern mit Trägerhöhen bis zu 300 mm durchgeführt. Dies führte aber dazu, daß bei den geprüften Trägern oft überhaupt keine Keilzinkenverbindungen vorhanden waren. Bei diesen Versuchen wurde somit nur der Einfluß des "Materiales" Holz (Brettabschnitte mit Ästen) untersucht. Die Bedeutung der Keilzinkenverbindungen auf das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern wurde entweder nicht erkannt oder unterschätzt.

Erst als man dazu überging, Brettschichtholzträger in Bauteilgröße zu prüfen, traten zwangsläufig Keilzinkenverbindungen auf, die dann auch des öfteren für das Versagen der Träger verantwortlich waren. Diese Versuche zeigten, daß Träger mit Keilzinkenversagen häufig eine geringere Tragfähigkeit besaßen als Brettschichtholzträger mit "normalem" Holzversagen. Diese Beobachtungen veranlaßten u.a. APLIN [5], BOHANNAN/MOODY [9], FOX [25] und LITTLEFORD [35] zu der übereinstimmenden Feststellung, daß höhere Tragfähigkeiten möglich sind, wenn in den hochbeanspruchten Bereichen keine Keilzinkenverbindungen vorhanden sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die in der Datenbank aufgenommenen Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung der Versagensart (Holzversagen im Astbereich bzw. Keilzinkenversagen) ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind getrennt für jede Holzart in *Bild 2.1* dargestellt.

Die Unterscheidung nach der Versagensart erweist sich als sehr effektiv: mit Ausnahme der Holzarten eastern hemlock, hem fir und larch (mit jeweils nur wenigen Versuchswerten) liegt die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen z.T. erheblich unter dem entsprechenden Wert der Träger mit Holzversagen (im Mittel etwa 20% geringere Festigkeit).

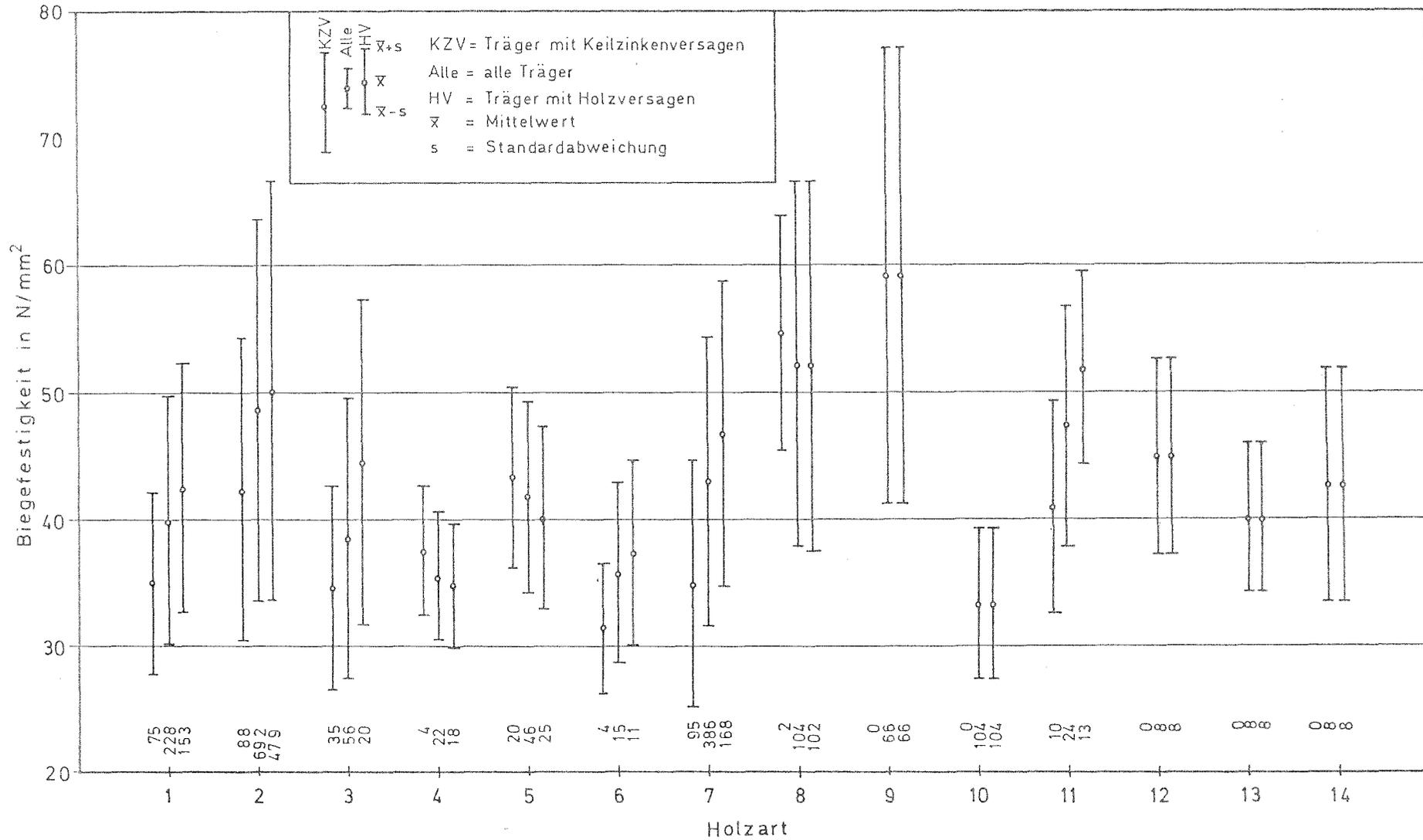


Bild 2.1: Biegefestigkeit von Brett-schichtholzträgern; Unterscheidung nach Holzart und Versagensart

Wie aus *Bild 2.1* ersichtlich ist, gingen von den 1767 Versuchsträgern insgesamt 1183 infolge eines Holzversagens zu Bruch, während die Zahl der Träger mit Keilzinkenversagen vergleichsweise niedrig erscheint: 333. Diese Zahlen täuschen jedoch, denn bei insgesamt 878 der 1183 Träger mit Holzversagen waren in der Decklamelle überhaupt keine Keilzinkenverbindungen vorhanden, so daß diese auch nicht als Bruchursache in Frage kamen.

Eine genauere Auswertung der Versuchsergebnisse ergab, daß bei insgesamt 482 Trägern Keilzinkenverbindungen in der äußeren Zuglamelle vorhanden waren. Bei insgesamt 277 Versuchsträgern traten diese Keilzinkenverbindungen im hochbeanspruchten Bereich des Trägers auf, d.h. im Bereich der größten Momentenbeanspruchung. Von diesen 277 Trägern gingen 220 infolge eines Keilzinkenversagens zu Bruch: dies entspricht etwa 79%! Bei den restlichen 205 der 482 Versuchsträger lagen die Keilzinkenverbindungen außerhalb des hochbeanspruchten Bereiches, d.h. in Bereichen mit bereits abnehmender Momentenbeanspruchung, und trotzdem gingen immerhin 75 Träger infolge eines Keilzinkenversagens zu Bruch: dies entspricht etwa 37%. Dies zeigt deutlich das hohe Bruchrisiko einer Keilzinkenverbindung, bzw. die hohe Wahrscheinlichkeit, daß ein Brettschichtholzträger infolge eines Keilzinkenversagens zu Bruch geht.

Trotz dieser Beobachtungen setzte sich nur zögernd die Erkenntnis durch, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern nicht nur von der Güte des verwendeten Brettmaterials, sondern auch von der Qualität der Keilzinkenverbindungen abhängig ist. Eingang in ein Bemessungskonzept hat die Qualität der Keilzinkenverbindungen jedoch noch nicht gefunden.

Die o.g. Ausführungen zeigen aber deutlich, daß in einem genaueren Bemessungsverfahren für Brettschichtholzträger die Eigenschaften der Keilzinkenverbindungen nicht vernachlässigt werden dürfen.

2.3 Holzeigenschaften

Bereits 1941 schrieb EGNER [15], daß der innere Bereich eines Brettschichtholzträgers für die Tragfähigkeit dieses Trägers ohne große Bedeutung sei. Diese Aussage wurde in der Zwischenzeit von zahlreichen Untersuchungen wiederholt bestätigt (siehe hierzu auch *Abschnitt 2.1*). So zeigten z.B. Brettschichtholzträger, die im Innen-

bereich Lamellen einer Holzart mit geringerer Tragfähigkeit aufwiesen als im Außenbereich, kaum geringere Tragfähigkeiten als Träger, die aus lauter Lamellen der "besseren" Holzart aufgebaut waren (vgl. MOODY [43]).

Weiterhin zeigten Versuche von BOHANNAN/MOODY [9] und MOODY [44], daß der Druckzone eines Brettschichtholzträgers eine geringere Bedeutung zukommt als der Zugzone: die Lamellen in der Druckzone dürfen eine geringere Festigkeit besitzen als die Lamellen in der Zugzone, ohne dabei die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger zu beeinträchtigen.

Das Hauptaugenmerk richtete sich somit auf die Zuglamellen, wobei u.a. BOHANNAN [6], FILLER et al. [24] und MARX/MOODY [39], [40] besonders auf die Bedeutung der äußersten Zuglamelle, der sogenannten Decklamelle hinwiesen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten nämlich übereinstimmend, daß mit steigender Qualität der Decklamelle auch die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger zunimmt.

Hierbei beschränkt sich der Begriff der Qualität nicht nur auf das optische Aussehen der Bretter, wie dies lange Zeit der Fall war, sondern auch die Rohdichte und der Elastizitätsmodul der Bretter gewannen zunehmend an Bedeutung. Zahlreiche Versuche zeigten nämlich, daß die Anordnung von Lamellen mit hohem Elastizitätsmodul im Zugbereich sehr effektiv ist, und daß hierdurch hohe Tragfähigkeitssteigerungen erzielt werden können (siehe z.B. APLIN [5], FOX [25], LITTLEFORD [35] und MOODY/BOHANNAN [42]).

Die Auswahl der Bretter anhand ihrer Rohdichte oder ihres Elastizitätsmoduls macht jedoch eine maschinelle Holzsortierung erforderlich, da diese Holzeigenschaften nicht auf visuellem Wege ermittelt werden können. Dies bedeutet aber keinen Nachteil, denn im Gegensatz zur visuellen Holzsortierung - die auf der persönlichen und somit subjektiven Einschätzung des Sortierenden basiert - stellt die maschinelle Holzsortierung eine "unbestechliche" Sortiermethode dar. Dies bedeutet eine, im Vergleich zur visuellen Holzsortierung, höhere Zuverlässigkeit des Sortierergebnisses. Nicht zuletzt deshalb hat sich die maschinelle Holzsortierung in Nordamerika und auch bereits in einigen europäischen Ländern durchgesetzt.

Eine hochwertige Decklamelle allein reicht jedoch noch nicht aus, um hohe Tragfähigkeiten von Brettschichtholzträgern zu gewährleisten,

denn bei den o.a. Versuchen zeigte sich die Tendenz, daß mit steigender Qualität der Bretter die Wahrscheinlichkeit zunimmt, daß der Bruch des Trägers durch das Versagen einer Keilzinkenverbindung ausgelöst wird.

So stellten MADSEN/LITTLEFORD [36] bei ihren Untersuchungen fest, daß die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen mit besser werdenden Holzeigenschaften nicht in gleichem Maße ansteigt wie die Festigkeit der Lamellen selbst, so daß die Gefahr eines Keilzinkenversagens bei guten Trägern größer ist als bei durchschnittlichen Trägern.

Auch KOLB [32], der für Brettschichtholzträger der Güteklasse I deutlich höhere Tragfähigkeiten als für Träger der Güteklasse II ermittelte, wies darauf hin, daß diese Ergebnisse *"im Hinblick auf die Praxis vermutlich ein zu günstiges Bild geben, da die Bauteile zumindest in den hochbeanspruchten Zonen weitgehend astfrei und nicht durch Keilzinkenverbindungen gestoßen waren. Es ist zu erwarten, daß sich bei Bauteilen üblicher Längen (bis etwa 30 m) der Einfluß der Keilzinkenverbindungen, deren Lage im Bauteil ja beliebig sein darf, insbesondere bei Bauteilen der Güteklasse I, abmindernd auf die Biegebruchspannung auswirkt"*.

Somit hängt auch der Erfolg einer Holzsortierung von der Qualität der Keilzinkenverbindungen ab, denn selbst die zuverlässigste Auswahl von hochwertigen Brettern ist wirkungslos, wenn die Träger infolge von zu geringen Keilzinkenfestigkeiten frühzeitig zu Bruch gehen und die hohe Festigkeit des Holzes nicht ausgenutzt werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Verfahren zu entwickeln, das die Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften der Lamellen und der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen ermöglicht.

2.4 Trägergröße

Schon seit langer Zeit ist bekannt, daß die Tragfähigkeit von Biegeträgern mit zunehmenden Trägerabmessungen abnimmt. Dieses Tragverhalten kann ganz allgemein durch eine Beziehung der Form

$$\sigma_B = \sigma_B^0 \cdot K \quad (2.1)$$

beschrieben werden.

Hierbei sind

$$\begin{aligned}\sigma_B &= \text{Biegefestigkeit eines beliebigen Trägers,} \\ \sigma_B^0 &= \text{Biegefestigkeit eines Bezugsträgers,} \\ K &= \text{Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses} \\ &\quad \text{der Trägergröße.}\end{aligned}$$

Diese Gleichung bezieht die Biegefestigkeit eines beliebigen Trägers auf einen Vergleichsträger, dessen Biegefestigkeit bekannt ist.

Im Jahre 1924 untersuchten NEWLIN/TRAYER [45] das Tragverhalten von fehlerfreien Vollholzbalken mit bis zu 300 mm Höhe. Anhand dieser Versuche ermittelten sie folgende Gleichung für den o.a. Korrekturfaktor K:

$$K = 1,07 - 0,7 \cdot \sqrt{H/50} \quad (2.2)$$

Als Bezugsträger diente der zum damaligen Zeitpunkt in der Bemessung vorgesehene Standardträger mit einer Höhe $H_0 = 50$ mm (≈ 2 inch).

Mit Hilfe dieser Gleichung wurde die Biegefestigkeit als Funktion der Trägerhöhe ausgedrückt, was zur Folge hatte, daß der Einfluß der Trägergröße oft als Höheneffekt bezeichnet wurde.

1942 untersuchte YLINEN [51] diesen Höheneffekt an Vollholzträgern mit Trägerhöhen bis zu 160 mm. Für fehlerfreie Proben ermittelte er folgende Beziehung

$$K = 1,111 \cdot \frac{1 + 0,016 \cdot H}{1 + 0,020 \cdot H} \quad (2.3)$$

Das Tragverhalten von ästigen und rissigen Proben konnte am besten mit folgender Gleichung beschrieben werden :

$$K = 1,217 \cdot \frac{1 + 0,003 \cdot H}{1 + 0,008 \cdot H} \quad (2.4)$$

Diese beiden Gleichungen wurde zum besseren Vergleich auf eine Trägerhöhe von 50 mm bezogen.

1947 führten DAWLEY/YOUNGQUIST weitere Untersuchungen über die Abhängigkeit zwischen der Biegefestigkeit und der Trägerhöhe durch. Die Versuche erfolgten hierbei an bis zu 410 mm hohen Trägern.

Anhand dieser Versuche wurde folgende Beziehung ermittelt, die 1954 von FREAS/SELBO [26] veröffentlicht wurde:

$$K = 0,625 \cdot \frac{H^2 + 92300}{H^2 + 56800} \quad (2.5)$$

Die Gleichung bezieht sich wiederum auf den Standardträger der Höhe $H_0=50$ mm und wurde in die nordamerikanische Norm aufgenommen. 1967 wurde diese Beziehung von der englischen Bemessungsnorm CP 112-67 [2] übernommen.

Die bisher aufgeführten Gleichungen zur Beschreibung des Tragverhaltens von Vollholzträgern in Abhängigkeit von der Trägergröße stellen nur empirische Anpassungen an Versuchsdaten dar. Der Gültigkeitsbereich dieser Beziehungen ist somit auf die bei den Versuchsträgern vorhandenen Trägerhöhen beschränkt. Die Brettschichtholzbauweise ermöglichte aber schon bald die Herstellung von Brettschichtholzträgern, deren Höhen die bisher untersuchten Trägerhöhen deutlich überschritten. Es bestand also Bedarf an einer Beziehung, die auf einer theoretischen Grundlage basiert und deren Parameter anhand von Versuchen ermittelt werden können. Eine solche Beziehung hätte dann auch Gültigkeit über den untersuchten Bereich hinaus.

1966 stellte BOHANNAN [7] eine solche Theorie vor. Auf der Grundlage einer statistischen Spröbruchtheorie von WEIBULL [49] entwickelte *Bohannan* ein Konzept, das die Beschreibung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Trägergröße ermöglicht. Diese Spröbruchtheorie geht davon aus, daß das Versagen des Gesamtträgers durch das Versagen des schwächsten Gliedes ausgelöst wird (weakest link failure). Versuche mit einem spröden Material ergeben eine Häufigkeitsverteilung, die am besten mit der sogenannten "Weibull-Verteilung" beschrieben werden kann.

Weibulls Theorie geht davon aus, daß die Wahrscheinlichkeit, daß ein schwaches Glied auftritt, bei einem großen Träger höher ist als bei einem kleinen Träger, so daß der Einfluß der Trägergröße auf statistischem Wege erklärt und beschrieben werden kann.

Anhand von einer Vielzahl von Versuchen mit bis zu 300 mm hohen fehlerfreien Vollholzproben ermittelte *Bohannan* folgende Beziehung:

$$K = \left(\frac{H}{50}\right)^{-1/9} \quad (2.6)$$

Als Bezugsträger diente wiederum ein Träger der Höhe $H_0 = 50$ mm. Diese Gleichung löste die Beziehung von *Freas/Selbo* (Gl.(2.5)) in der amerikanischen Norm ab und darf auch bei Brettschichtholzträgern angewandt werden.

Mit Ausnahme von *Gl(2.4)* wurden alle Beziehungen anhand von Versuchen mit fehlerfreien Proben ermittelt. Im Laufe der Zeit setzte sich aber immer mehr das sogenannte "in-grade testing" durch, d.h. die Untersuchung eines Tragverhaltens mit Hilfe von fehlerbehafteten Proben in Bauteilgröße (structural sizes). Die untersuchten Proben stellen jeweils eine repräsentative Stichprobe der zugehörigen Güteklasse (grade) dar, so daß ein mit der Güteklasse veränderliches Tragverhalten erfaßt werden kann.

Mit der Größe der Prüfkörper änderte sich auch die Größe bzw. Höhe des Bezugsträgers der in der Bemessung zugrunde gelegt wird. Die Bezugshöhe H_0 ist von Land zu Land unterschiedlich und liegt zwischen 200 mm und 300 mm (vgl. ASTM D-3737 [1] und EUROCODE 5 [3]).

1983 veröffentlichten FEWELL/CURRY [23] die Ergebnisse von umfangreichen Untersuchungen über den Höheneffekt bei Vollholzbiegeträgern. Als Versuchsmaterial standen bis zu 300 mm hohe Träger aus unterschiedlichen Holzarten und Güteklassen zur Verfügung. Diese Versuche ergaben, daß die Abnahme der Biegefestigkeit mit steigender Höhe von Probenserie zu Probenserie unterschiedlich groß war.

Für die Beziehung, die das Tragverhalten aller Proben, unabhängig von der Holzart und der Güteklasse, am besten beschreibt, gaben sie folgende Gleichung an:

$$K = \left(\frac{H}{200}\right)^{-0,4} \quad , \quad (2.7)$$

wobei sie als Bezugsträger einen Träger der Höhe $H_0 = 200$ mm wählten.

Diese Beziehung stimmte gut mit den ebenfalls in [23] angegebenen Ergebnissen von umfangreichen kanadischen Untersuchungen überein.

In *Bild 2.2* ist der Verlauf des Korrekturfaktors K für alle o.a. Gleichungen dargestellt. Hierbei wurde zum besseren Vergleich die von *Fewell/Curry* vorgeschlagene Gleichung auf einen Bezugsträger der Höhe $H_0 = 50$ mm umgerechnet.

Aus *Bild 2.2* ist ersichtlich, daß die einzelnen Gleichungen den Höhen-
effekt z.T. sehr unterschiedlich bewerten, und daß eine Extrapolation
dieser Kurven über den eigentlichen Gültigkeitsbereich hinaus diese
Unterschiede noch verstärkt.

Weiterhin geht aus *Bild 2.2* hervor, daß die an fehlerbehafteten Proben
ermittelten Abhängigkeiten - *Gl(2.4)* und *Gl(2.7)* - eine stärkere Ab-
nahme der Biegefestigkeit mit wachsender Trägerhöhe beschreiben als
die an fehlerfreien Proben ermittelten Beziehungen.

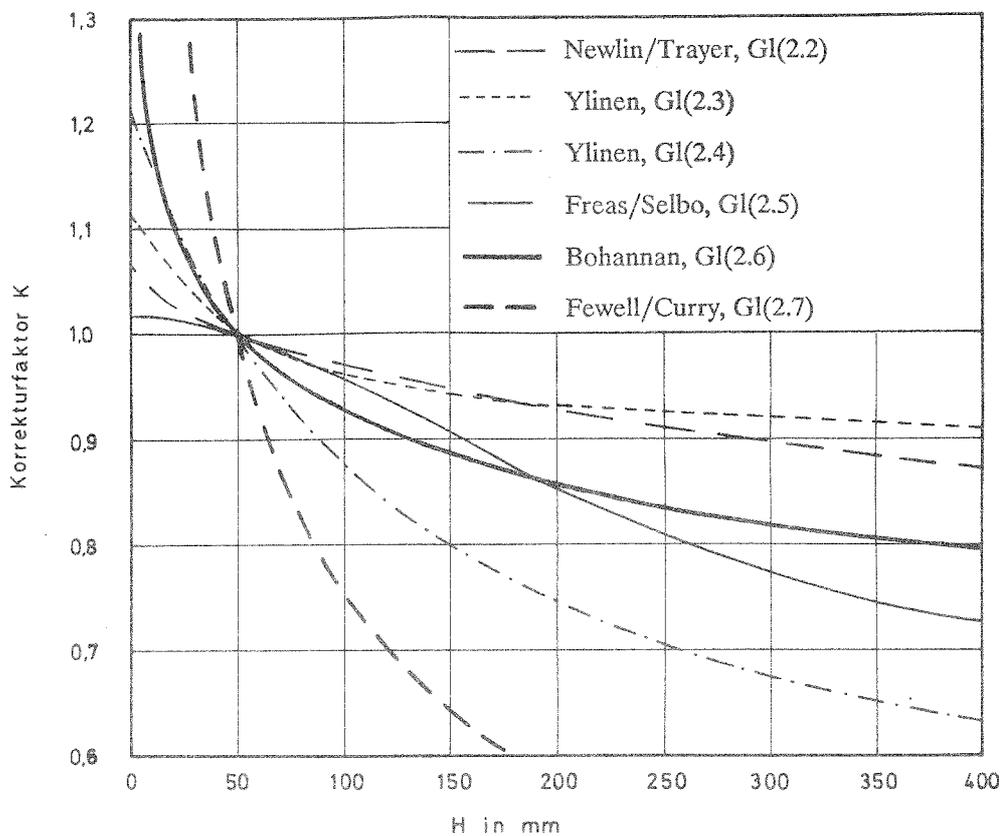


Bild 2.2: Korrekturfaktor K zur Berücksichtigung des Höhen-
effektes

Alle bisher besprochenen Gleichungen für den Korrekturfaktor K stel-
len die Biegefestigkeit allein in Abhängigkeit von der Trägerhöhe dar,
obwohl andere Faktoren wie z.B. die Trägerlänge, die Trägerbreite

oder die Belastungsart (in Form der Momentenverteilung) ebenfalls eine Rolle spielen können.

Während der Einfluß der Trägerbreite noch heute umstritten ist, wurde der Einfluß der Belastungsart schon früh erkannt. So weist z.B. ein Einfeldträger mit zwei Einzellasten in den Drittelpunkten im Mittel eine geringere Festigkeit auf als ein Träger mit einer Einzellast in Feldmitte. Dies ist darauf zurückzuführen, daß beim Träger unter Drittelpunktbelastung - bei gleichen Trägerabmessungen - der hochbeanspruchte Bereich größer ist als beim anderen Träger.

Das Vorhandensein eines Längeneffektes läßt sich aus der Tatsache erklären, daß die in einem Träger auftretenden Äste über die Längsrichtung verteilt sind. Bei größer werdender Trägerlänge erhöht sich somit auch die Wahrscheinlichkeit, daß ein noch größerer Ast auftritt.

Der bisher besprochene Höheneffekt ist somit eigentlich ein Volumeneffekt, wobei unter Volumen nicht nur die Größe des Trägers zu verstehen ist, sondern die Größe des beanspruchten Trägervolumens. Weibulls Sprödbrechtheorie ermöglicht es, diesen Volumeneinfluß rechnerisch zu erfassen. Die Aufteilung des gesamten Volumeneffektes nach Trägergröße, Spannungsverteilung über den Querschnitt und Belastungsart wurde von COLLING [10] in allgemeiner Form dargestellt.

MADSEN/BUCHANNAN [37] wiesen darauf hin, daß sich dieser Volumeneffekt nicht nur aus mehreren Anteilen zusammensetzt, sondern daß diese Anteile auch unterschiedlich stark eingehen. Anhand von umfangreichen Versuchen mit Vollholzträgern zeigten sie z.B., daß der Einfluß der Trägerlänge deutlich größer ist als der der Trägerhöhe.

Ihrer Meinung nach ist der Höheneffekt in Wirklichkeit sogar ein Längeneffekt, der nur deshalb noch nicht als solcher erkannt wurde, weil bei den meisten Versuchen ein annähernd gleiches L/H-Verhältnis und die gleiche Belastungsanordnung vorhanden waren. Da sich unter diesen Umständen die Länge immer proportional zur Trägerhöhe veränderte, blieb der Längeneffekt somit versteckt und war im Höheneffekt enthalten.

Nun stellte sich die Frage, welche der o.a. Gleichungen am ehesten geeignet sei, auch das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern treffend zu beschreiben, denn alle bisher besprochenen Untersuchungen wurden mit Hilfe von Vollholzträgern durchgeführt, deren Abmessungen zwar

den bei Vollholzbalken üblichen Bereich abdeckten, nicht jedoch den bei Brettschichtholzträgern möglichen Bereich.

International durchgesetzt hat sich $Gl(2.6)$ von *Bohannan*, nicht zuletzt deshalb, weil sie - wie oben bereits beschrieben - auf einer theoretischen Grundlage basiert. *Bohannan* selbst überprüfte seine Gleichung mit Hilfe von drei großen, fehlerfreien Brettschichtholzträgern, deren Tragfähigkeit zufriedenstellend vorhergesagt werden konnte (vgl. [8]). Daraufhin wurde *Bohannans* Gleichung auch in die amerikanische Bemessungsnorm für Brettschichtholz aufgenommen.

Im Jahre 1972 führte APLIN [5] Versuche mit Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Größe durch. Wie in *Abschnitt 2.2* bereits beschrieben, gingen einige dieser Träger aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch. Diese Träger wurden bei der Auswertung zunächst nicht berücksichtigt. Der Vergleich des Tragverhaltens der Träger mit Holzversagen mit *Bohannans* Theorie zeigte jedoch keine gute Übereinstimmung. Erst unter Einbeziehung aller Versuchswerte, d.h. auch der Träger mit Keilzinkenversagen mit geringerer Festigkeit, konnte eine bessere Übereinstimmung erzielt werden.

Somit wurde auch hier die Bedeutung der Keilzinkenverbindungen deutlich, deren Einfluß auf den Höheneffekt bisher noch nicht untersucht wurde und auch von keiner Theorie berücksichtigt wird.

Mitte der 70er Jahre führten KOLB/FRECH [33] Versuche mit bis zu 2 m hohen und 30 m langen Brettschichtholzträgern durch. Bei diesen Versuchen konnte ab einer Trägerhöhe von 500 mm keine zusätzliche Festigkeitsabnahme mehr festgestellt werden. Über die Versagensarten der einzelnen Träger wurden leider keine Angaben gemacht, die Forderung nach einwandfreier Ausführung der Keilzinkenverbindungen für alle Trägerbereiche deutet jedoch darauf hin, daß das Problem der Keilzinkenverbindungen erkannt wurde.

Auch die im Rahmen des zweiten Teiles dieser Forschungsreihe ([20]) durchgeführten Versuche bestätigten das hohe Bruchrisiko einer Keilzinkenverbindung, das mit zunehmender Trägergröße zunimmt. Bei großen Brettschichtholzträgern mit mehreren Keilzinkenverbindungen in den hochbeanspruchten Zonen ist die Wahrscheinlichkeit eines Keilzinkenversagens größer als bei kleinen Trägern, so daß das Problem der Trägergröße bei Brettschichtholzträgern auch eine Frage der Auftretenshäufigkeit von Keilzinkenverbindungen ist.

Eine Auswertung der in der Datenbank aufgenommenen Versuchsergebnisse zeigte weiterhin, daß es mit Hilfe der bisherigen Untersuchungen ohnehin nur sehr schwierig ist, einen Volumeneffekt nachzuweisen, weil z.B. die bei diesen Versuchsträgern verwendete Holzgüte z.T. erheblich schwankte. So ist es durchaus möglich, daß kleine Brettschichtholzträger durchschnittlicher Güte eine geringere Tragfähigkeit aufweisen als große Brettschichtholzträger mit hochwertigen Decklamellen.

Zur Untersuchung eines Volumeneffektes ist es daher unbedingt erforderlich, die Randbedingungen - Güte der Lamellen, Trägeraufbau, Auftretenshäufigkeit und Festigkeit der Keilzinkenverbindungen - konstant zu halten und nur die Trägerabmessungen und/oder die Belastungsart zu variieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Hilfe des entwickelten Rechenmodells untersucht, mit dem es möglich ist, die o.a. Forderungen zu erfüllen. Diese Untersuchungen sind in den Abschnitten 6.1.3 und 6.2.3 beschrieben.

3 Streuung der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes

Im zweiten Teil dieser Forschungsreihe ([20]) konnte durch gezielte Untersuchungen über die Verteilung der Ästigkeit und des Elastizitätsmoduls in Brett längsrichtung eine deutliche Verbesserung des sogenannten "Karlsruher Rechenmodells" erzielt werden.

Insbesondere die Berücksichtigung der durch das Wachstum eines Baumes bedingten geringen Schwankung des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes wirkte sich auf die Rechenergebnisse aus.

Im Rahmen dieses Vorhabens sollte nun untersucht werden, ob auch die Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes geringeren Schwankungen unterworfen ist, als dies anhand der für das gesamte Holzangebot gültigen Reststreuung zu erwarten ist.

3.1 Grundlegende Überlegungen

Im Rahmen des "Karlsruher Rechenmodells" wird die Zugfestigkeit eines 15 cm langen Brettabschnittes mit folgender Regressionsgleichung berechnet:

$$\ln(f_Z) = -4,22 + \ln(E_Z) \cdot (0,876 - 0,093 \cdot \text{KAR}) \quad (3.1)$$

mit $R = 0,86$ und $s_R = 0,187$

Hierin bedeuten

- f_Z = Zugfestigkeit in N/mm^2 ,
- E_Z = Zug-Elastizitätsmodul in N/mm^2 ,
- KAR = KAR-Wert (siehe auch *Abschnitt 4.2, Bild 4.1*)
- R = Korrelationskoeffizient,
- s_R = Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung).

Diese Beziehung wurde in München im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 96 anhand von zahlreichen Zug- und Druckversuchen ermittelt (siehe GLOS [27], HEIMESHOF/GLOS [29]) und gilt für eine Holzfeuchte von 12%. Bei diesen Untersuchungen wurde das Tragverhalten von 137,5 mm langen Brettabschnitten untersucht, was in etwa der im Rechenmodell verwendeten Zellenlänge entspricht. Hierbei

wurde den Prüfkörpern ein ebener Verformungszustand aufgeprägt, um die Beanspruchung eines Brettabschnittes im Brettschichtholzträger möglichst wirklichkeitsnah zu erfassen.

Grund für diese Art der Beanspruchung war, daß in einem Zugversuch nach ISO 8375 [4] mit einem Prüfkörper großer Länge infolge der strukturellen Imperfektionen seitliche Verformungen auftreten, die das Tragverhalten und insbesondere die Tragfähigkeit deutlich beeinflussen. Durch das Verleimen der Lamellen werden diese seitlichen Verformungen jedoch behindert, so daß die nach ISO 8375 ermittelten Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse im Brettschichtholzträger übertragbar sind (siehe hierzu auch EHLBECK/COLLING [18] und LARSEN [34]).

Ein nach $GI(3.1)$ berechneter Wert entspricht der mittleren Zugfestigkeit, die unter Vorgabe des Zug-Elastizitätsmoduls und des KAR-Wertes zu erwarten ist. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß zwei Brettabschnitte mit gleichem Elastizitätsmodul und gleicher Ästigkeit unterschiedliche Festigkeiten aufweisen können, muß jeder berechneten Festigkeit noch ein Wert aus der noch verbleibenden Reststreuung hinzugezählt werden.

In Anlehnung an die Berechnung des Elastizitätsmoduls (siehe [20]) wird auch bei der Zugfestigkeit davon ausgegangen, daß die gesamte Reststreuung s_R in zwei Anteile aufgeteilt werden kann:

- ein Anteil ergibt sich unter der Annahme, daß in einem Brett die Festigkeitswerte der einzelnen Brettabschnitte im Mittel sowohl über als auch unter den von der Regressionsgleichung vorhergesagten Werten liegen können: ein Brett kann "besser" oder "schlechter" als der Durchschnitt sein. Dieses Verhalten kann mit einem Abstand Δ_B von der Regressionsgeraden beschrieben werden;
- der zweite Anteil ergibt sich unter der Annahme, daß die Streuung der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes geringer ist als die Reststreuung s_R der allgemeinen Regressionsgeraden, die für das gesamte Holzangebot gilt. Dieses Verhalten, das mit der Wuchsregelmäßigkeit eines Baumes erklärt werden kann, kann durch die Größe $s_{R,B}$ beschrieben werden, die einer geringeren Standardabweichung des Residuums entspricht.

Die Aufteilung der gesamten Reststreuung s_R in die beiden Anteile Δ_B und $s_{R,B}$ ist in Bild 3.1 qualitativ dargestellt.

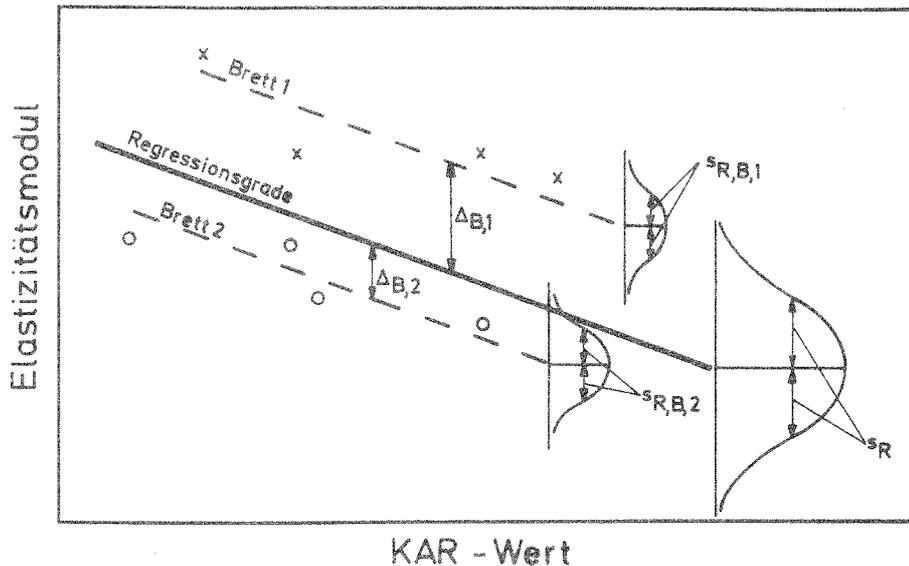


Bild 3.1: Aufteilung der gesamten Reststreuung s_R

3.2 Versuche, Diskussion der Ergebnisse

Zur Bestimmung der beiden Anteile Δ_B und $s_{R,B}$ wurden aus mehreren deutschen Leimbaubetrieben insgesamt 67 Bretter zu Versuchszwecken entnommen. Diese Bretter stammten aus unterschiedlichen Herkunftsgebieten (Deutschland/Österreich, Ostblock, Skandinavien). Aus jedem dieser Bretter wurden 3 bis 4 Brettabschnitte mit einer Länge von 1,0 - 1,2 m herausgeschnitten, so daß eine gesamte Anzahl von 242 Versuchskörpern zur Verfügung stand. Von jedem Prüfkörper wurde der KAR-Wert, die Darr-Rohdichte ρ_0 , der Zug-Elastizitätsmodul E_Z und die Zugfestigkeit f_Z bestimmt. Die Versuchsergebnisse sind in den Tabellen 3.1a bis 3.1h zusammengestellt. Bei den Prüfkörpernummern entsprechen die beiden ersten Zahlen der Brettnummer (beginnend mit Brettnummer 21) und die dritte Zahl der fortlaufenden Prüfkörpernummer dieses Brettes.

Tabelle 3.1a: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
211	0,260	470	10416	47,8
212	0,245	460	10710	46,5
213	0,240	428	9950	42,4
221	0,185	418	10630	34,7
222	0,185	449	10050	45,1
223	0,182	417	9370	34,5
231	0,205	416	13740	57,2
232	0,175	417	12110	44,2
233	0,120	427	12570	58,7
241	0,242	475	12380	50,4
242	0,321	441	9950	36,8
243	0,299	458	10520	35,0
251	0,131	416	11650	39,9
252	0,133	419	11640	51,6
253	0,205	421	12020	47,9
261	0,206	450	12220	53,7
262	0,206	450	12380	48,4
263	0,210	443	10700	39,6
271	0,349	472	11840	35,3
272	0,217	447	11840	41,2
273	0,274	454	12900	43,7
281	0,256	415	10400	32,3
282	0,264	427	10560	43,5
283	0,339	411	8970	32,6
291	0,244	451	12780	44,3
292	0,240	471	12560	46,8
293	0,240	459	12300	32,7

Tabelle 3.1b: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
301	0,195	469	14250	59,1
302	0,200	425	13120	45,9
303	0,105	443	11690	38,7
311	0,248	457	13520	47,2
312	0,300	452	12350	46,6
313	0,284	490	12230	49,2
321	0,178	381	10450	40,3
322	0,203	391	9560	40,9
323	0,224	395	10490	38,9
331	0,385	445	10940	41,1
332	0,380	461	10830	34,8
333	0,269	459	11730	50,1
341	0,457	339	4290	13,2
342	0,332	354	6490	19,6
343	0,469	365	4990	19,1
351	0,160	398	10570	51,2
352	0,384	395	7470	21,6
353	0,422	404	8250	28,0
361	0,165	435	12770	52,5
362	0,180	433	13300	49,9
363	0,120	417	12550	54,6
371	0,175	437	12730	56,3
372	0,155	464	15480	60,9
373	0,185	469	12320	42,7
381	0,185	434	13000	58,6
382	0,200	424	12360	52,4
383	0,175	448	11650	44,5
391	0,260	460	11270	54,2
392	0,215	441	10360	40,3
393	0,394	437	8990	27,4

Tabelle 3.1c: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
401	0,193	489	13790	61,6
402	0,075	492	15220	60,7
403	0,110	493	14490	73,3
411	0,471	427	7810	28,5
412	0,228	423	12240	44,2
413	0,302	423	9980	37,0
431	0,170	432	11610	42,5
432	0,136	463	14870	42,0
433	0,248	446	11500	40,6
441	0,190	464	13990	64,3
442	0,143	448	13810	53,0
443	0,262	444	12030	51,4
444	0,160	434	14190	49,3
451	0,144	495	16640	60,4
452	0,110	496	17790	73,1
453	0,125	476	14970	64,8
454	0,111	480	14260	59,3
461	0,155	485	16500	56,1
462	0,149	471	15230	66,4
463	0,100	475	15980	74,1
464	0,124	468	16370	71,4
471	0,460	366	7450	24,2
472	0,200	378	8840	29,3
473	0,541	359	5990	16,0
474	0,165	370	9840	31,7
481	0,455	482	9090	25,6
482	0,399	477	9990	31,8
483	0,340	489	11180	29,2
484	0,258	508	13530	46,4
491	0,364	413	9650	26,5
492	0,195	407	10360	49,4
493	0,578	414	6040	21,4
494	0,160	405	7940	28,4

Tabelle 3.1d: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
501	0,362	415	10690	34,9
502	0,300	428	10710	29,4
503	0,258	423	11850	44,6
504	0,185	435	14700	49,5
511	0,408	417	8100	21,3
512	0,220	432	11010	46,3
513	0,246	447	12180	43,3
514	0,321	434	9430	35,6
521	0,365	469	9270	35,1
522	0,361	460	8950	26,9
523	0,175	483	12370	57,1
524	0,335	506	9920	39,4
531	0,210	412	10120	35,6
532	0,215	414	10750	25,4
533	0,141	381	9560	27,0
534	0,331	377	8920	22,2
541	0,220	425	10480	31,8
542	0,155	433	12560	46,8
543	0,210	426	10960	44,3
544	0,301	419	10300	39,8
551	0,509	391	7720	23,5
552	0,444	387	8010	22,0
553	0,371	385	7830	27,0
554	0,227	420	9900	36,6
561	0,425	417	9430	34,6
562	0,187	439	12530	49,0
563	0,379	448	10810	35,1
564	0,333	454	13150	37,4
571	0,413	481	10720	33,8
572	0,215	471	11390	53,0
573	0,210	455	10130	30,1
574	0,185	457	14320	65,7

Tabelle 3.1e: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
581	0,220	432	9910	36,4
582	0,541	445	6230	17,4
583	0,314	449	11340	39,1
584	0,355	439	8850	29,1
591	0,184	441	12650	34,2
592	0,056	437	14150	43,8
593	0,080	446	12780	37,6
594	0,080	437	12950	59,7
601	0,258	419	10600	43,3
602	0,345	424	9310	27,8
603	0,205	422	10680	38,8
604	0,281	422	9390	33,5
611	0,291	469	13010	34,6
612	0,214	459	14480	48,9
613	0,140	422	12470	41,2
621	0,130	422	13140	45,8
622	0,160	416	12080	39,0
623	0,240	416	10750	43,0
624	0,335	415	10180	33,9
631	0,461	454	9880	38,5
632	0,508	424	7300	24,2
633	0,245	412	10630	36,0
634	0,211	411	9960	34,5
641	0,257	421	12300	28,8
642	0,290	431	11940	35,8
643	0,224	429	10870	36,9
644	0,120	438	11670	40,6
651	0,190	427	11100	35,4
652	0,200	416	10120	31,2
653	0,275	410	9090	24,2
654	0,200	440	10580	26,0

Tabelle 3.1f: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
661	0,218	500	14070	51,1
662	0,172	502	15080	48,6
663	0,136	511	16990	70,2
664	0,244	510	13890	45,9
671	0,453	377	8970	25,6
672	0,201	367	10420	30,6
673	0,295	370	9150	22,7
674	0,515	370	7260	16,8
681	0,184	449	11930	43,6
682	0,164	462	13840	68,2
683	0,395	464	10800	33,6
684	0,234	441	11270	44,3
691	0,172	413	14670	18,6
692	0,314	349	8740	17,8
693	0,203	360	8910	17,0
694	0,252	349	9810	18,5
701	0,178	545	17230	49,4
702	0,248	492	16280	49,2
703	0,092	506	14520	63,5
704	0,152	490	14080	59,0
711	0,340	428	10380	46,3
712	0,221	421	10510	44,1
713	0,332	418	10130	35,9
714	0,345	430	10340	31,7
721	0,407	452	10940	35,2
722	0,291	448	13290	43,4
723	0,315	444	11790	39,1
724	0,256	437	14180	48,4
731	0,290	478	13480	41,5
732	0,316	469	12090	30,9
733	0,238	451	12440	48,0
734	0,279	431	9910	41,0

Tabelle 3.1g: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
741	0,276	499	11330	41,5
742	0,149	475	12510	41,7
743	0,318	458	10520	33,6
744	0,136	462	14010	60,1
751	0,096	434	15140	60,4
752	0,235	432	13710	45,8
753	0,120	426	13140	51,5
754	0,224	440	11830	36,3
761	0,269	468	12030	35,6
762	0,380	458	10150	29,4
763	0,308	446	11490	39,4
764	0,388	447	10210	30,0
771	0,132	513	17950	72,0
772	0,136	484	17390	62,5
773	0,234	476	14810	53,8
774	0,157	487	16120	59,0
781	0,364	444	9800	34,6
782	0,445	439	9050	26,9
783	0,170	429	15810	60,3
784	0,460	435	7830	25,5
791	0,244	480	14530	56,9
792	0,342	501	14260	56,8
793	0,123	488	18230	73,1
794	0,220	491	15120	60,8
801	0,140	512	16110	56,1
802	0,322	513	13010	45,8
803	0,129	495	16410	55,9
804	0,244	507	18000	53,0
811	0,292	348	8840	29,3
812	0,369	358	7810	20,8
813	0,152	361	9990	29,3
814	0,328	346	8730	27,4

Tabelle 3.1h: Zugversuche; Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Prüfkörper-Nr.	KAR-Wert [-]	Darr-Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	Zug-E-Modul E_Z [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_Z [N/mm ²]
821	0,368	474	11570	38,5
822	0,300	476	13780	50,4
823	0,298	477	14210	55,1
824	0,276	471	13890	53,4
831	0,348	471	12390	38,3
832	0,116	467	16260	73,2
833	0,272	473	15560	55,8
841	0,501	506	6200	14,1
842	0,428	466	10600	27,4
843	0,188	476	11020	41,0
844	0,065	475	16790	44,6
851	0,305	460	11990	49,4
852	0,170	485	18150	72,1
853	0,120	501	16560	81,5
854	0,140	518	18630	75,9
861	0,290	345	9050	33,7
862	0,282	348	8650	29,9
863	0,282	356	8500	40,5
871	0,276	500	12040	46,2
872	0,225	485	13690	56,2
873	0,366	477	11870	32,1
881	0,380	348	8110	24,2
882	0,366	358	8120	24,9
883	0,302	363	7660	19,5
884	0,246	356	7490	20,3

In den Bildern 3.2 bis 3.5 sind die Versuchsergebnisse in Form von Häufigkeitsdiagrammen dargestellt.

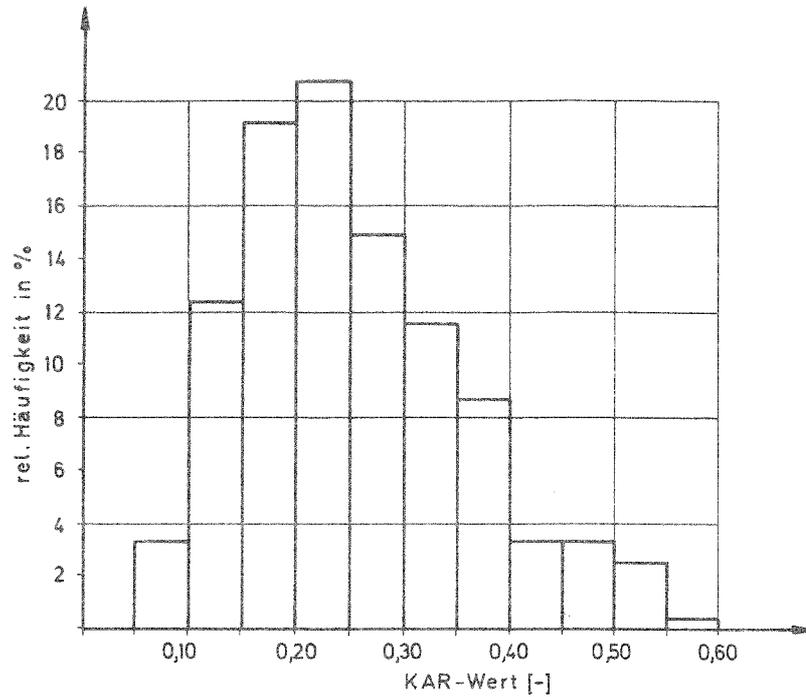


Bild 3.2: Häufigkeitsverteilung der KAR - Werte

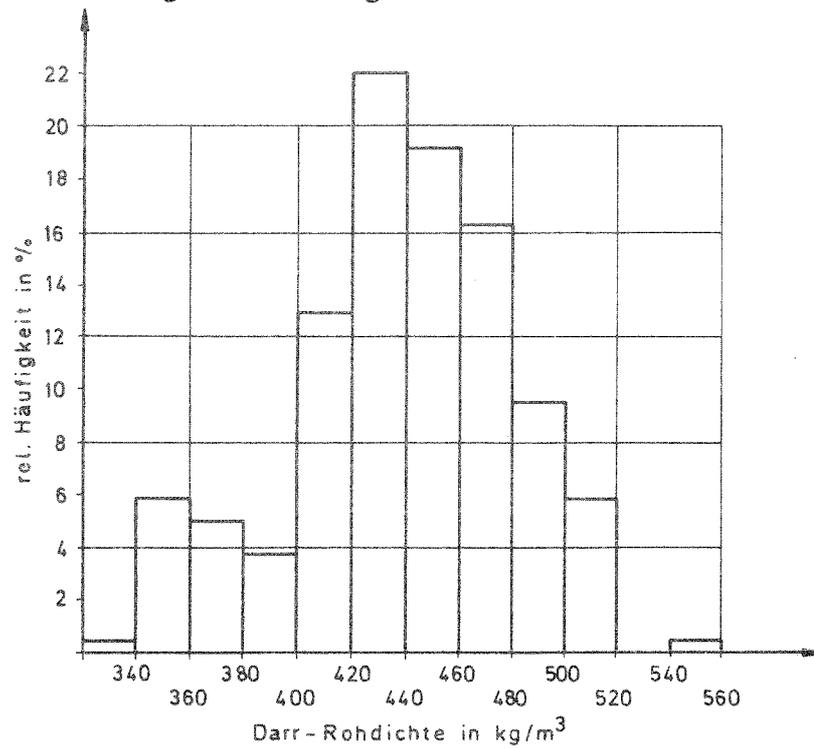


Bild 3.3: Häufigkeitsverteilung der Darr - Rohdichte

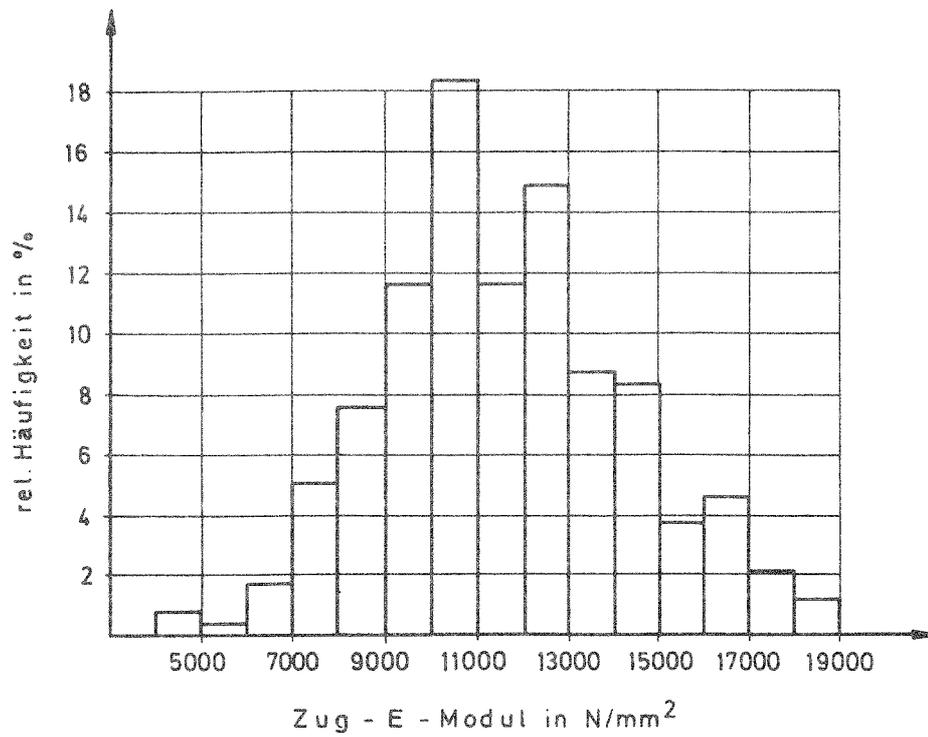


Bild 3.4: Häufigkeitsverteilung des Zug - Elastizitätsmoduls

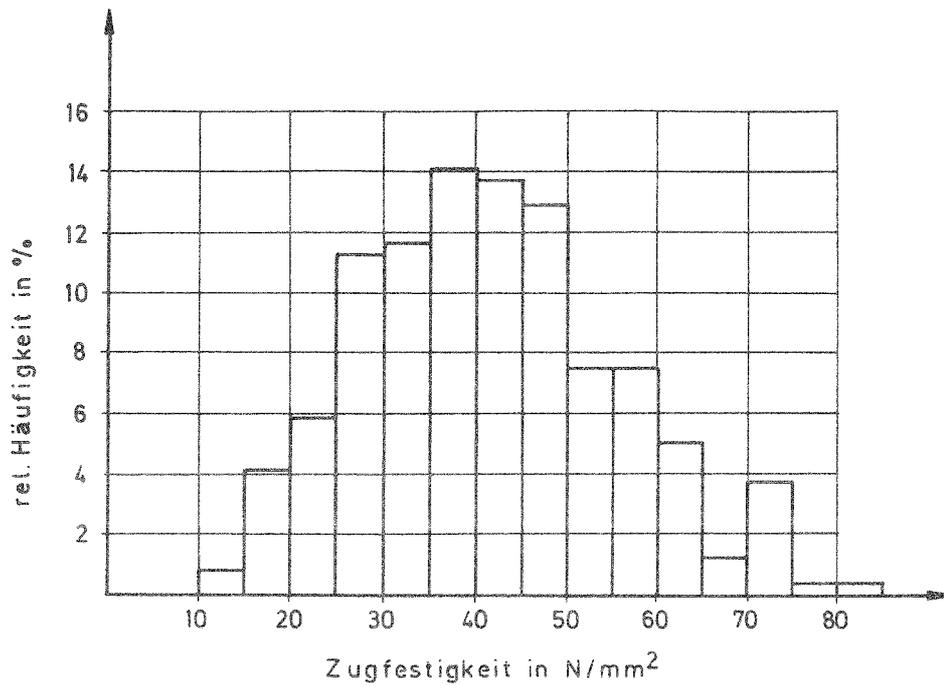


Bild 3.5: Häufigkeitsverteilung der Zugfestigkeit

Anhand dieser Versuche ergibt sich folgende Regressionsgleichung zur Bestimmung der Zugfestigkeit eines Brettabschnittes:

$$\ln(f_Z) = -6,675 + \ln(E_Z) \cdot (1,122 - 0,0545 \cdot KAR) \quad (3.2)$$

mit $R = 0,865$ und $s_R = 0,178$

Diese Regressionsgleichung unterscheidet sich erheblich von *Gl(3.1)*, was mit der im Rahmen dieses Vorhabens vorgenommenen Probenauswahl erklärt werden kann: da die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in der Regel nicht von der hohen Zugfestigkeit der fehlerfreien Brettabschnitte bestimmt wird, wurden bei der Probenauswahl so weit wie möglich die Brettabschnitte entnommen, die nach Augenschein die größte Schwächung infolge von Ästen aufwiesen. Die Prüfkörper eines jeden Brettes wurden also gezielt nach der geringsten Festigkeit ausgewählt und stellen somit keinen repräsentativen Querschnitt über alle in einem Brett auftretenden Brettabschnitte dar.

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit mit den bisher durchgeführten Untersuchungen, wurden diese Versuche in München unter Leitung von *Prof. Glos* durchgeführt.

Die weitere Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte mit Hilfe von *Gl(3.1)*, da diese, wie bereits erwähnt, repräsentativ für das gesamte Brettangebot ist und auch im entwickelten Rechenmodell zur Berechnung der "Zellenfestigkeit" verwendet wird. Ausgeschlossen wurden hierbei die Versuche Nummer 691 bis 694, weil das gesamte Brett Schädigungen (Quetschfalten im Bereich der Äste) aufwies, die zu unerwartet geringen Zugfestigkeiten führten.

Für jeden Prüfkörper wurde mit Hilfe von *Gl(3.1)* die zu erwartende Zugfestigkeit $f_{Z,Reg}$ berechnet und mit der im Versuch tatsächlich ermittelten Zugfestigkeit $f_{Z,Versuch}$ verglichen. Die Differenz zwischen tatsächlicher und erwarteter Zugfestigkeit ist ein Maß für die noch verbleibende Reststreuung. Da logarithmische Regressionsgleichungen verwendet wurden, wurde von jedem Versuchskörper die Differenz $\ln(f_{Z,Versuch}) - \ln(f_{Z,Reg})$ gebildet. In *Bild 3.6* ist die zugehörige Häufigkeitsverteilung dargestellt.

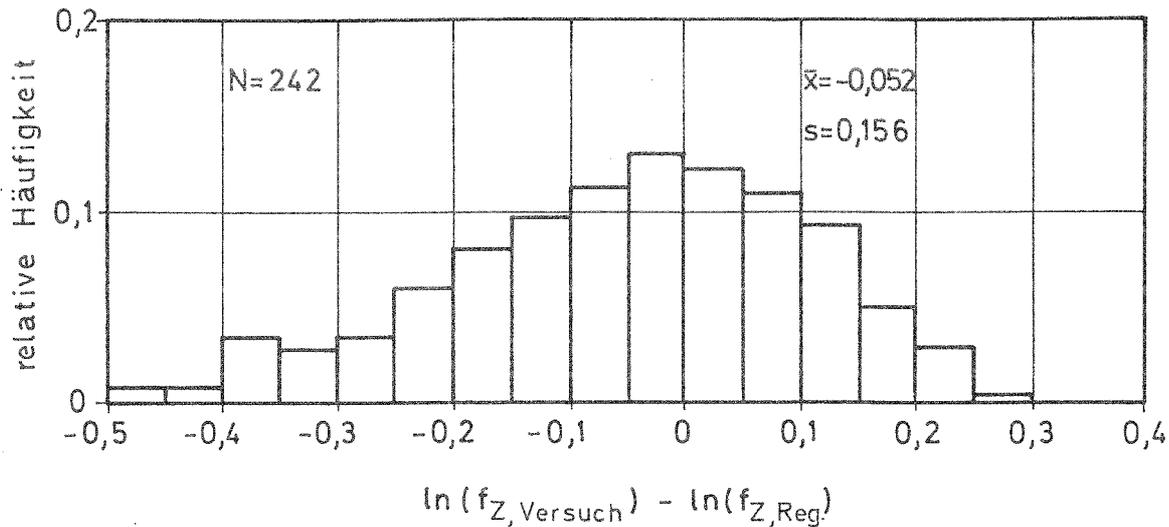


Bild 3.6: Häufigkeitsverteilung der Differenz $\ln(f_{Z,\text{Versuch}}) - \ln(f_{Z,\text{Reg}})$ (=gesamte Reststreuung)

Aus diesen Versuchen ergab sich für die Differenz $\ln(f_{Z,\text{Versuch}}) - \ln(f_{Z,\text{Reg}})$ ein Mittelwert von -0,052 bei einer Standardabweichung von 0,156. Diese Standardabweichung des Residuums (=Reststreuung) ist geringer als die bei den früheren Versuchen von *Glos* ermittelte gesamte Reststreuung von $s_R = 0,187$ (siehe *Gl(3.1)*).

Weiterhin wurde in Anlehnung an *Abschnitt 3.1* und *Bild 3.1* für jedes Brett der Abstand Δ_B von der Regressionsgeraden berechnet. Dieser Wert ergibt sich jeweils aus der mittleren Differenz aller Proben eines Brettes. In *Bild 3.7* ist die Häufigkeitsverteilung dieser Abstände dargestellt.

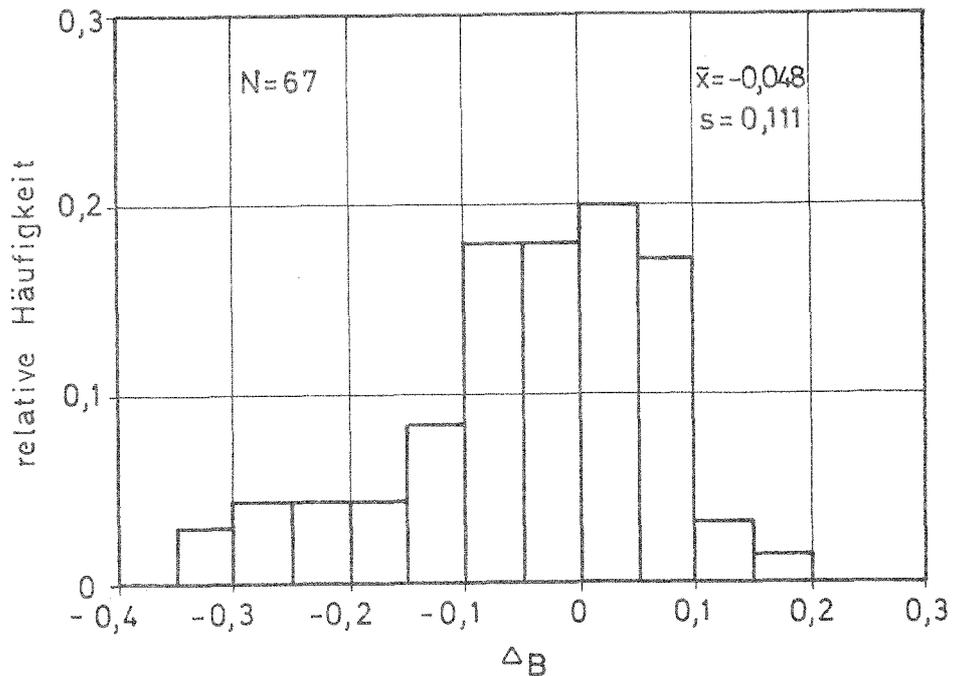


Bild 3.7: Häufigkeitsverteilung des Abstandes Δ_B eines Brettes von der Regressionsgeraden

Die Streuung der Einzelwerte um diese um das Maß Δ_B verschobene Regressionsgeraden entspricht der Reststreuung $s_{R,B}$ der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes. Während bei den Untersuchungen von GÖRLACHER [28] über die Streuung des Elastizitätsmoduls jedes Brett in 150 mm Brettabschnitte unterteilt werden konnte, standen bei diesen Untersuchungen aufgrund der erforderlichen Prüfkörperabmessungen nur jeweils höchstens 4 Versuchswerte pro Brett zur Verfügung. Somit erschien es nicht sinnvoll, für jedes Brett die zugehörige Reststreuung zu bestimmen. Unter der vereinfachenden Annahme, daß es eine Reststreuung gibt, die für alle Bretter charakteristisch ist, wurden deshalb alle Versuchswerte zusammengefaßt.

Aus den Versuchen ergab sich für den mittleren "Brettabstand" ein Wert von -0,048 bei einer Standardabweichung von 0,111. Dies bedeutet, daß etwa 70% der gesamten Reststreuung mit dem Abstand Δ_B erklärt werden können ($0,111 \approx 0,7 \cdot 0,156$).

Unter der Annahme, daß sowohl die Verteilung für die gesamte Reststreuung s_R als auch die Verteilungen für die beiden Anteile Δ_B und $s_{R,B}$ (=Streuung innerhalb eines Brettes) normalverteilt sind, gilt folgende Beziehung:

$$s_R^2 = \Delta_B^2 + s_{R,B}^2 \quad (3.3)$$

Somit ergibt sich die Reststreuung $s_{R,B}$ der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes zu:

$$s_{R,B}^2 = (0,156)^2 - (0,7 \cdot 0,156)^2 \approx (0,111)^2$$

Aufgrund der Tatsache, daß die hier beschriebenen Zugversuche mit Prüfkörpern aus lediglich 67 Brettern durchgeführt wurden, wird bei den Simulationsrechnungen die Zugfestigkeit der Zellen weiterhin mit der in *Gl(3.1)* angegebenen Regressionsgleichung und der zugehörigen Reststreuung berechnet. Die Aufteilung dieser gesamten Reststreuung in die beiden o.a. Anteile erfolgt dabei unter der Annahme, daß auch hier etwa 70% der gesamten Reststreuung vom "Brettabstand" Δ_B erklärt werden können. Somit wird bei den Simulationsrechnungen mit $\Delta_B = 0,7 \cdot 0,187 \approx 0,13$ und $s_{R,B} = 0,187^2 - (0,7 \cdot 0,187)^2 \approx 0,13$ gerechnet.

Im Rahmen des Simulationsprogrammes wird die Zellen-Zugfestigkeit somit wie folgt bestimmt:

- 1 für jedes Brett wird ein Abstand Δ_B aus der Normalverteilung $NV(0;0,13)$ gewählt,
- 2 für jede Zelle wird die erwartete Zugfestigkeit $f_{Reg,i}$ mit Hilfe der zugehörigen Regressionsgleichung (*Gl3.1*) bestimmt,
- 3 für jede Zelle wird ein zufälliger Streuwert X_i aus der Reststreuung $s_{R,B}$ gewählt ($NV(0;0,13)$),
- 4 die Zellenzugfestigkeit f_i ergibt sich dann aus

$$\ln(f_i) = \ln(f_{Reg,i}) + \Delta_B + X_i \quad (3.3)$$

Somit werden auch bei der Simulation der Zugfestigkeit die Streuung der Werkstoffkennwerte und die durch das Wachstum des Baumes bedingten Regelmäßigkeiten berücksichtigt.

4 Eigenschaften des in deutschen Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes

4.1 Allgemeines

Mit Hilfe des in dieser Forschungsreihe entwickelten "Karlsruher Rechenmodells" ist es möglich, die Auswirkungen verschiedener Sortierverfahren - visuell, maschinell oder kombiniert visuell/maschinell - auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern abzuschätzen. Als mögliche Sortierkriterien kommen hierbei die Ästigkeit, die Rohdichte sowie der Elastizitätsmodul der Bretter in Frage.

Während sich bei einer visuellen Sortierung das Hauptaugenmerk auf die größte in einem Brett auftretende Querschnittsschwächung infolge von Ästen richtet, kann bei der maschinellen Holzsortierung sowohl ein mittlerer Wert der Rohdichte oder des Elastizitätsmoduls als auch ein örtlich auftretender Kleinstwert als Sortierparameter dienen.

Ziel der im folgenden beschriebenen Untersuchungen war es, einen Überblick über die festigkeitsrelevanten Eigenschaften - Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul - des z.Zt. in den deutschen Leimbaubetrieben verarbeiteten Brettmaterials zu geben (siehe auch COLLING/GÖRLACHER [12]).

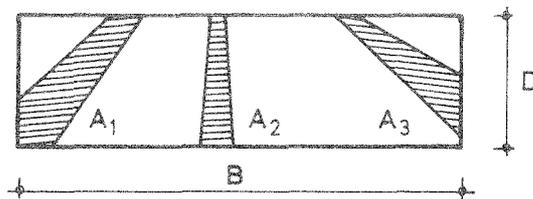
Die Ergebnisse dieser Untersuchungen könnten z.B. bei der Festlegung von Grenzwerten für die Sortierparameter mit herangezogen werden und/oder im Falle von vorgeschriebenen Werten bei der Abschätzung der Ausbeute an Brettmaterial dienen.

4.2 Versuchsmaterial

Um die Holzeigenschaften auf der Grundlage einer repräsentativen Stichprobe untersuchen zu können, wurden Bretter aus den drei Haupt-Herkunftsgebieten Deutschland/Österreich, Ostblock (z.B. CSFR, ehemalige "DDR", UDSSR) und Skandinavien ausgewählt.

Folgende Kenngrößen der Bretter wurden ermittelt:

- größte in einem Brett auftretende Querschnittsschwächung infolge von Ästen in Form des KAR-Wertes (siehe *Bild 4.1*). Hierbei entspricht der KAR-Wert dem Verhältnis der Fläche aller innerhalb eines 15cm Brettabschnittes auftretenden Äste zur Brutto-Querschnittsfläche (KAR = Knot Area Ratio = Astflächenverhältnis);
- mittlere Rohdichte, die sich aus der Masse und den jeweiligen Abmessungen der Bretter ergab;
- mittlerer dynamischer Elastizitätsmodul, der über Längsschwingungen mit Hilfe eines Schwingungs-Meßgerätes bestimmt wurde (vgl. [28]).



$$\text{KAR} = (A_1 + A_2 + A_3) / (B \cdot D)$$

Bild 4.1: Definition des KAR - Wertes

Die Holzfeuchte der Bretter wurde stichprobenartig überprüft. Sie lag zwischen 10 und 14%.

Das Versuchsmaterial gehörte durchweg der Holzart Fichte/Tanne an und stammte aus fünf deutschen Leimbaubetrieben¹.

Insgesamt wurden von 2760 Brettern unterschiedlicher Breite die mittlere Rohdichte und der mittlere Elastizitätsmodul bestimmt. Von 1434 Brettern wurde zusätzlich der jeweils größte im Brett auftretende KAR-Wert ermittelt.

¹ Den Firmen Christian Burgbacher Holzwerke in Trossingen, W. u. J. Derix, Holzleimbau in Niederkrüchten, Anton Hess Holzleimbau in Miltenberg, Poppensieker & Derix Holzleimbau in Westerkappeln und Schaffitzel Holzindustrie in Schwäbisch Hall sei nochmals für die freundliche Unterstützung bei diesen Untersuchungen gedankt.

4.3 Darstellung der Ergebnisse

4.3.1 Alle Werte

In Bild 4.2 bis 4.4 sind die Häufigkeitsverteilungen für den größten KAR-Wert, die mittlere Rohdichte und den mittleren Elastizitätsmodul der Bretter dargestellt. Die jeweiligen Mittelwerte \bar{x} und die zugehörigen Standardabweichungen s sind ebenfalls angegeben. Diese Verteilungen wurden ermittelt unter der Berücksichtigung aller Versuchswerte, unabhängig vom Herkunftsort und der Brettbreite.

4.3.2 Unterscheidung nach Herkunftsgebiet

In Bild 4.5 bis 4.7 sind die Häufigkeitsverteilungen der untersuchten Holzeigenschaften für jedes der drei oben genannten Hauptherkunftsgebiete dargestellt.

Aus diesen Bildern ist ersichtlich, daß die Holzeigenschaften der aus Deutschland/Österreich stammenden Bretter mit denen der aus dem Ostblock importierten Bretter vergleichbar sind, während die skandinavische Ware im Mittel kleinere maximale KAR-Werte und höhere Werte für die Rohdichte und den Brett-Elastizitätsmodul aufweist.

Eine Abhängigkeit der Holzeigenschaften von der Brettbreite konnte anhand dieser Untersuchungen nicht nachgewiesen werden.

Für die Abhängigkeit Elastizitätsmodul - Rohdichte wurde folgende, für alle Herkunftsgebiete gültige Regressionsgleichung ermittelt (nähere Angaben siehe [12]):

$$E_{\text{Brett}} = -5520 + 40,17 \cdot \rho_{\text{Brett}} \quad (4.1)$$

mit

$$\begin{aligned} E_{\text{Brett}} &= \text{mittlerer Brett-Elastizitätsmodul in N/mm}^2, \\ \rho_{\text{Brett}} &= \text{mittlere Brett-Rohdichte in kg/cm}^3 \text{ bei einer Holz-} \\ &\quad \text{feuchte von etwa 12\%} \end{aligned}$$

Der Korrelationskoeffizient dieser Gleichung ergab sich zu $R = 0,76$.

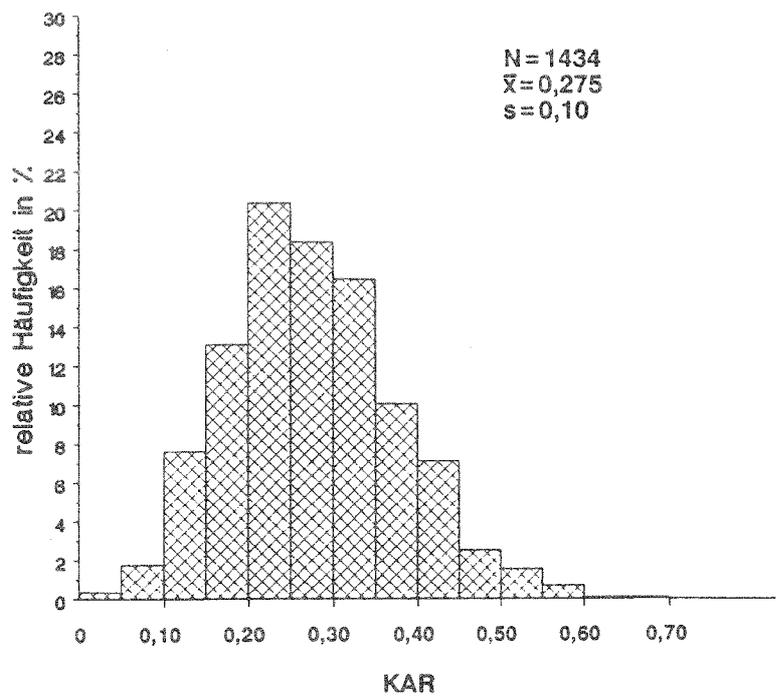


Bild 4.2 Häufigkeitsverteilung des größten KAR - Wertes

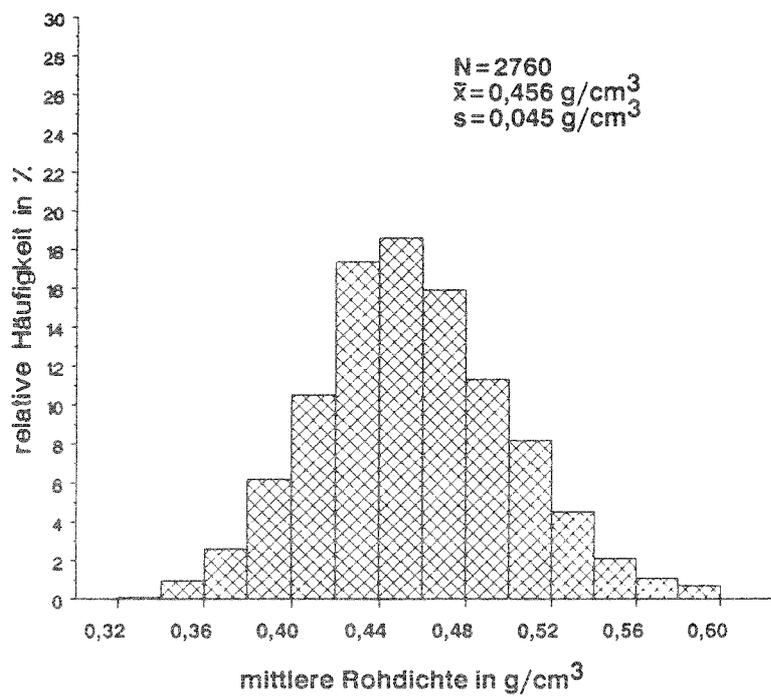


Bild 4.3 Häufigkeitsverteilung der mittleren Rohdichte

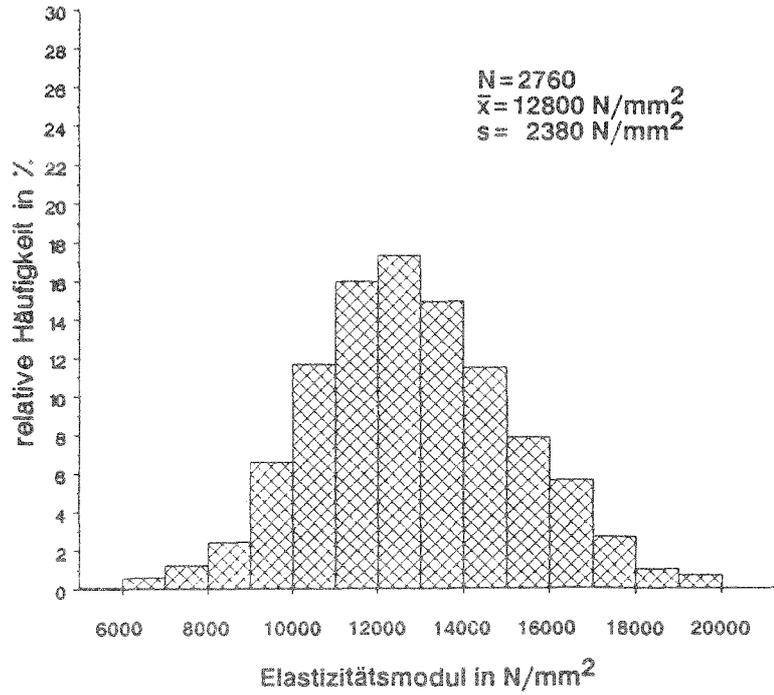


Bild 4.4 Häufigkeitsverteilung des mittleren Elastizitätsmoduls

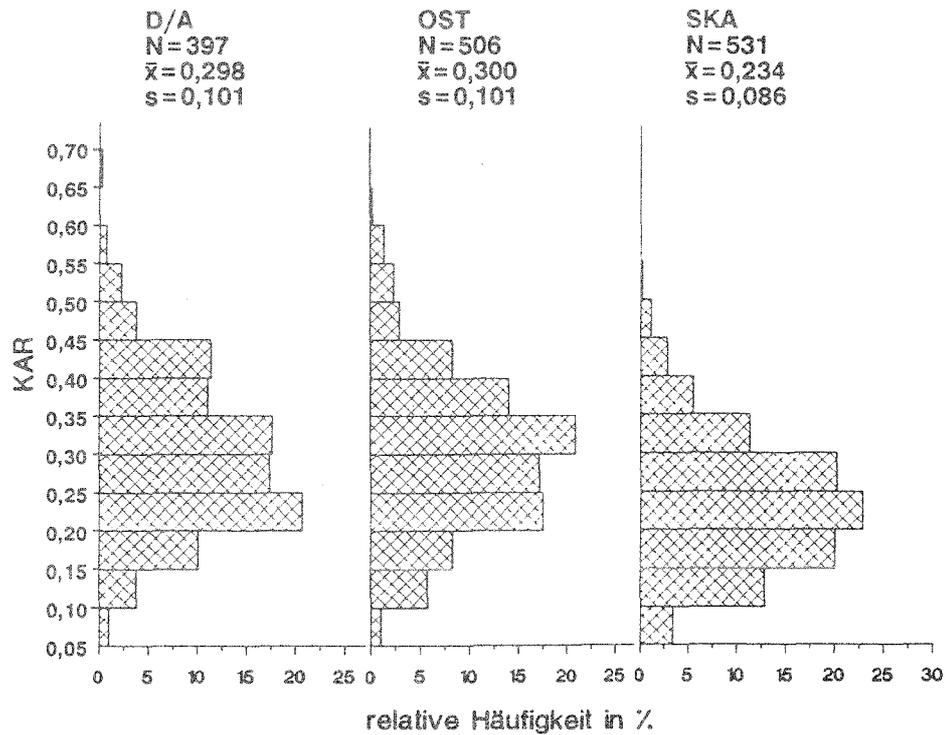


Bild 4.5: Häufigkeitsverteilung des größten KAR - Wertes getrennt nach Herkunftsgebiet

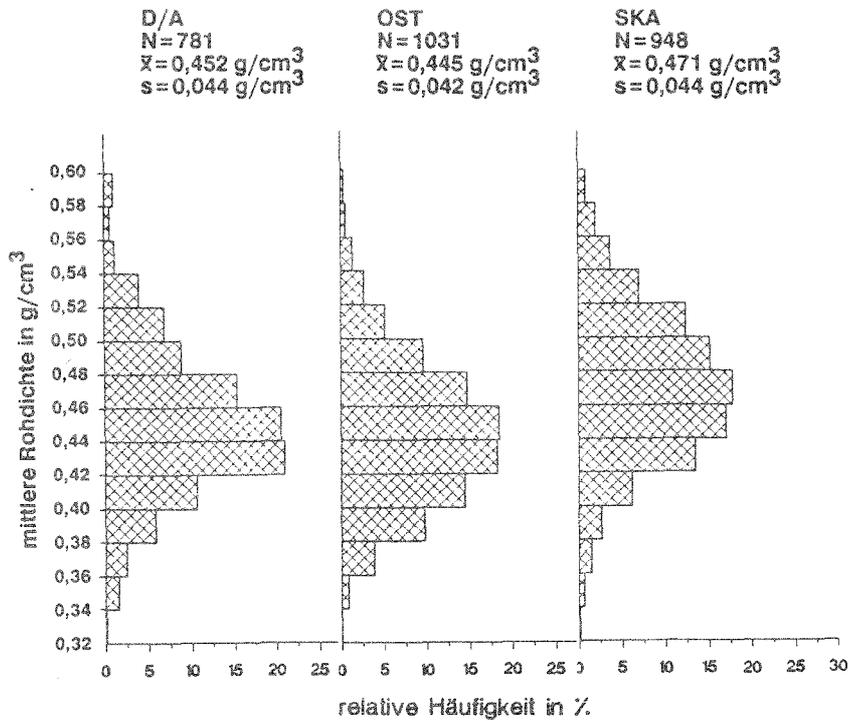


Bild 4.6: Häufigkeitsverteilung der mittleren Rohdichte getrennt nach Herkunftsgebiet

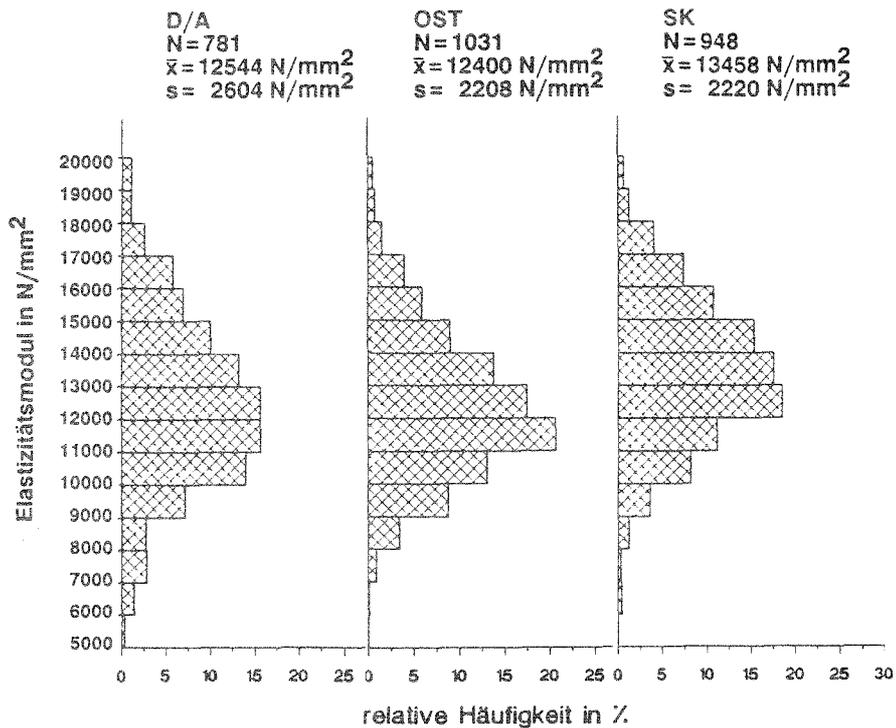


Bild 4.7: Häufigkeitsverteilung des mittleren Elastizitätsmoduls getrennt nach Herkunftsgebiet

4.4 Diskussion der Ergebnisse

Wie in *Abschnitt 4.3.2* bereits erwähnt, weisen die aus Skandinavien importierten Bretter im Mittel "bessere" Holzeigenschaften auf als die Bretter aus den beiden anderen Herkunftsgebieten. Aus *Bild 4.5* bis *4.7* geht jedoch hervor, daß in allen Herkunftsgebieten sowohl gute als auch schlechte Bretter vorhanden sind und daß lediglich der Anteil an hochwertigen Brettern unterschiedlich groß ist. So ist aus *Bild 4.7* zu entnehmen, daß der Anteil der Bretter mit einem Elastizitätsmodul über 15000 N/mm^2 in den Herkunftsgebieten Deutschland/Österreich 17%, Ostblock 13%, und Skandinavien 24% beträgt.

Weiterhin wurde gezeigt, daß zwischen dem Elastizitätsmodul und der Rohdichte eines Brettes eine Beziehung besteht, die vom Herkunftsgebiet offensichtlich wenig abhängig ist. Die o.a. unterschiedliche "Ausbeute" an hochwertigen Brettern kann also mit der Rohdichte erklärt werden. Bei der Beurteilung der Steifigkeit der Bretter ist somit eine Unterscheidung nach Wuchsgebieten unnötig, weil die Einflüsse von Wuchsgebiet und Wuchsbedingungen in den Holzeigenschaften bereits enthalten sind.

Die gleiche Tendenz stellte GLOS [27] bei seinen Festigkeitsuntersuchungen fest, die zeigten, daß die Kenntnis der Holzeigenschaften eine zuverlässige Vorhersage der Festigkeit ermöglicht und daß eine zusätzliche Unterscheidung nach dem Herkunftsgebiet keine weitere Verbesserung der Vorhersage bewirkt. Die bei den Untersuchungen von *Glos* ermittelten Regressionsgleichungen bilden auch die Grundlage des entwickelten Rechenmodelles.

Bei den Simulationsrechnungen mit diesem Rechenmodell zeigte sich, daß die höchsten Biegefestigkeiten von Brettschichtholzträgern dann zu erwarten sind, wenn neben einem Mindest-Elastizitätsmodul noch eine Höchstgrenze für die KAR-Werte dieser Bretter gefordert wird. Diese Grenzwerte können aber nicht willkürlich festgelegt werden, sondern hierbei muß das zur Verfügung stehende Brettmaterial berücksichtigt werden, damit eine ausreichende "Ausbeute" gewährleistet werden kann. Da die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in besonderem Maße von der Festigkeit der äußeren Zuglamellen bestimmt wird, erscheinen solche Grenzwerte sinnvoll, die für die höchste Festigkeitsklasse noch eine Ausbeute von etwa 15% ermöglichen. Dadurch wäre das vorhandene Brettmaterial am effektivsten

ausgenutzt. In *Tabelle 4.1* ist die zu erwartende Ausbeute in Abhängigkeit der beiden oben genannten Kenngrößen angegeben.

Zur Zeit erfolgt die Holzsortierung in Deutschland nach DIN 4074, wobei die Astgröße das Hauptkriterium darstellt. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen traten die größten KAR-Werte eines Brettes in den meisten Fällen im Bereich von Astansammlungen auf. Für Bretter der Güteklasse I ist für diesen Fall ein Höchstwert von 0,33 für das Maß der Ästigkeit vorgesehen. Dieser Wert ist für durchgehende Äste identisch mit dem KAR-Wert, für andere Astbilder jedoch unterscheiden sich die beiden Kenngrößen für die Ästigkeit.

Tabelle 4.1: Auftretenshäufigkeit in % in Abhängigkeit vom Brett-Elastizitätsmodul und dem jeweils größten KAR-Wert (N = 1434 Bretter)

$\begin{array}{l} \text{KAR} \\ E \\ \text{N/mm}^2 \end{array}$	$\leq 0,15$	$\begin{array}{l} \geq 0,15 \\ \leq 0,30 \end{array}$	$\begin{array}{l} \geq 0,30 \\ \leq 0,45 \end{array}$	$\begin{array}{l} \geq 0,45 \\ \leq 0,60 \end{array}$	$\geq 0,60$	Σ
≤ 7500	0,0	0,6	0,8	0,2	0,0	1,6
$\begin{array}{l} \geq 7500 \\ \leq 10000 \end{array}$	0,3	2,0	3,6	1,3	0,1	7,2
$\begin{array}{l} \geq 10000 \\ \leq 12500 \end{array}$	2,1	14,6	13,7	1,9	0,1	32,4
$\begin{array}{l} \geq 12500 \\ \leq 15000 \end{array}$	4,0	20,2	11,9	1,1	0,0	37,2
$\begin{array}{l} \geq 15000 \\ \leq 17500 \end{array}$	2,3	12,3	3,3	0,1	0,0	18,1
$\begin{array}{l} \geq 17500 \\ \leq 20000 \end{array}$	0,9	2,0	0,3	0,1	0,0	3,3
≥ 20000	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3
Σ	9,7	51,8	33,6	4,7	0,2	100

Unter der Annahme, daß beide Kenngrößen für die Ästigkeit vergleichbar sind, ist aus *Bild 4.2* zu entnehmen, daß etwa 70% aller Bretter aufgrund ihrer Ästigkeit in die Güteklasse I eingeordnet werden können.

Weiterhin wird für die Güteklasse I eine Mindestrohddichte von $0,40 \text{ g/cm}^3$ bei einer Holzfeuchte von 20% gefordert. Dieser Wert entspricht etwa der Rohddichte von $0,38 \text{ g/cm}^3$ bei einer Holzfeuchte von 12%. Aus *Bild 4.3* ist zu erkennen, daß diese Bedingung von etwa 96% aller Bretter erfüllt wird und somit kaum eine wirkliche Anforderung an das vorhandene Brettmaterial darstellt.

Diese beiden Vergleiche zeigen, daß eine Holzsortierung nach DIN 4074 das zur Zeit zur Verfügung stehende Brettmaterial nicht sehr effektiv nutzt. So kann zum Beispiel die Tatsache nicht ausgenutzt werden, daß die Tragfähigkeit von Verbindungen bei Hölzern mit höherer Rohddichte zunimmt. Dieses Tragverhalten wird bei den Bemessungsvorschlägen nach dem Entwurf zu EUROCODE 5 [3] bereits berücksichtigt.

Weiterhin führt die derzeit praktizierte visuelle Holzsortierung dazu, daß bei dem in der Bemessung oft maßgebenden Verformungsnachweis der hohe Elastizitätsmodul vieler Bretter nicht genutzt werden kann. So ist bei Brettschichtholzträgern, die aus beliebigen Lamellen aufgebaut sind, im Mittel nur ein Elastizitätsmodul erreichbar, der dem mittleren Elastizitätsmodul der Bretter entspricht ($=12800 \text{ N/mm}^2$). Deutlich höhere Biegesteifigkeiten sind aber durch eine Sortierung des Holzes nach dem Elastizitätsmodul zu erreichen.

Am Beispiel einer Holzsortierung, die die Bretter anhand ihres Elastizitätsmoduls in zwei gleich große Gruppen unterteilt, soll dies verdeutlicht werden. Die erste Gruppe mit Brettern, deren Elastizitätsmodul über 12800 N/mm^2 , besitzt einen mittleren Elastizitätsmodul von 14700 N/mm^2 , während die zweite Gruppe mit $E < 12800 \text{ N/mm}^2$ einen mittleren Elastizitätsmodul von 10900 N/mm^2 aufweist. Ordnet man die Bretter der ersten Gruppe in den jeweils äußeren 25% der Trägerhöhe an, so ergibt sich ein wirksamer Biege-Elastizitätsmodul des Trägers von 14300 N/mm^2 (siehe *Bild 4.8*). Dies entspricht einer Steigerung der Biegesteifigkeit von 12%.

Schon an diesem einfachen Beispiel wird deutlich, daß durch eine geeignete maschinelle Holzsortierung neben einer hohen Tragfähigkeit auch eine hohe Biegesteifigkeit der Brettschichtholzträger möglich ist.

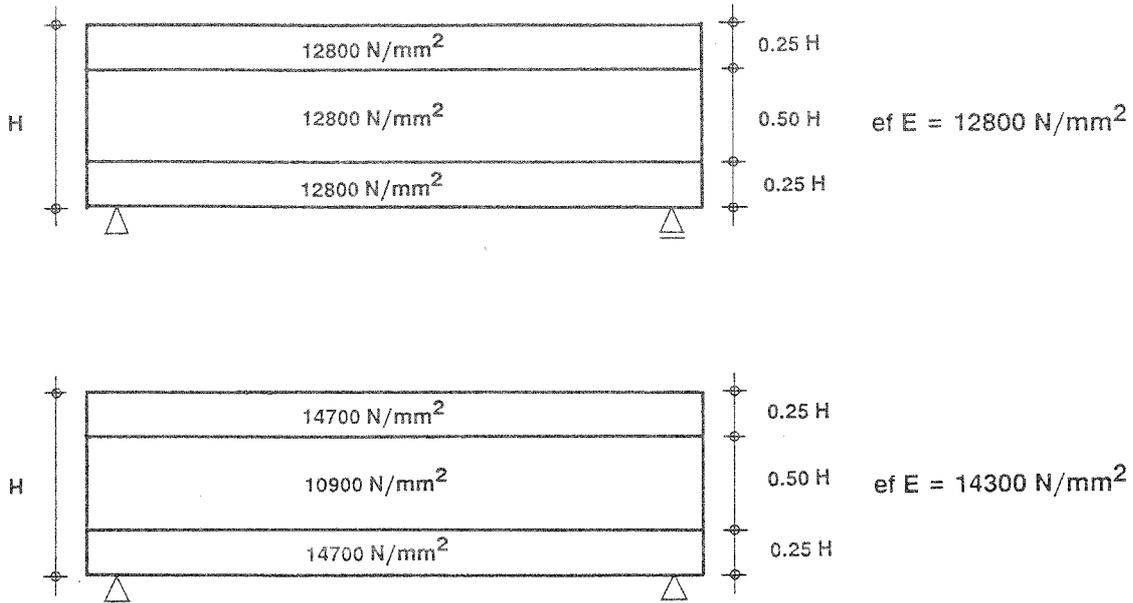


Bild 4.8: Wirksamer Elastizitätsmodul $ef E$ eines Brettschichtholzträgers in Abhängigkeit vom Trägeraufbau

4.5 Schlußfolgerungen

Im Rahmen dieses Abschnittes wurde das in den deutschen Holzleimbaubetrieben verarbeitete Schnittholz im Hinblick auf die festigkeitsrelevanten Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul untersucht. Das untersuchte Brettmaterial stammte aus den drei Haupt-Herkunftsgebieten Deutschland/Österreich, Ostblock und Skandinavien. Im einzelnen ergaben sich folgende Ergebnisse:

- die aus Skandinavien importierten Bretter weisen im Mittel "bessere" Holzeigenschaften auf als die Bretter aus den beiden anderen Herkunftsgebieten;
- in allen Herkunftsgebieten sind sowohl gute als auch schlechte Bretter vorhanden, lediglich die Ausbeute an hochwertigen Brettern ist je nach Herkunftsland unterschiedlich groß;
- innerhalb eines Herkunftsgebietes streuen die Holzeigenschaften erheblich, was in erster Linie auf die unterschiedlichen Wuchsregionen zurückzuführen ist,
- ein Einfluß der Brettbreite auf die untersuchten Holzeigenschaften konnte nicht nachgewiesen werden;
- die zur Zeit praktizierte rein visuelle Holzsortierung nach DIN 4074 bewirkt nur eine sehr grobe Einteilung des vorhandenen Brettmaterials;
- eine verfeinerte Holzsortierung auf der Grundlage der Rohdichte oder des Elastizitätsmoduls der Bretter ermöglicht eine effektivere Ausnutzung dieses Brettmaterials und somit auch eine wirtschaftlichere Bemessung von Holzkonstruktionen.

5 Theoretisches Modell

Wie bereits mehrfach erwähnt, wird die Tragfähigkeit von Brettschichtholzbiegeträgern im wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt, und zwar von der Festigkeit der Brettlamellen selbst *und* der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen. Aufgrund der produktionsabhängigen Einflüsse bei der Herstellung der Keilzinkenverbindungen können diese beiden Faktoren als - zumindest teilweise - voneinander unabhängig angesehen werden. Wie im zweiten Teil dieser Forschungsreihe ([20]) gezeigt wurde, hängt die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern weiterhin vom gegenseitigen Verhältnis dieser beiden Faktoren zueinander ab.

COLLING [13] entwickelte ein theoretisches Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern, in denen die Festigkeitseigenschaften der beiden beeinflussenden Faktoren berücksichtigt werden. Dieses Modell soll im folgenden beschrieben werden.

5.1 Aufteilung des Endproduktes Brettschichtholz in die beiden "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz

Das theoretische Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern geht davon aus, daß Brettschichtholz aus zwei voneinander unabhängigen "Materialien", dem Holz d.h. den Brettlamellen und den Keilzinkenverbindungen, besteht, und daß die Festigkeitseigenschaften dieser beiden "Materialien" bekannt sind.

Anhand der drei folgenden, rein hypothetischen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Trägertypen sollen die Überlegungen, die zu diesem Modell geführt haben, näher erläutert werden:

- Typ I: Brettschichtholzträger ohne Keilzinkenverbindungen;
- Typ II: Brettschichtholzträger mit durchschnittlicher Keilzinkenqualität, d.h. Keilzinkenfestigkeit;
- Typ III: Brettschichtholzträger mit geringer Keilzinkenqualität.

Bei den Trägern vom Typ I tritt aufgrund fehlender Keilzinkenverbindungen ausschließlich ein Holzversagen als Bruchursache auf, so daß die mit Hilfe dieser Versuchsreihe ermittelte Festigkeitsverteilung

der "echten" Festigkeitsverteilung des "Materials" Holz bei gegebener Lastanordnung, Trägergröße und Holzqualität entspricht.

Bei Versuchen mit "normalen" Brettschichtholzträgern (Typ II) hingegen tritt das Versagen in der Regel sowohl im Bereich von Ästen als auch im Bereich von Keilzinkenverbindungen auf. Die Festigkeitswerte (Mittelwert und 5%-Fraktile) dieses Trägertyps liegen unter den entsprechenden Werten der ersten Versuchsreihe, was darauf zurückzuführen ist, daß bei "normalen" Brettschichtholzträgern nur noch selten hohe Tragfähigkeiten erzielt werden können, weil die Träger oft vorzeitig aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen.

Die bei dieser Versuchsreihe ermittelten Festigkeitsverteilungen für die Träger mit Holz- und Keilzinkenversagen entsprechen nicht den "echten" Verteilungen dieser "Materialien", da man diese nur dann erhält, wenn alle Träger aufgrund derselben Versagensursache zu Bruch gehen. Bei den hier ermittelten Verteilungen handelt es sich um sogenannte bedingte Verteilungen: so entspricht z.B. die Verteilung der Träger mit Holzversagen der Verteilung dieses "Materials" unter der Bedingung, daß nicht vorher ein Keilzinkenversagen eingetreten ist.

Wertet man die Ergebnisse dieser zweiten Versuchsreihe getrennt für jede Versagensart aus, so zeigt sich, daß die Tragfähigkeit der Träger, bei denen ein Holzversagen auftritt, im Mittel geringer ist als bei den Trägern der Reihe I. Grund hierfür ist wiederum, daß ein Holzversagen nur noch bei den "schlechteren" Trägern auftritt, während die hohen Tragfähigkeiten der "guten" Träger nicht mehr ausgenutzt werden können.

Die Träger mit geringer Keilzinkenqualität (Typ III) weisen die geringsten Tragfähigkeiten auf, weil das Versagen in der überwiegenden Zahl aller Fälle von den Keilzinkenverbindungen ausgeht. Die ermittelte Festigkeitsverteilung für diese Träger entspricht somit annähernd der "echten" Verteilung des "Materials" Keilzinkenverbindung.

Die Tragfähigkeiten der Träger dieser Reihe, die aufgrund eines Holzversagens zu Bruch gehen, liegen deutlich unter denen der Reihe I, weil ein Holzversagen nur noch dann eintritt, wenn entweder eine geringe Holzfestigkeit bei gleichzeitig hoher Keilzinkenfestigkeit vorhanden ist, oder die Keilzinkenverbindungen weit außerhalb des hochbeanspruchten Bereiches liegen.

Diese Überlegungen veranschaulichen die bereits mehrfach erwähnte Tendenz, daß die Festigkeitseigenschaften des Endproduktes Brettschichtholz nicht nur von den absoluten Festigkeiten der beiden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung abhängig sind, sondern auch vom gegenseitigen Verhältnis dieser Tragfähigkeiten: je stärker sich die Festigkeitseigenschaften dieser beiden "Materialien" voneinander unterscheiden, umso häufiger tritt das schwächere "Material" als Versagensursache auf, und umso mehr nähert sich die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger der Tragfähigkeit dieses "Materials" an.

In dem im nächsten Abschnitt beschriebenen Modell wird gezeigt, daß die Tragfähigkeit des Endproduktes Brettschichtholz auf statistischem Wege berechnet werden kann, wenn die "echten" Festigkeitsverteilungen der beiden beeinflussenden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung bekannt sind.

Wie bereits angedeutet, kann die "echte" Festigkeitsverteilung des "Materials" Holz mit Hilfe von Brettschichtholzträgern ohne Keilzinkenverbindungen ermittelt werden. Will man jedoch die Biegefestigkeit dieser Träger in Abhängigkeit von der Trägergröße bestimmen, so steht man vor dem Problem, daß ab einer bestimmten Trägergröße die Brettlamellen aufgrund der begrenzten Brettlängen keilgezinkt werden müssen, und ein Versagen im Bereich einer Keilzinkenverbindung somit nicht mehr ausgeschlossen werden kann. Eine versuchsmäßige Bestimmung der geforderten "echten" Festigkeitsverteilung beschränkt sich somit auf Brettschichtholzträger mit kleinen Trägerabmessungen.

Im Falle des "Materials" Keilzinkenverbindung könnte die "echte" Festigkeitsverteilung nur bei sehr schlechten Keilzinkenverbindungen und gleichzeitig hoher Holzfestigkeit ermittelt werden, weil nur dann ein Holzversagen ausgeschlossen werden kann. Da aber mit steigender Holzqualität auch die Keilzinkenfestigkeit zunimmt, ist eine versuchsmäßige Bestimmung der geforderten Festigkeitsverteilung nicht möglich.

Im Rahmen des entwickelten Rechenmodells ([16], [20]) ist es jedoch möglich, sowohl die Keilzinkenfestigkeit als auch die Holzqualität "künstlich" zu verändern, so daß die gewünschte Versagensart "erzwungen" werden kann. Mit Hilfe dieses Rechenmodells ist es also möglich, die geforderten "echten" Festigkeitsverteilungen der beiden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung zu ermitteln (siehe hierzu auch *Kapitel 6*).

5.2 Bestimmung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz

Aus den bisherigen Ausführungen ist zu entnehmen, daß in einem Brettschichtholzträger nur dann ein Holzversagen eintritt, wenn nicht vorher ein Keilzinkenversagen auftritt und umgekehrt. Ein Brettschichtholzträger hat somit zwei Versagensarten zur Auswahl, und er wird sich naturgemäß für die mit der geringeren Tragfähigkeit entscheiden, weil er sich so früher der Belastung entziehen kann. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Brettschichtholzträger eine bestimmte Spannung σ "überlebt", entspricht somit der Wahrscheinlichkeit, daß weder ein Holzversagen noch ein Keilzinkenversagen eintritt.

Für diese Überlebenswahrscheinlichkeit gilt folgende Beziehung:

$$1 - H(\sigma) = (1 - F(\sigma)) \cdot (1 - G(\sigma)) \quad (5.1)$$

mit

$H(\sigma)$ = Wahrscheinlichkeit, daß der Brettschichtholzträger bei der Spannung σ versagt;

$F(\sigma)$ = Wahrscheinlichkeit, daß das "Material" Holz bei der Spannung σ versagt;

$G(\sigma)$ = Wahrscheinlichkeit, daß das "Material" Keilzinkenverbindung bei der Spannung σ versagt.

F, G und H werden als Verteilungsfunktionen der Biegefestigkeit der zugehörigen "Materialien" bezeichnet.

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Brettschichtholzträgers bei einer bestimmten Spannung σ ergibt sich somit zu:

$$H(\sigma) = F(\sigma) + G(\sigma) - F(\sigma) \cdot G(\sigma) \quad (5.2)$$

Im weiteren Verlauf der Berechnung wird die vereinfachende Annahme getroffen, daß die Verteilungen F und G der beiden "Materialien" jeweils mit einer Gauß-Normalverteilung mit den Mittelwerten m_1 und m_2 und den zugehörigen Variationskoeffizienten v_1 und v_2 beschrieben werden können.

Somit ergibt sich Gl(5.2) zu:

$$\begin{aligned}
 H(\sigma) = & \Phi\left(\frac{\sigma/m_1-1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma/m_2-1}{v_2}\right) \\
 & - \Phi\left(\frac{\sigma/m_1-1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\sigma/m_2-1}{v_2}\right), \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

wobei Φ der Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung mit dem Mittelwert 0 und der Standardabweichung 1 entspricht.

Für die charakteristische Biegefestigkeit σ_5 der Brettschichtholzträger (5%-Fraktile) gilt folgende Bedingung:

$$\begin{aligned}
 0,05 = & \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_1-1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_2-1}{v_2}\right) \\
 & - \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_1-1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_2-1}{v_2}\right). \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Zur Bestimmung des Mittelwertes der Brettschichtholzbiegefestigkeit, der ja bekanntlich dem Schwerpunkt der zugehörigen Verteilung entspricht, läßt sich keine so einfache Beziehung mehr angeben, weil die zugehörige Verteilung nicht zwangsläufig normalverteilt ist, sondern je nach Kennwerten der Verteilungen der beiden beeinflussenden "Materialien" unterschiedliches Aussehen annehmen kann.

Für den Medianwert σ_{50} , d.h. die Spannung, die in der Hälfte aller Fälle über- bzw. unterschritten wird, gilt hingegen folgende Beziehung:

$$\begin{aligned}
 0,5 = & \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1-1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_2-1}{v_2}\right) \\
 & - \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1-1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_2-1}{v_2}\right) \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

Dieser Wert, der bei einer Gaußschen Normalverteilung mit dem Mittelwert identisch ist, erlaubt eine Abschätzung des Mittelwertes der Brettschichtholzbiegefestigkeit, die umso genauer ist, je symmetrischer die zugehörige Verteilung ist.

Wie bereits mehrfach angedeutet, orientiert sich die Verteilung des Endproduktes Brettschichtholz sehr stark an der Verteilung des schwächeren "Materials". Aus der in *Gl(5.1)* angegebenen Beziehung für die Verteilungsfunktion des Brettschichtholzes geht hervor, daß ein Fraktilwert der Brettschichtholzverteilung höchstens den entsprechenden Wert der "schlechteren" Verteilung annehmen kann. Somit liegen sowohl die 5%-Fraktile σ_5 als auch der Medianwert σ_{50} der Brettschichtholzträger unter den entsprechenden Werten des schwächeren "Materials". In *Bild 5.1* ist diese Tendenz qualitativ dargestellt.

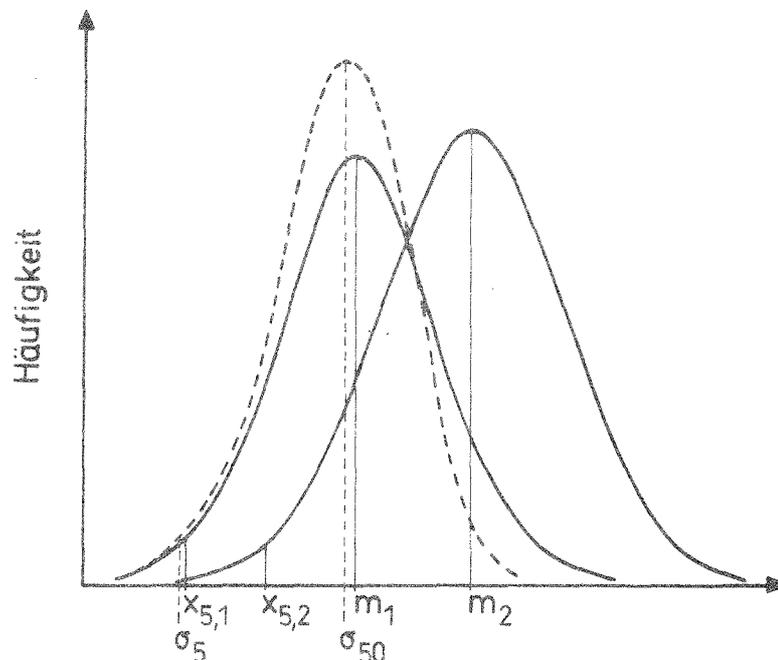


Bild 5.1: Verteilungen der Biegefestigkeit für das Endprodukt Brettschichtholz und die beiden "Materialien" 1 und 2

Daher ist es naheliegend, die o.a. charakteristischen Festigkeitswerte des Brettschichtholzes auf die entsprechenden Werte des schwächeren "Materials" zu beziehen.

Als schwächeres "Material" wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das "Material" bezeichnet, das die kleinere 5%-Fraktile $x_{5,1}$ aufweist, auch wenn der zugehörige Mittelwert m_1 über dem Mittelwert m_2 des anderen "Materials" liegen sollte.

Da die Verteilungsfunktion des Brettschichtholzes davon abhängig ist, wie eng die Verteilungen der beiden "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz beieinanderliegen und wie groß der Bereich ist, in dem sich diese beiden Verteilungen überschneiden, gilt es, das Verhältnis dieser beiden Verteilungen zueinander treffend zu beschreiben. Hierzu wurden im Rahmen dieser Arbeit das Verhältnis $x_{5,1}/x_{5,2}$ der beiden 5%-Fraktilen, das Verhältnis m_1/m_2 der beiden Mittelwerte sowie der Variationskoeffizient v_1 des schwächeren "Materials" als beschreibende Kenngrößen gewählt.

In Bild 5.2 und 5.3 ist der Verlauf der Verhältniswerte $\sigma_5/x_{5,1}$ und σ_{50}/m_1 in Abhängigkeit von diesen Kenngrößen für einen Variationskoeffizienten $v_1 = 0,20$ dargestellt (näheres siehe COLLING [13]).

Aus diesen Bildern wird deutlich, daß sich die 5%-Fraktile σ_5 und der Medianwert σ_{50} des Brettschichtholzes sehr stark an den entsprechenden Werten des schwächeren "Materials" orientieren, und daß sich die Verhältniswerte $\sigma_5/x_{5,1}$ und σ_{50}/m_1 für $x_{5,1}/x_{5,2} < 0,7$ praktisch zu 1 ergeben.

Weiterhin ist zu erkennen, daß der Verlauf der beiden charakteristischen Festigkeitswerte des Brettschichtholzes verhältnismäßig unempfindlich bezüglich der Eingangswerte $x_{5,1}/x_{5,2}$, m_1/m_2 und v_1 reagiert, d.h. Fehler oder Ungenauigkeiten bei der Bestimmung eines dieser Werte wirken sich nicht in gleichem Maße auf die 5%-Fraktile oder den Medianwert des Brettschichtholzes aus.

Mit Hilfe des hier beschriebenen "Mischverfahrens" ist es also möglich, die charakteristischen Festigkeitswerte des Endproduktes Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Kenngrößen der Festigkeitsverteilungen der beiden beeinflussenden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung zu bestimmen.

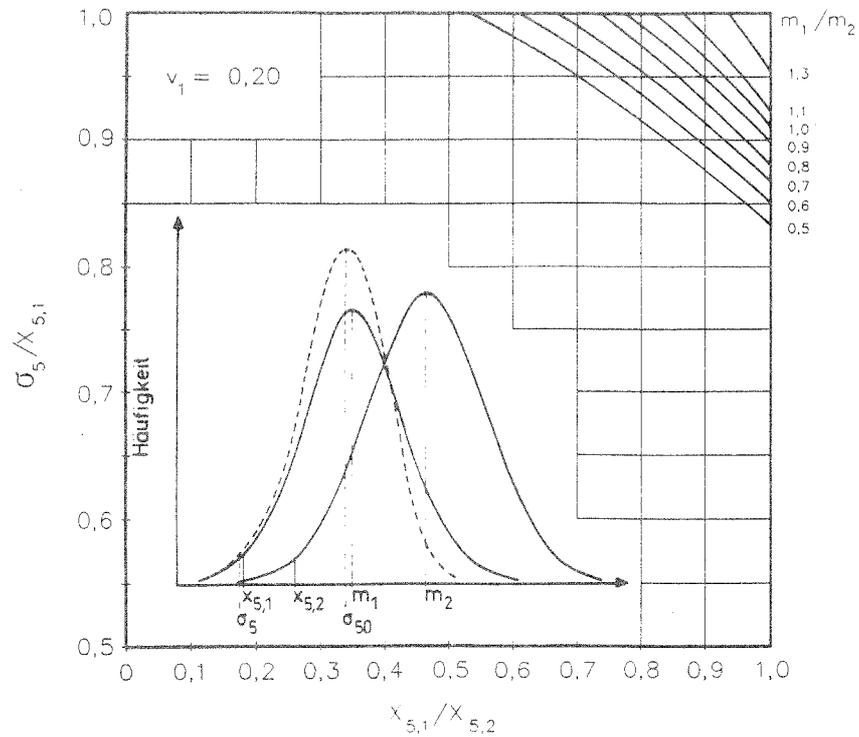


Bild 5.2: Brettschichtholz - 5%-Fraktile σ_5 (bezogen auf die 5%-Fraktile $x_{5,1}$ des schwächeren "Materials") in Abhängigkeit von $x_{5,1}/x_{5,2}$ und m_1/m_2 ; $v_1 = 0,20$

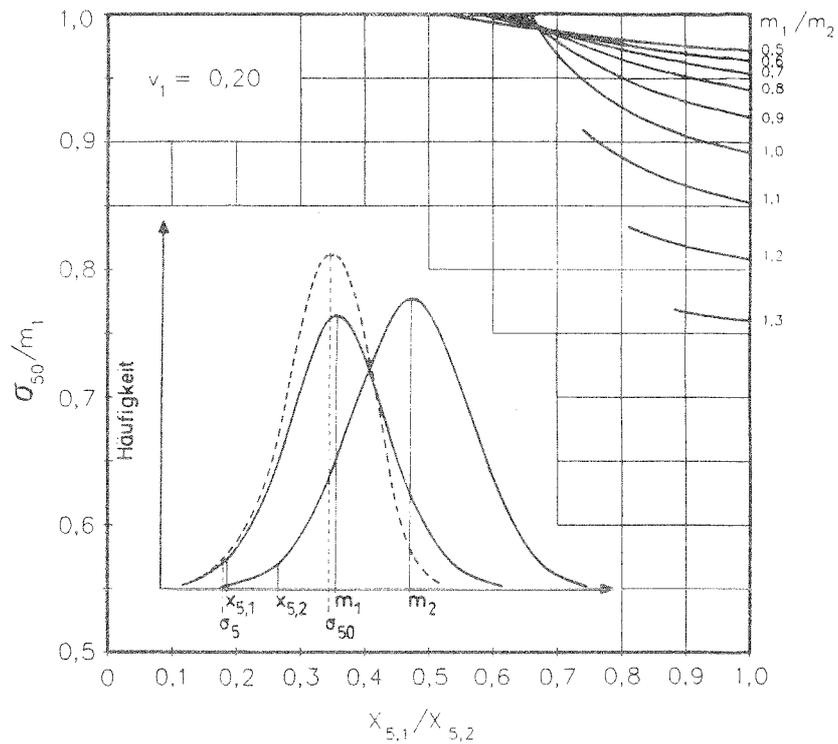


Bild 5.3: Brettschichtholz - Medianwert σ_{50} (bezogen auf den Mittelwert m_1 des schwächeren "Materials") in Abhängigkeit von $x_{5,1}/x_{5,2}$ und m_1/m_2 ; $v_1 = 0,20$

5.3 Bestimmung der Auftretenshäufigkeit einer bestimmten Versagensart

In Analogie zur Versagenswahrscheinlichkeit im Rahmen eines probabilistischen Sicherheitskonzeptes ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit der das Versagen in einem der beiden "Materialien" eintritt. So ergibt sich nach STECK [48] die Wahrscheinlichkeit P_2 eines Versagens im besseren "Material" zu:

$$P_2 = \Phi \left(\frac{m_1 - m_2}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} \right) \quad (5.6)$$

Hierin bedeuten

- Φ = Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung,
- m_1, s_1 = Mittelwert und Standardabweichung des "schlechteren" "Materials",
- m_2, s_2 = Mittelwert und Standardabweichung des "besseren" "Materials".

5.4 Zahlenbeispiel

Anhand eines Zahlenbeispiels soll die Handhabung des hier vorgestellten Modells veranschaulicht werden.

Gegeben seien die normalverteilten echten Verteilungsfunktionen der Biegefestigkeit der beiden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung (KZV) mit den Mittelwerten $m_{\text{Holz}} = 40 \text{ N/mm}^2$ und $m_{\text{KZV}} = 35 \text{ N/mm}^2$ und den zugehörigen Standardabweichungen $s_{\text{Holz}} = 6,8 \text{ N/mm}^2$ und $s_{\text{KZV}} = 7 \text{ N/mm}^2$. Die zugehörigen 5%-Fraktile ergeben sich zu:

$$x_{5,\text{Holz}} = 40 \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{6,8}{40} \right) = 28,8 \text{ N/mm}^2$$

$$x_{5,\text{KZV}} = 35 \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{7}{35} \right) = 23,5 \text{ N/mm}^2$$

Als "schlechteres" "Material" mit der kleineren 5%-Fraktile erweist sich in diesem Beispiel die Keilzinkenverbindung, d.h. die Träger mit Keilzinkenversagen. Die Eingangswerte für das Modell ergeben sich somit zu:

$$x_{5,1}/x_{5,2} = 23,5/28,8 = 0,82$$

$$m_1/m_2 = 35/40 = 0,88$$

$$v_1 = 7/35 = 0,20 \quad .$$

Die erwartete 5%-Fraktile und der Medianwert der Brettschichtholzträger ergibt sich dann mit Hilfe von *Bild 5.2* und *Bild 5.3* zu:

$$\sigma_5 = 0,98 \cdot 23,5 = 23,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{50} = 0,945 \cdot 35 = 33,1 \text{ N/mm}^2 \quad .$$

Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Holzversagens ergibt sich nach *Gl(5.6)* zu:

$$\Phi\left(\frac{35 - 40}{\sqrt{6,8^2 + 7^2}}\right) = \Phi(-0,512) = 0,30 \quad ,$$

d.h. in etwa 1/3 aller Fälle wird das Versagen der in diesem Beispiel zusammengesetzten Brettschichtholzträger im Bereich eines Holzfehlers erwartet, während die restlichen Träger aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen.

Dieses Beispiel zeigt deutlich, daß sich das Endprodukt "Brettschichtholz" sehr stark am schwächeren "Material" orientiert, auch wenn sich die Festigkeitseigenschaften der beiden beeinflussenden "Materialien" nicht zu stark voneinander unterscheiden.

6 Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz

Die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den festigkeitsbestimmenden Einflußgrößen stellt ein vielschichtiges (mehrdimensionales) Problem dar, bei dem es nur sehr schwer möglich ist, den Einfluß eines einzelnen Parameters rechnerisch zu erfassen. So ist z.B. die Holzfestigkeit enger mit den Holzeigenschaften korreliert als die Keilzinkenfestigkeit, so daß das Tragverhalten der Brettschichtholzträger in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften nicht mit einer einzigen allgemeingültigen Beziehung beschrieben werden kann.

Dieses Tragverhalten hängt vielmehr zusätzlich vom Verhältnis der Festigkeitseigenschaften der beiden "Materialien" zueinander ab: im Falle von "schlechten" Keilzinkenverbindungen wird sich das Endprodukt Brettschichtholz wie das "Material" Keilzinkenverbindung verhalten, während sich bei normalen Brettschichtholzträgern ein gemischtes Tragverhalten einstellen wird.

Die Aufteilung des Endproduktes Brettschichtholz in seine beiden festigkeitsbestimmenden "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz ermöglicht es, das ganze Problem in zwei kleinere Problembereiche aufzuteilen, innerhalb derer der Einfluß jedes einzelnen Parameters auf die Tragfähigkeit des jeweiligen "Materials" eindeutig erfaßt werden kann. Die Auswirkungen eines Einflußparameters auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern kann dann mit Hilfe des im vorigen Kapitel vorgestellten "Mischverfahrens" abgeschätzt werden.

Im Rahmen dieses Kapitels wird das Tragverhalten der beiden "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz in Abhängigkeit von den jeweils beeinflussenden Größen mit Hilfe des im Rahmen dieser Forschungsreihe entwickelten Rechenmodells untersucht.

Der Großteil der im folgenden beschriebenen Simulationsrechnungen wurde mit Hilfe des in *Bild 6.1* dargestellten Standardträgers durchgeführt, und Änderungen bezüglich der Trägergröße oder der Belastungsart wurden auf diesen Träger bezogen. Dieser Bezugsträger entspricht den Anforderungen nach ISO 8375 [4].

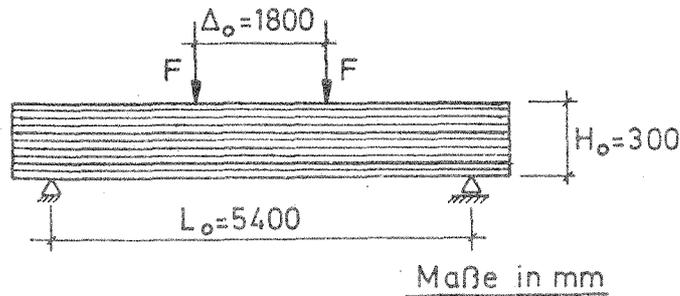


Bild 6.1: Standardträger

Neben den Trägerabmessungen und der Belastungsart war es für die Simulationsrechnungen noch erforderlich, eine Verteilung für die Länge der eingebauten Bretter festzulegen, mit deren Hilfe die Keilzinkenverbindungen über den Träger verteilt werden können.

Wie in [20] beschrieben, ist es nicht möglich, eine für alle Leimbauwerke repräsentative Verteilung der Brettlängen anzugeben. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine mittlere "standardisierte Brettlänge" von $BL_0 = 4$ m mit einer Standardabweichung von 0,4 m gewählt. Diese Wahl erfolgte mit Blickrichtung auf eine maschinelle Holzsortierung, bei der hauptsächlich ganze Bretter verarbeitet werden.

Bei der Zuordnung der Keilzinkenverbindungen wurde die in den Erläuterungen zur *DIN 1052, Ausgabe 10.69* gemachte Empfehlung, daß die Abstände zwischen den Keilzinkenverbindungen benachbarter Lamellen mindestens 300 mm betragen sollten, nicht berücksichtigt. Untersuchungen von COLLING [13] über den Einfluß des gegenseitigen Abstandes von Keilzinkenverbindungen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern zeigten nämlich, daß weniger die Lage der Keilzinkenverbindungen von Bedeutung ist, als vielmehr die Frage ob und wieviel Keilzinkenverbindungen in den hochbeanspruchten Bereichen auftreten.

Daher wurden die Keilzinkenverbindungen mit Hilfe der gewählten Brettlängenverteilung nach zufälligen Gesichtspunkten über den Träger verteilt. Bei den hier beschriebenen Simulationsrechnungen sind somit alle Möglichkeiten bzgl. der Lage der Äste und der Keilzinkenverbindungen enthalten.

Das Tragverhalten der beiden beeinflussenden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung in Abhängigkeit von den jeweiligen festigkeitsrelevanten Einflußgrößen wurde mit Hilfe einer Vielzahl von Simulationsrechnungen untersucht: für jede Variation der Holzgüte, Trägerabmessung, Keilzinkenfestigkeit usw. wurden 2000 Träger simuliert und deren Biegefestigkeit berechnet. Hierzu wurde als rechnerische Biegefestigkeit die effektive Biegerandspannung $ef\sigma_B$ nach folgender Gleichung zum Zeitpunkt des Versagens gewählt.

$$ef\sigma_B = \frac{M_u}{efEI} \cdot E_1 y_1 \quad , \quad (6.1)$$

mit

$$\begin{aligned} M_u &= \text{Moment zum Zeitpunkt des Versagens,} \\ E_1 &= \text{Längs - Elastizitätsmodul der äußersten Zuglamelle,} \\ y_1 &= \text{Abstand des elastischen Schwerpunktes vom Biegezugrand,} \\ efEI &= \text{effektive Biegesteifigkeit} \\ &= \sum E_i I_i + \sum E_i A_i a_i^2 \\ \sum E_i I_i &= \text{Summe der Biegesteifigkeiten der Einzellamellen,} \\ \sum E_i A_i a_i^2 &= \text{Summe der Steiner-Anteile der Einzellamellen.} \end{aligned}$$

Bei den Simulationsrechnungen zeigte sich, daß sich die Form der Festigkeitsverteilung je nach Trägergröße, Brettlänge, Belastungsart und Holzeigenschaften veränderte, so daß es nicht immer möglich war, die Ergebnisse mit Hilfe einer Gauß'schen Normalverteilung zu beschreiben. So wiesen einige Verteilungen eine positive Schiefe, d.h. einen verlängerten Arm in Richtung der hohen Festigkeitswerte auf, was dazu führte, daß die Abschätzung der 5%-Fraktile unter Annahme einer Normalverteilung zu kleine Werte lieferte. In diesen Fällen lieferte eine Log - Normalverteilung bessere Werte für die 5%-Fraktile, wobei jedoch auch diese Verteilung nicht in der Lage war, alle Simulationsergebnisse treffend zu beschreiben.

Da es aber von großer Bedeutung ist, die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der beiden beeinflussenden "Materialien" möglichst genau zu kennen, wurde im Rahmen dieser Arbeit darauf verzichtet, die gewünschte 5%-Fraktile mit Hilfe einer theoretischen Verteilung abzuschätzen. Vielmehr wurden die jeweils 2000 Simulationsergebnisse in aufsteigender Reihenfolge geordnet und der 101. Wert als Wert der 5%-Fraktile gewählt. Somit war gewährleistet, daß, unabhängig von der

Form der Verteilung, genau der Wert erfaßt wurde, der in 5% aller Fälle unterschritten wird ($100/2000 = 0,05$).

Da in das theoretische Modell neben der charakteristischen und der mittleren Biegefestigkeit auch noch der Variationskoeffizient des "schwächeren" "Materials" eingeht und weiterhin vorausgesetzt wird, daß die Biegefestigkeiten der beiden "Materialien" normalverteilt sind, wird durch die abgezählte 5%-Fraktile x_5 und den unverändert übernommenen Mittelwert m eine Normalverteilung "hineingezwungen", deren Variationskoeffizient sich zu

$$v = \frac{1 - x_5/m}{1,645} \quad (6.2)$$

ergibt.

Mit Hilfe dieser Näherung werden die wesentlichen Kenngrößen der Verteilung - 5%-Fraktile und Mittelwert - genau erfaßt, während der Verlauf zwischen diesen beiden Werten zumindest näherungsweise beschrieben werden kann.

Da, wie in *Kapitel 5* bereits angedeutet, das statistische "Mischverfahren" relativ unempfindlich auf fehlerhafte Eingangsdaten reagiert, fällt der Fehler, der durch diese angenäherte Normalverteilung entsteht, nicht zu sehr ins Gewicht, zumal die für die Bemessung maßgebende 5%-Fraktile genau bestimmt wurde.

6.1 Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

6.1.1 Allgemeines

Ziel dieses Abschnittes ist es, die Tragfähigkeit des "Materials" Keilzinkenverbindung, d.h. der Brettschichtholzträger mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von folgenden Einflußgrößen, zu beschreiben:

- Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen,
- Auftretenshäufigkeit der Keilzinkenverbindungen,
- Trägergröße und Belastungsart (Volumeneffekt).

Hierbei ist der Einfluß der Brettlänge identisch mit dem Einfluß der Trägergröße, weil z.B. eine Halbierung der Brettlängen genauso eine Verdopplung der Auftretenshäufigkeit einer Keilzinkenverbindung bewirkt wie eine Verdopplung der Trägerlänge. Daher wird der Einfluß der Brettlänge im Abschnitt über den Einfluß der Trägergröße mitbehandelt.

Zur Beschreibung des Tragverhaltens des Standardträgers in Abhängigkeit von der Keilzinkenzugfestigkeit wurden folgende Beziehungen gewählt:

$$x_{5,KZV}^0 = k_{0,5,KZV} \cdot f_{Z,5,KZV} \quad (6.3a)$$

und

$$m_{KZV}^0 = k_{0,m,KZV} \cdot f_{Z,m,KZV} \quad (6.3b)$$

Hierbei sind

$x_{5,KZV}^0$ und m_{KZV}^0 = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers,

$f_{Z,5,KZV}$ und $f_{Z,m,KZV}$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Keilzinkenzugfestigkeit,

$k_{0,5,KZV}$ und $k_{0,m,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung der Biegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen,

Unter der Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung ist hierbei die Festigkeit zu verstehen, die unter Aufbringung eines ebenen Verformungszustandes ermittelt wurde, weil diese Art der Beanspruchung der eines Brettabschnittes in einem Brettschichtholzträger am nächsten kommt (siehe hierzu auch *Abschnitt 3.1*).

Das Tragverhalten eines Trägers mit beliebiger Trägergröße und Belastungsanordnung kann mit folgenden Beziehungen beschrieben werden:

$$x_{5,KZV} = k_{L,5,KZV} \cdot k_{H,5,KZV} \cdot k_{F,5,KZV} \cdot x_{5,KZV}^0 \quad (6.4a)$$

und

$$m_{KZV} = k_{L,m,KZV} \cdot k_{H,m,KZV} \cdot k_{F,m,KZV} \cdot m_{KZV}^0 \quad (6.4b)$$

Hierbei sind

$x_{5,KZV}$ und m_{KZV} = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen,

$x_{5,KZV}^0$ und m_{KZV}^0 = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers (mit Keilzinkenversagen),

$k_{L,5,KZV}$ und $k_{L,m,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge,

$k_{H,5,KZV}$ und $k_{H,m,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe,

$k_{F,5,KZV}$ und $k_{F,m,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart.

Bei den in *Abschnitt 3.1* erwähnten Zugversuchen von *Glos* konnte kein signifikanter Einfluß der Brettbreite auf die Zugfestigkeit der geprüften Brettabschnitte festgestellt werden, so daß in den Regressionsgleichungen zur Beschreibung des Tragverhaltens dieser Brettabschnitte die Breite nicht als Variable auftritt. Da die hier durchgeführten Simulationsrechnungen auf diesen Regressionsgleichungen basieren, konnte im Rahmen dieser Arbeit ein Einfluß der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern nicht untersucht werden. Auch liegen nur sehr wenige systematische Untersuchungen über den Einfluß der Trägerbreite vor, so daß die Frage eines möglichen Breiteneffektes nicht zuletzt wegen der z.T. sehr unterschiedlichen Ergebnisse noch nicht geklärt ist.

Bei den Simulationsrechnungen wurde für die in diesem Abschnitt berechneten Träger mit Keilzinkenversagen ein reines Spröbruchkriterium verwendet. Die Tragfähigkeit dieser Träger wurde somit als erschöpft angesehen, sobald in der ersten Keilzinkenverbindung die Zugfestigkeit überschritten wurde.

Die vereinfachte Annahme eines reinen Spröbruchverhaltens des "Materials" Keilzinkenverbindung ermöglicht es, die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen unabhängig von den Holzeigenschaften der Brettlamellen zu beschreiben.

Diese Vereinfachung wirkt sich bei Trägern mit "üblichen" Werten für die Holz- und Keilzinkenfestigkeiten kaum aus und führt nur bei einer im Vergleich zur Holzfestigkeit deutlich geringeren Keilzinkenfestigkeit zu einer Unterschätzung der Tragfähigkeit, weil eine mögliche Laststeigerung nicht berücksichtigt wird. Dieser Fehler liegt jedoch auf der sicheren Seite.

6.1.2 Einfluß der Keilzinkenzugfestigkeit

In diesem Abschnitt wird das Tragverhalten des gewählten Bezugsträgers in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen untersucht.

Um ein Keilzinkenversagen zu erzwingen, wurde eine mittlere Keilzinkenzugfestigkeit von 10 N/mm^2 und eine sehr hohe Holzqualität gewählt (Lamellen-Elastizitätsmodul $\geq 15000 \text{ N/mm}^2$ und $\text{KAR} \leq 0,2$).

Der Verlauf der beschreibenden Faktoren $k_{0,5,KZV}$ und $k_{0,m,KZV}$ ist für verschiedene Werte des Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit in *Bild 6.2a* und *Bild 6.2b* dargestellt.

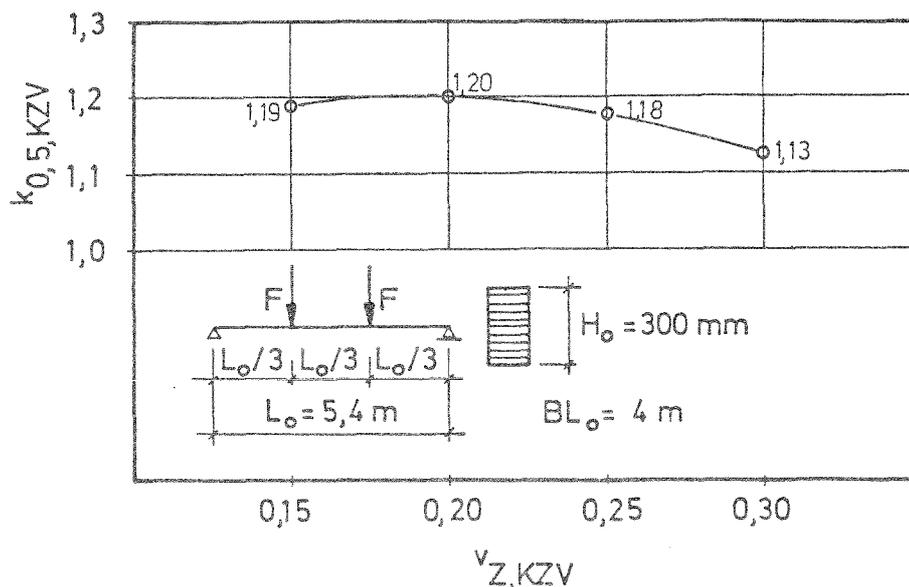


Bild 6.2a: Faktor $k_{0,5,KZV}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit

Aus *Bild 6.2a* ist zu erkennen, daß die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen für $0,15 < v_{Z,KZV} < 0,25$ nahezu konstant ist und etwa 20% über der charakteristischen Keilzinkenzugfestigkeit liegt.

Die mittlere Biegefestigkeit hingegen nimmt mit steigendem Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ stetig ab und liegt für $0,15 < v_{Z,KZV} < 0,25$ etwa 25% über der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit (*Bild 6.2b*).

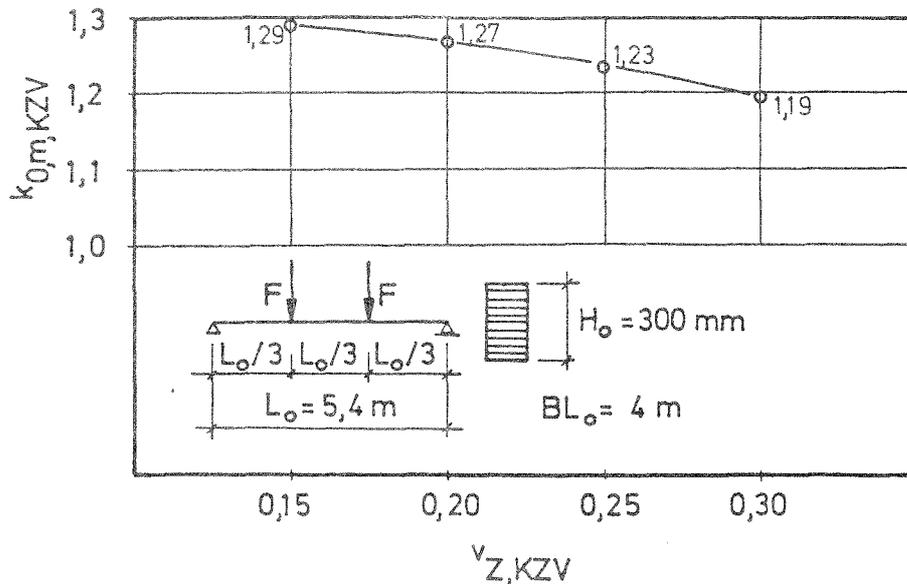


Bild 6.2b: Faktor $k_{0,m,KZV}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit

6.1.3 Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart

1939 entwickelte WEIBULL [49] eine Theorie über das Festigkeitsverhalten von homogenen, isotropen Werkstoffen, die ein sprödes Bruchverhalten aufweisen. Diese Theorie ermöglicht es, die Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom beanspruchten Volumen zu beschreiben und bildete auch die Grundlage zur Herleitung des in *Abschnitt 2.4* beschriebenen Höheneffektes von BOHANNAN [7]. Die Gleichungen, die sich mit Hilfe dieser Theorie zur Beschreibung des Volumeneffektes ergeben, haben sich z.B. in den USA und in Kanada durchgesetzt und haben auch Eingang in den Entwurf zum EUROCODE 5 [3] gefunden. Aus

diesem Grunde werden ähnliche Gleichungen auch im Rahmen dieser Arbeit dazu verwendet, die Simulationsergebnisse zu beschreiben.

6.1.3.1 Einfluß der Trägerlänge

Wird von den getroffenen Annahmen bzgl. Trägerlänge und/oder Brettlänge des Bezugsträgers abgewichen, so wirkt sich dies auf die Tragfähigkeit dieser Träger aus. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei kleineren Brettlängen und größeren Trägerlängen häufiger Keilzinkenverbindungen in den hochbeanspruchten Bereichen auftreten.

Der Längeneffekt für das "Material" Keilzinkenverbindung reduziert sich also auf einen Auftretenshäufigkeitseffekt der Keilzinkenverbindungen, zu dessen Beschreibung im Rahmen dieser Arbeit die Kennzahl $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$ verwendet wird. Hierbei entsprechen L_0 bzw. BL_0 der Träger- bzw. Brettlänge des Bezugsträgers und L bzw. BL der Träger- bzw. Brettlänge eines beliebigen Trägers.

Mit Hilfe von *Weibulls* Theorie ergibt sich folgende Beziehung zur Beschreibung des Längeneffektes:

$$k_L = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-1/k_{Wei}} \quad (6.5)$$

wobei k_{Wei} einer der Kenngrößen der Weibull-Verteilung entspricht.

Für den Fall eines homogenen, isotropen Materials kann der Exponent k_{Wei} nach COLLING [10] in guter Näherung zu

$$k_{Wei} \approx \frac{1,15}{v} \quad (6.6)$$

bestimmt werden, wobei v dem Variationskoeffizienten der Festigkeitsverteilung des betrachteten Materials entspricht.

Bei den Simulationsrechnungen zeigte sich jedoch, daß sowohl die Form der Verteilung als auch der zugehörige Variationskoeffizient mit der Auftretenshäufigkeit der Keilzinkenverbindungen veränderlich ist, so daß der Längeneffekt nicht mit Hilfe der Gleichungen *Gl(6.5)* und *Gl(6.6)* beschrieben werden konnte.

Zur Beschreibung der Simulationsergebnisse wurden daher folgende, geringfügig umgewandelte Gleichungen verwendet:

$$k_{L,5,KZV} = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,5,KZV}} \quad (6.7a)$$

und

$$k_{L,m,KZV} = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,m,KZV}} \quad (6.7b)$$

wobei die Exponenten β_L zwar weiterhin von den Variationskoeffizienten der Verteilungen abhängig sind, jedoch nicht mehr mit Hilfe von Gl(6.6) bestimmt werden können.

Bei den in diesem Abschnitt beschriebenen Simulationen wurden nur die Trägerlängen bzw. die Brettlängen variiert, während die Trägerhöhe und die Belastungsart des Standardträgers beibehalten wurden.

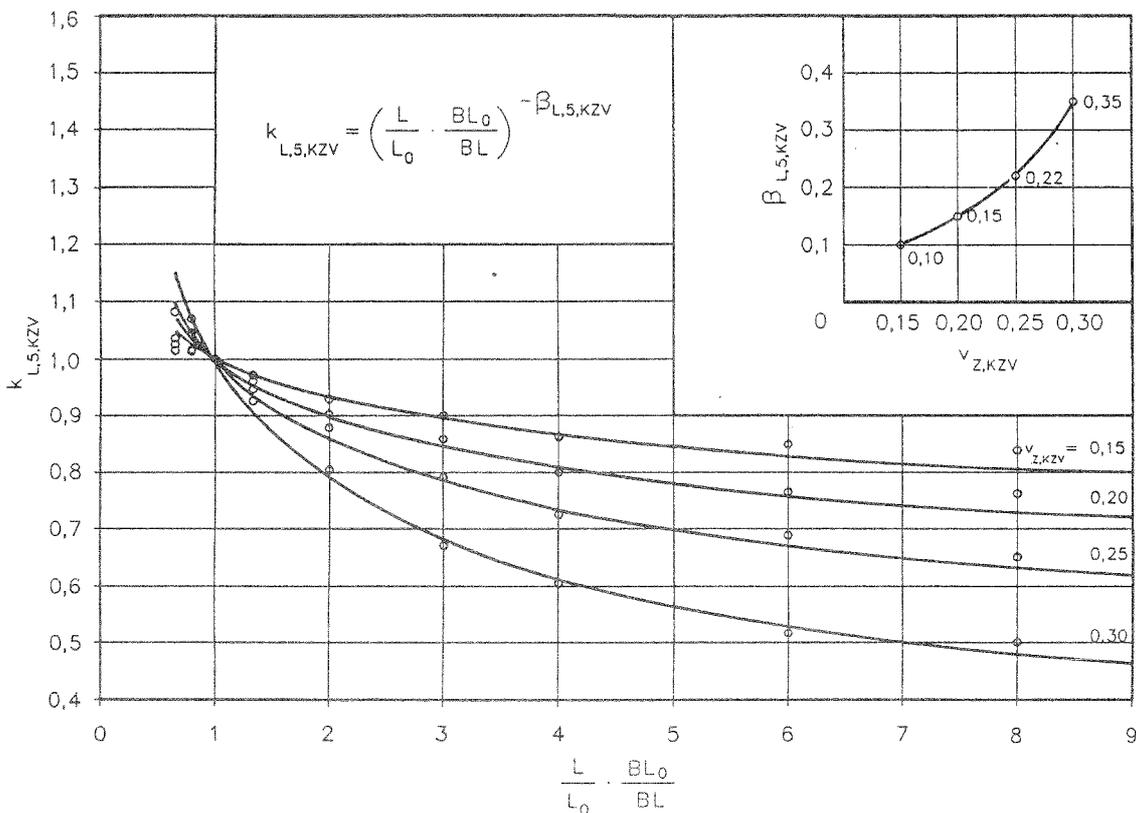


Bild 6.3a: Einfluß der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

In **Bild 6.3a** und **Bild 6.3b** ist der Verlauf der Faktoren $k_{L,5,KZV}$ und $k_{L,m,KZV}$ für verschiedene Werte des Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit dargestellt.

Bei der Anpassung von Gl(6.7) an die Simulationsergebnisse wurde darauf geachtet, daß für die untersuchten Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ eine Beschreibung des Längeneffektes mit einigermaßen runden Werten für die zugehörigen Exponenten β_L möglich war.

Die so angepaßten Kurven stellen daher nicht in jedem Fall die beste Anpassung an die Simulationsergebnisse dar; aufgrund der bereits erwähnten verhältnismäßig geringen Empfindlichkeit des "Mischverfahrens" bzgl. der Eingangswerte erscheint diese Vereinfachung jedoch gerechtfertigt.

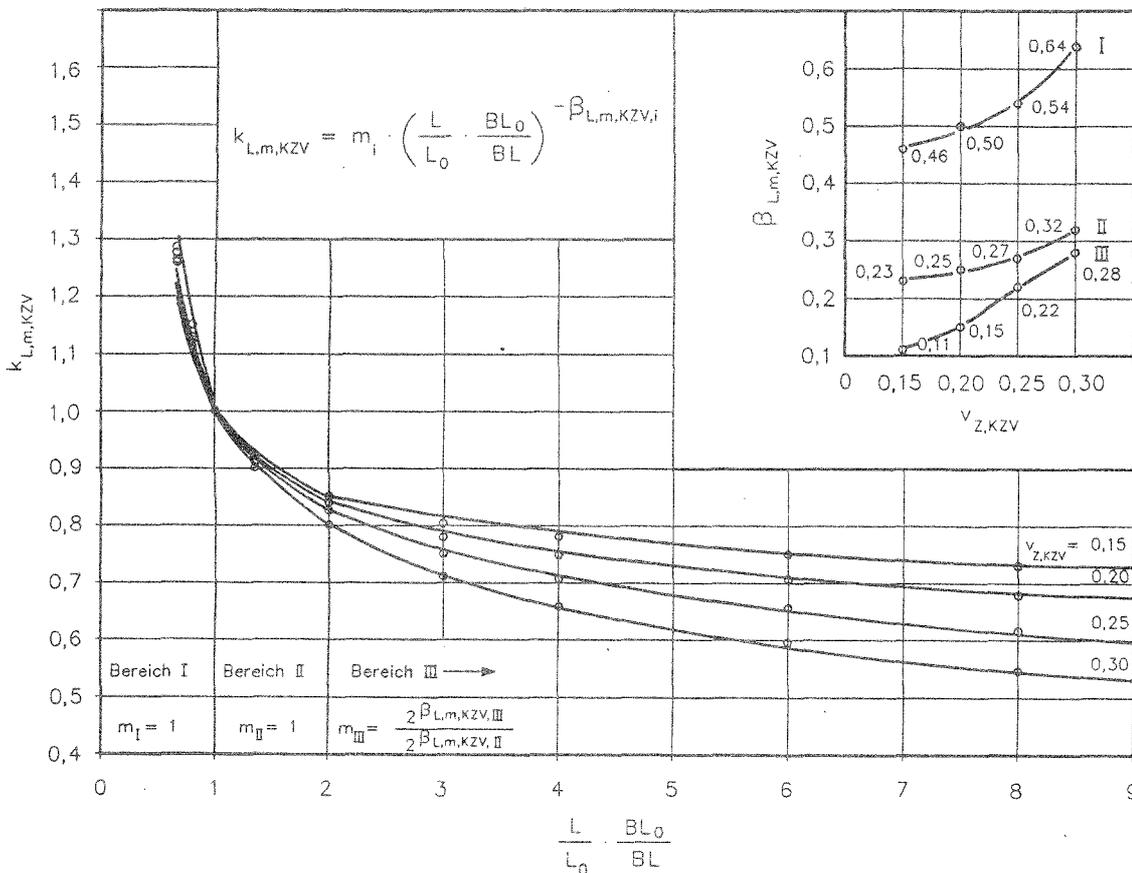


Bild 6.3b: Einfluß der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

Für den Fall der 5%-Fraktile der Biegefestigkeit ist aus *Bild 6.3a* ersichtlich, daß die angepaßten Kurven die Simulationsergebnisse über nahezu den gesamten Bereich gut beschreiben, und daß nur für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) < 0,8$ größere Abweichungen auftreten können.

Im Falle der mittleren Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen ist für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) < 2$ aus *Bild 6.3b* ein überproportionaler Anstieg des Faktors $k_{L,m,KZV}$ zu erkennen, so daß eine befriedigende Beschreibung dieses Verlaufes mit einer einzigen Gleichung nicht mehr möglich war.

Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, daß bei kleinen Trägertlängen und großen Brettlängen die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Keilzinkenverbindung im hochbeanspruchten Bereich gering ist, so daß auch überproportional hohe Festigkeitswerte auftreten können. Hierdurch erhält die Verteilung eine starke positive Schiefe, was sich eher auf den Mittelwert dieser Verteilung als auf die zugehörige 5%-Fraktile auswirkt.

Deshalb wurde das "Längenspektrum" in drei Bereiche unterteilt, für die folgende erweiterte Beziehung gilt:

$$k_{L,m,KZV} = m_i \cdot \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,m,KZV,i}} \quad (6.7c)$$

Hierbei entspricht $\beta_{L,m,KZV,i}$ dem Exponenten des i -ten Bereiches und m_i einem Korrekturbeiwert, der sich für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \leq 2$ zu 1 ergibt.

Die Korrekturbeiwerte m_i sowie der Verlauf der Exponenten $\beta_{L,m,KZV,i}$ sind in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit ebenfalls in *Bild 6.3b* dargestellt.

Ein Vergleich mit *Bild 6.3a* zeigt, daß für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \geq 2$ und für $0,15 \leq v_{Z,KZV} \leq 0,25$ die Exponenten β_L für die 5%-Fraktile und den Mittelwert nahezu identisch sind. Nur bei sehr großen und sehr kleinen Variationskoeffizienten macht sich der unterschiedliche Einfluß der Schiefe der Verteilungen auf die beiden Festigkeitswerte bemerkbar.

6.1.3.2 Einfluß der Trägerhöhe

Für die Faktoren $k_{H,5,KZV}$ und $k_{H,m,KZV}$ zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen ergeben sich in Anlehnung an Gl(6.7) folgende Beziehungen:

$$k_{H,5,KZV} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,5,KZV}} \quad (6.8a)$$

und

$$k_{H,m,KZV} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,m,KZV}} \quad (6.8b)$$

wobei H_0 der Höhe des Bezugsträgers ($H_0 = 300$ mm) entspricht und H der Höhe eines beliebigen Trägers.

Bei den im folgenden beschriebenen Simulationsrechnungen wurde der Einfluß der Trägerhöhe ebenfalls in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit untersucht.

Um zu überprüfen, ob sich je nach Trägerlänge ein unterschiedlicher Höheneffekt einstellt, wurde das Tragverhalten von vier verschiedenen Trägern mit unterschiedlichen Werten für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$ untersucht. Die Belastung der Träger war bei allen Trägern gleich und entsprach der des Bezugsträgers (Belastung in den Drittelpunkten).

In *Bild 6.4* ist der Verlauf der 5%-Fraktile der Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Trägerhöhe und dem Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit dargestellt. In diesem Bild sind für jede Kombination von H/H_0 und $v_{Z,KZV}$ eine Gruppe von 4 Punkten zu erkennen. Diese Punkte stellen jeweils die Simulationsergebnisse der Träger mit $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67/1/2$ und $= 4$ dar.

Aus *Bild 6.4* geht hervor, daß für einen gegebenen Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit der Höheneinfluß in ausreichender Näherung mit einer einzigen Kurve, d.h. unabhängig vom Wert $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$, beschrieben werden kann. Der Verlauf der in Anlehnung an *Abschnitt 6.1.3.1* angepaßten Exponenten $\beta_{H,5,KZV}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ ist ebenfalls in *Bild 6.4* dargestellt.

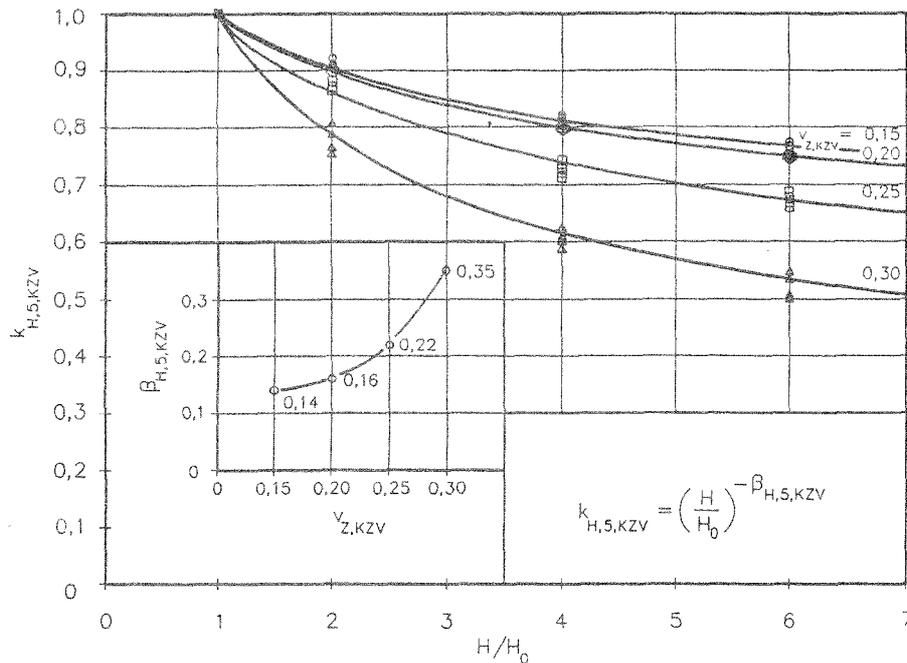


Bild 6.4: Einfluß der Trägerhöhe auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67/1/2$ und $= 4$

Ein Vergleich mit *Bild 6.3a* zeigt, daß für $v_{Z,KZV} > 0,2$ der Exponent $\beta_{H,5,KZV}$ zur Beschreibung des Höheneffektes mit dem Exponenten $\beta_{L,5,KZV}$ zur Beschreibung des Längeneffektes übereinstimmt. Für $v_{Z,KZV} \leq 0,2$ hingegen ist mit zunehmender Trägerhöhe eine stärkere Abnahme der 5%-Fraktile zu erkennen als mit zunehmender Trägerlänge.

Für den Fall des Einflusses der Trägerhöhe auf die mittlere Biegefestigkeit zeigte sich, daß die Simulationsergebnisse für einen gegebenen Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit nicht mehr zufriedenstellend mit einer einzigen Kurve für alle Werte von $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$ beschrieben werden können. Daher wurde zur Beschreibung des Höheneffektes wie beim Längeneffekt das "Längenspektrum" in drei Bereiche unterteilt. In *Abschnitt 6.3* sind die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen zusammengestellt. Für weitere Einzelheiten sei an dieser Stelle auf [13] verwiesen.

6.1.3.3 Einfluß der Belastungsart

Nach *Weibulls* Sprödbbruchtheorie ist die Tragfähigkeit eines Materials von der Größe des beanspruchten Volumens abhängig, wobei hierunter nicht nur die absolute Trägergröße zu verstehen ist. So besitzt z.B. ein Träger mit Einzellast in Feldmitte (bei gleicher Trägergröße) eine höhere rechnerische Biegefestigkeit als ein Träger mit Drittelpunktbelastung, weil beim letztgenannten Träger ein größerer Bereich einer hohen Beanspruchung ausgesetzt ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluß der Belastungsart auf die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen durch Variation des Lastabstandes Δ untersucht. Wie im vorigen Abschnitt erfolgte dies mit vier verschiedenen Werten für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$, während die Trägerhöhe mit $H_0 = 300$ mm konstant gehalten wurde.

Für den Fall einer Belastung mit zwei Einzellasten kann der Einfluß der Belastungsart nach COLLING [10] mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$k_{F,5,KZV} = \left(\frac{\beta_{F,5,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,5,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,KZV}} \quad (6.9a)$$

und

$$k_{F,m,KZV} = \left(\frac{\beta_{F,m,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,m,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,KZV}} \quad (6.9b)$$

Hierbei entspricht der Wert $1/3$ dem Verhältnis des Lastabstandes Δ_0 zur Trägerlänge L_0 des Bezugsträgers (Belastung in den Drittelpunkten).

In *Bild 6.5* ist der Verlauf der 5%-Fraktile der Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis Δ/L und dem Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ dargestellt. Die für jede Kombination von Δ/L und $v_{Z,KZV}$ dargestellten Punkte entsprechen wiederum den Simulationsergebnissen der Träger mit $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67/1/2$ und $= 4$.

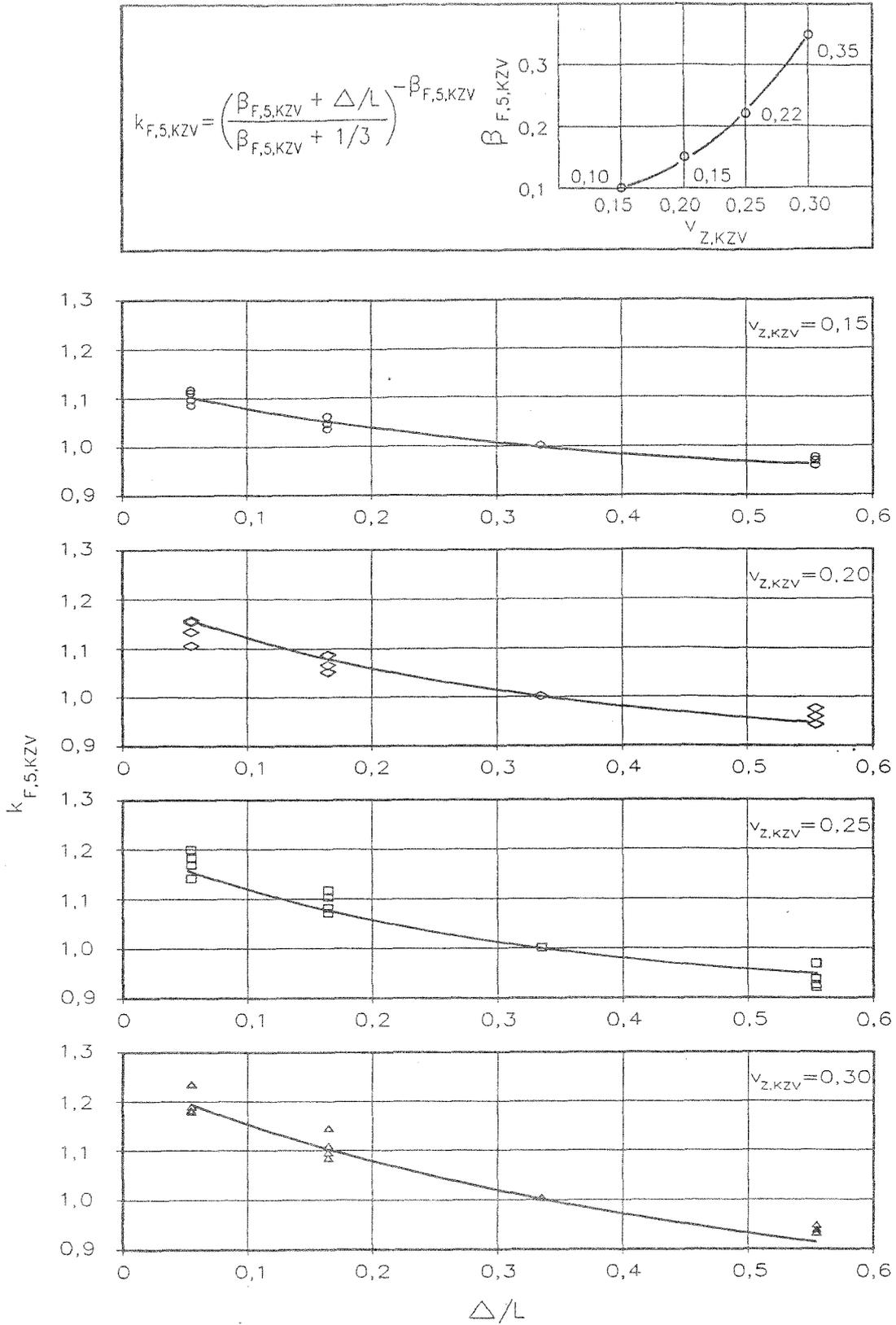


Bild 6.5: Einfluß der Belastungsart auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67/1/2$ und $= 4$

Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß der Einfluß der Belastungsart für einen gegebenen Wert $v_{Z,KZV}$ des Variationskoeffizienten der Keilzinkenzugfestigkeit unabhängig vom Wert $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$ mit einer Kurve ausreichend genau beschrieben werden kann. Der Verlauf der angepaßten Exponenten $\beta_{F,5,KZV}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ ist ebenfalls in *Bild 6.5* dargestellt. Ein Vergleich mit *Bild 6.3a* zeigt, daß der Einfluß der Belastungsart auf die 5%-Fraktile mit den gleichen Exponenten beschrieben werden kann wie der Längeneffekt.

Für den Fall des Einflusses der Belastungsart auf die mittlere Biegefestigkeit zeigte sich, daß, ähnlich wie beim Längen- und Höheneffekt, die Simulationsergebnisse nicht mehr mit einer einzigen Kurve für alle Werte von $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$ beschrieben werden können. Deshalb wurde auch hier das "Längenspektrum" in drei Bereiche aufgeteilt. In *Abschnitt 6.3* sind die Simulationsergebnisse zusammengefaßt.

6.1.4 Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften

Mit Hilfe der bisher durchgeführten Simulationen ist es möglich, die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen, der Trägergröße und der Belastungsart zu beschreiben. Hierbei wurde, um ein Keilzinkenversagen zu erzwingen, von einer mittleren Keilzinkenzugfestigkeit von 10 N/mm^2 ausgegangen. Aufgrund des für diese Träger gewählten Spröbruchkriteriums verhält sich die Biegefestigkeit der Brettschichtholzträger proportional zur Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen, d.h. bei doppelt so hoher Keilzinkenzugfestigkeit ist auch die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen doppelt so hoch.

Auf der Grundlage der in [17] beschriebenen Keilzinken-Zugversuche und der dort ermittelten Regressionsgleichungen wurde die mittlere Keilzinkenzugfestigkeit $f_{Z,m,KZV}$, die charakteristische Zugfestigkeit $f_{Z,5,KZV}$ und der zugehörige Variationskoeffizient $v_{Z,KZV}$ für einige Rohdichte- und Elastizitätsmodulbereiche der Bretter mit Hilfe von jeweils 1000 Simulationen berechnet. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 6.1*

und Tabelle 6.2 angegeben. Die angegebenen Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ wurden hierbei mit Hilfe von Gl(6.2) ("Hineinzwängen" einer Normalverteilung durch die abgezählte 5%-Fraktile und den Mittelwert) berechnet.

Tabelle 6.1: Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm^2] in Abhängigkeit von der Darr-Rohdichte ρ_0

	ρ_0 [kg/m^3]							
	340 ± 15	370 ± 15	400 ± 15	430 ± 15	460 ± 15	490 ± 15	520 ± 15	≥ 470
$f_{Z,m,KZV}$	31,0	32,0	33,8	36,1	39,0	42,1	45,8	42,3
$f_{Z,5,KZV}$	21,6	22,2	23,3	24,7	26,5	28,4	30,6	28,0
$v_{Z,KZV}$	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20

Tabelle 6.2: Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm^2] in Abhängigkeit vom mittleren Brett-Elastizitätsmodul E

	E [N/mm^2]							
	7000 ± 1000	9000 ± 1000	11000 ± 1000	13000 ± 1000	15000 ± 1000	17000 ± 1000	19000 ± 1000	≥ 15000
$f_{Z,m,KZV}$	24,6	27,4	30,7	34,6	39,0	43,8	49,4	43,7
$f_{Z,5,KZV}$	17,6	19,2	21,6	24,3	27,5	31,0	34,9	30,6
$v_{Z,KZV}$	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18

Werden keine Anforderungen bzgl. Rohdichte und Elastizitätsmodul der Bretter gestellt, so wie dies bei der z.Zt. praktizierten rein visuellen Holzsortierung der Fall ist, so ergibt sich nach EHLBECK et al. [17] eine mittlere Keilzinkenzugfestigkeit von $f_{Z,m,KZV} = 35,0 N/mm^2$ bei einer zugehörigen 5%-Fraktile von $23,4 N/mm^2$ und einem Variationskoeffizienten von $v_{Z,KZV} = 0,20$.

Bei den in *Kapitel 7* beschriebenen Trägerversuchen zur Überprüfung des Rechenmodells und des theoretischen Modells wurden in einigen Fällen Anforderungen an die jeweils äußeren Decklamellen gestellt. So wurde bei einer Versuchsreihe eine Mindest-Rohdichte von $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ gefordert, was in etwa einer Darr-Rohdichte von $\rho_0 \approx 470 \text{ kg/m}^3$ entspricht. Bei einer weiteren Versuchsreihe wurde ein Brett-Elastizitätsmodul von mindestens 15000 N/mm^2 gefordert. Die in diesen Fällen zu erwartenden Festigkeitswerte der zugehörigen Keilzinkenverbindungen sind ebenfalls in *Tabelle 6.1 und 6.2* angegeben.

6.2 Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen

6.2.1 Allgemeines

In *Abschnitt 6.1* wurde die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen untersucht. Somit wäre es naheliegend, die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit der Brettlamellen anzugeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch das Tragverhalten dieser Träger in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul der Bretter beschrieben. Die Gründe hierfür sind im folgenden kurz erläutert.

Führt man Zugversuche mit Prüfkörpern durch, die eine freie Länge von 150 mm zwischen den Einspannungen aufweisen, so erhält man sehr unterschiedliche Festigkeitswerte, je nachdem, ob im geprüften Bereich ein Ast vorhanden ist oder nicht.

Ermittelt man die Zugfestigkeit von Prüfkörpern mit einer freien Länge von 450 mm (\approx Hauptastabstand), so liegt die mittlere Zugfestigkeit dieser Proben deutlich unter der der kürzeren Proben. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei diesen Proben weitaus häufiger ein Ast auftritt, als dies bei den kurzen Proben der Fall ist.

Mit zunehmender freier Prüflänge wächst somit die Wahrscheinlichkeit, daß ein noch größerer Ast auftritt, so daß die Zugfestigkeit mit wachsender Probenlänge abnimmt.

Auch sind die Brettlängen, die in einem Brettschichtholzträger auftreten, z.T. erheblichen Streuungen unterworfen, so daß eine mit einer

festgelegten Prüfkörperlänge ermittelte Zugfestigkeit nicht für alle eingebauten Bretter Gültigkeit besitzt.

Weiterhin ist es nicht möglich, die Zugfestigkeit eines ganzen Brettes zu ermitteln, weil die äußeren Teile des Brettes dazu verwendet werden müssen, die Last über die Einspannungen in den Prüfkörper einzuleiten. Dadurch besteht die Gefahr, daß der für das Versagen des Brett-schichtholzträgers verantwortliche Brettabschnitt im Zugversuch nicht geprüft werden kann, weil er im Einspannbereich liegt. In diesem Fall liegt die ermittelte Zugfestigkeit eines Brettes über dessen tatsächlicher Zugfestigkeit.

Bei einem Zugversuch mit großer Prüfkörperlänge treten außerdem seitliche Verformungen auf, die durch die strukturellen Imperfektionen (z.B. Äste mit zugehöriger Schrägfaserigkeit) bedingt sind. Diese seitlichen Verformungen bewirken eine zusätzliche Momentenbeanspruchung des Prüfkörpers, was zu einer Abnahme der rechnerischen Zugfestigkeit führt.

Während solche Verformungen, z.B. bei Zugdiagonalen eines Fachwerkträgers, auch während der späteren Nutzung auftreten, werden sie in einem Brett-schichtholzträger durch das Verleimen der einzelnen Brett-lamellen unterbunden. Die so ermittelten Zugfestigkeiten von Brett-lamellen sind daher nicht auf die Verhältnisse in einem Brett-schichtholzträger übertragbar. Da bisher nur sehr grobe Angaben über diesen Einfluß der Prüfmethode vorliegen (siehe z.B. EHLBECK/COLLING [18]), ist es kaum möglich, die "freie" Zugfestigkeit auf eine "behinderte" Zugfestigkeit (ohne seitliche Verformungen) umzurechnen.

Daher wird im Rahmen dieser Arbeit die Tragfähigkeit von Brett-schichtholzträgern in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul der Brett-lamellen beschrieben, die auch als Kriterium für die Einteilung der Bretter in die verschiedenen Güte- bzw. Festigkeitsklassen dienen können.

Die im folgenden beschriebenen Simulationsrechnungen wurden anhand von Trägern durchgeführt, bei denen an die äußeren Lamellen bestimmte Anforderungen bzgl. der Holzeigenschaften gestellt wurden. Als äußere Lamellen sind hierbei die Lamellen in den äußeren 15% der Trägerhöhe auf beiden Seiten zu verstehen, wobei jedoch mindestens zwei Decklamellen vorhanden waren.

Diese Untersuchungen bestätigten auch die Notwendigkeit, die unterschiedlichen Lamellen-Elastizitätsmoduln bei der Berechnung der vorhandenen Spannungen zu berücksichtigen, wenn die Träger planmäßig aus Lamellen unterschiedlicher Steifigkeit aufgebaut sind. Daher wurde als Biegefestigkeit die effektive Biegerandspannung nach *Gl(6.1)* zum Zeitpunkt des Versagens gewählt. Für den Fall, daß sämtliche Lamellen die an die Decklamellen gestellten Anforderungen erfüllen, ist diese effektive Biegerandspannung $ef\sigma$ mit der rechnerischen Biegespannung $\sigma = M/W$ identisch.

In Anlehnung an *Abschnitt 6.1.1 (Gl(6.4))* ergeben sich zur Bestimmung der charakteristischen und der mittleren Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen folgende Beziehungen:

$$x_{5,\text{Holz}} = k_{L,5,\text{Holz}} \cdot k_{H,5,\text{Holz}} \cdot k_{F,5,\text{Holz}} \cdot x_{5,\text{Holz}}^0 \quad (6.10a)$$

und

$$m_{\text{Holz}} = k_{L,m,\text{Holz}} \cdot k_{H,m,\text{Holz}} \cdot k_{F,m,\text{Holz}} \cdot m_{\text{Holz}}^0 \quad (6.10b)$$

Hierbei sind

$x_{5,\text{Holz}}$ und m_{Holz} = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen,

$x_{5,\text{Holz}}^0$ und m_{Holz}^0 = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers (in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften der Brettlamellen),

$k_{L,5,\text{Holz}}$ und $k_{L,m,\text{Holz}}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge,

$k_{H,5,\text{Holz}}$ und $k_{H,m,\text{Holz}}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe,

$k_{F,5,\text{Holz}}$ und $k_{F,m,\text{Holz}}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart.

Die Bestimmung der Faktoren k_i sowie der 5%-Fraktile $x_{5,\text{Holz}}^0$ und der mittleren Biegefestigkeit m_{Holz}^0 ist in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Bei diesen Simulationsrechnungen wurde wiederum eine mittlere Brettlänge von 4 m zugrundegelegt. Um ein Holzversagen zu erzwingen, wurde die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung dem Wert gleichgesetzt, der im Mittel für einen fehlerfreien Brettabschnitt zu erwarten ist.

6.2.2 Einfluß der Holzeigenschaften

In diesem Abschnitt wird das Tragverhalten des zugrunde gelegten Standardträgers in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften der Brett lamellen untersucht.

In Tabelle 6.3 sind die Simulationsergebnisse für den Fall einer rein visuellen Holzsortierung mit verschiedenen Grenzwerten für den größten in einem Brett auftretenden KAR-Wert angegeben. Hierbei entsprechen $x_{5,\text{Holz}}^0$ der 5%-Fraktile und m_{Holz}^0 dem Mittelwert der Biegefestigkeit und v_{Holz}^0 dem zugehörigen Variationskoeffizienten, der sich nach Gl(6.2) für eine durch die 5%-Fraktile und den Mittelwert "hineingezwängte" Normalverteilung ergibt.

Tabelle 6.3: Biegefestigkeit [N/mm²] von Brettschichtholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert der Decklamellen

	KAR - Wert [-]			
	KAR ≤ 0,15	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50
m_{Holz}^0	49,9	46,6	43,3	39,3
$x_{5,\text{Holz}}^0$	39,0	36,2	32,9	28,9
v_{Holz}^0	0,13	0,14	0,15	0,16

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, daß die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern wie erwartet zunimmt, wenn an die Ästigkeit der Brett lamellen strengere Anforderungen gestellt werden.

Für den Fall einer rein maschinellen Holzsortierung nach der Brett-Rohdichte bzw. dem Brett-Elastizitätsmodul sind die Simulationsergebnisse für einige Bereiche dieser Holzeigenschaften in Tabelle 6.4 bzw. Tabelle 6.5 angegeben. Bei diesen Berechnungen wurde an die Ästigkeit der Bretter keine besonderen Anforderungen gestellt ($KAR \leq 0,50$).

Auch hier ist zu erkennen, daß die Tragfähigkeit der Brettschicht-holzträger mit besser werdenden Holzeigenschaften zunimmt. Ein Vergleich mit Tabelle 6.3 zeigt jedoch, daß bei hoher Rohdichte oder hohem Elastizitätsmodul der Bretter höhere Tragfähigkeiten möglich sind, als dies bei einer strengen visuellen Holzsortierung der Fall ist. Weiterhin ist eine stärkere Zunahme der Biegefestigkeit mit steigendem Brett-Elastizitätsmodul zu erkennen als mit steigender Brett-Rohdichte.

Tabelle 6.4: Biegefestigkeit [N/mm^2] von Brettschichtholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit von der Darr-Rohdichte ρ_0

	ρ_0 [kg/m^3]				
	370 ± 15	400 ± 15	430 ± 15	460 ± 15	490 ± 15
m_{Holz}^0	38,3	41,2	44,4	47,9	51,5
$x_{5,\text{Holz}}^0$	29,2	31,7	34,3	37,3	40,6
v_{Holz}^0	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13

Tabelle 6.5: Biegefestigkeit $[N/mm^2]$ von Brettschichtholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit vom Brett - Elastizitätsmodul E

	$E [N/mm^2]$				
	9000 ± 1000	11000 ± 1000	13000 ± 1000	15000 ± 1000	17000 ± 1000
m^0_{Holz}	34,0	39,2	44,6	50,1	55,3
$x^0_{5,\text{Holz}}$	26,8	30,9	34,8	38,9	43,7
v^0_{Holz}	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Außerdem wurde untersucht, welche Festigkeitswerte zu erwarten sind, wenn bei der Auswahl der Bretter neben der Ästigkeit zusätzlich die Rohdichte oder der Elastizitätsmodul berücksichtigt wird. Für den Fall einer solchen kombinierten visuellen/maschinellen Holzsortierung sind die Simulationsergebnisse für verschiedene "Klassengrenzen" in Tabelle 6.6a-c und Tabelle 6.7a-c angegeben.

Aus diesen Tabellen geht hervor, daß mit Hilfe einer kombinierten visuellen/maschinellen Holzsortierung höhere Tragfähigkeiten zu erzielen sind als mit einer rein visuellen oder einer rein maschinellen Holzsortierung, wobei auch hier die Tendenz zu erkennen ist, daß mit einer Sortierung nach dem Elastizitätsmodul höhere Festigkeitswerte möglich sind als mit einer Sortierung nach der Rohdichte.

Tabelle 6.6a: 5%-Fraktile $x_{5, \text{Holz}}^0$ in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert und der Darr - Rohdichte ρ_0 der Bretter

	ρ_0 [kg/m ³]				
	370 ± 15	400 ± 15	430 ± 15	460 ± 15	490 ± 15
KAR ≤ 0,15	34,2	37,3	40,3	43,4	46,5
0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	31,4	34,2	36,9	39,6	42,4
0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	28,9	31,1	33,3	35,6	37,8
0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	25,3	27,4	29,5	31,6	33,7

Tabelle 6.6b: Mittelwert m_{Holz}^0 in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert und der Darr - Rohdichte ρ_0 der Bretter

	ρ_0 [kg/m ³]				
	370 ± 15	400 ± 15	430 ± 15	460 ± 15	490 ± 15
KAR ≤ 0,15	42,8	46,1	49,7	53,7	57,9
0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	39,8	42,7	46,0	49,6	53,4
0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	36,8	39,8	42,7	46,2	49,8
0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	33,6	36,1	38,9	41,9	45,3

Tabelle 6.6c: Variationskoeffizient v_{Holz}^0 in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert und der Darr - Rohdichte ρ_0 der Bretter

	ρ_0 [kg/m ³]				
	370 ± 15	400 ± 15	430 ± 15	460 ± 15	490 ± 15
KAR ≤ 0,15	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13
0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15
0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16

Table 6.7a: 5%-Fraktile $x_{5, \text{Holz}}^0$ in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert und dem Elastizitätsmodul E der Bretter

	E [N/mm ²]				
	9000 ± 1000	11000 ± 1000	13000 ± 1000	15000 ± 1000	17000 ± 1000
KAR ≤ 0,15	29,8	34,9	40,0	45,0	50,1
0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	27,8	32,6	37,4	42,1	46,9
0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	25,7	30,0	34,3	38,7	43,0
0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	23,3	27,1	31,0	34,8	38,6

Table 6.7b: Mittelwert m_{Holz}^0 in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert und dem Elastizitätsmodul E der Bretter

	E [N/mm ²]				
	9000 ± 1000	11000 ± 1000	13000 ± 1000	15000 ± 1000	17000 ± 1000
KAR ≤ 0,15	37,0	43,0	49,0	55,0	61,0
0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	34,8	40,6	46,3	52,0	57,8
0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	32,8	38,1	43,4	48,6	53,9
0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	30,4	35,4	40,3	45,3	50,2

Table 6.7c: Variationskoeffizient v_{Holz}^0 in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert und dem Elastizitätsmodul E der Bretter

	E [N/mm ²]				
	9000 ± 1000	11000 ± 1000	13000 ± 1000	15000 ± 1000	17000 ± 1000
KAR ≤ 0,15	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11
0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Für Brettschichtholzträger aus Brettlamellen, die mindestens der Gkl. II nach *DIN 4074* angehören und an deren Holzeigenschaften außer der Bedingung $KAR \leq 0,5$ keine weiteren Anforderungen gestellt werden, ergibt sich anhand der Simulationsrechnungen eine mittlere Biegefestigkeit von $m_{\text{Holz}} = 43,9 \text{ N/mm}^2$, eine 5%-Fraktile von $x_{5,\text{Holz}}^0 = 33,5 \text{ N/mm}^2$ und ein zugehöriger Variationskoeffizient von $v_{\text{Holz}}^0 = 0,13$.

Bei den in *Kapitel 7* beschriebenen Trägerversuchen zur Überprüfung des theoretischen Modells wurden an die äußeren Decklamellen verschiedene Anforderungen bzgl. der Holzeigenschaften gestellt. In *Tabelle 6.8* sind die Simulationsergebnisse für die zugehörigen Standardträger dargestellt. Die hier angegebenen Festigkeitswerte entsprechen den Werten, die dann zu erwarten sind, wenn alle Träger aufgrund eines Holzversagens zu Bruch gehen.

Tabelle 6.8: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit von verschiedenen Anforderungen an die Decklamellen

Anforderungen an die Decklamellen	m_{Holz}^0 N/mm ²	$x_{5,\text{Holz}}^0$ N/mm ²	v_{Holz}^0 -
$0,35 \leq KAR$	39,1	28,4	0,17
$0,20 \leq KAR \leq 0,35$	43,7	33,3	0,15
$KAR \leq 0,20$	47,9	37,3	0,13
$470 \leq \rho_0$	52,0	40,9	0,13
$15000 \leq E$	54,2	43,0	0,13
$15000 \leq E$ $KAR \leq 0,2$	58,2	47,4	0,11

6.2.3 Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart

In *Abschnitt 6.1.3* wurde der Einfluß der Trägergröße auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Keilzinkenversagen für verschiedene Werte des Variationskoeffizienten der Keilzinkenzugfestigkeit untersucht. Die durchgeführten Simulationsrechnungen bestätigten die von *Weibulls* Theorie vorhergesagte Tendenz, daß die Festigkeitsabnahme mit zunehmender Trägergröße umso ausgeprägter ist, je größer der Variationskoeffizient bzw. die Streuung der zugehörigen Verteilung ist.

Für das "Material" Holz, d.h. die Träger mit Holzversagen, ist aus den *Tabellen 6.3 bis 6.8* zu entnehmen, daß der Variationskoeffizient der Biegefestigkeit nur geringen Schwankungen unterliegt und Werte zwischen 0,11 und 0,15 annimmt. Hierbei ist die Tendenz zu erkennen, daß mit größer werdender Ästigkeit der Brett lamellen der Variationskoeffizient v_{Holz}^0 zunimmt.

Weiterhin geht aus diesen Tabellen hervor, daß die Streuung der Festigkeitsverteilungen nicht nur vom Sortierparameter selbst, sondern auch von den jeweiligen Klassengrenzen abhängig ist: engere Klassengrenzen bewirken eine geringere Streuung der Festigkeitswerte.

Da es aber in Anbetracht der geringen Schwankung des Variationskoeffizienten v_{Holz}^0 nicht sinnvoll erschien, den Einfluß der Trägergröße auf die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften und den zugehörigen, möglichen Sortiergrenzen zu untersuchen, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Volumeneffekt am Beispiel nur eines Trägertyps untersucht, an dessen Lamellen außer der Bedingung, daß der größte KAR-Wert den Wert 0,5 nicht überschreiten darf, keine besonderen Anforderungen gestellt wurden. Für diesen Trägertyp, der mindestens der Güteklasse II nach *DIN 4074* entspricht, wurde im *Abschnitt 6.2.2* ein Variationskoeffizient von 0,13 ermittelt, so daß er geeignet ist, den Volumeneffekt "im Mittel" gut zu beschreiben.

6.2.3.1 Einfluß der Trägerlänge

In Anlehnung an *Abschnitt 6.1.3.1* ergeben sich für die Faktoren $k_{L,5,\text{Holz}}$ und $k_{L,m,\text{Holz}}$ zur Beschreibung des Längeneffektes folgende Beziehungen:

$$k_{L,5,\text{Holz}} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,5,\text{Holz}}} \quad (6.11a)$$

und

$$k_{L,m,\text{Holz}} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,m,\text{Holz}}} \quad , \quad (6.11b)$$

wobei L der Länge eines beliebigen Trägers und L_0 der Länge des Standardträgers nach *Bild 6.1* entspricht ($L_0 = 5400$ mm).

Bei den im folgenden beschriebenen Simulationsrechnungen wurden sowohl die Trägerhöhe ($H_0 = 300$ mm) als auch die Belastungsart (Belastung in den Drittelpunkten) des Bezugsträgers beibehalten.

In *Bild 6.6a* und *Bild 6.6b* ist der Verlauf der Faktoren $k_{L,5,\text{Holz}}$ und $k_{L,m,\text{Holz}}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis L/L_0 dargestellt. In diesen Bildern sind auch die Exponenten $\beta_{L,5,\text{Holz}}$ und $\beta_{L,m,\text{Holz}}$ angegeben, mit deren Hilfe die Simulationsergebnisse am besten beschrieben werden können.

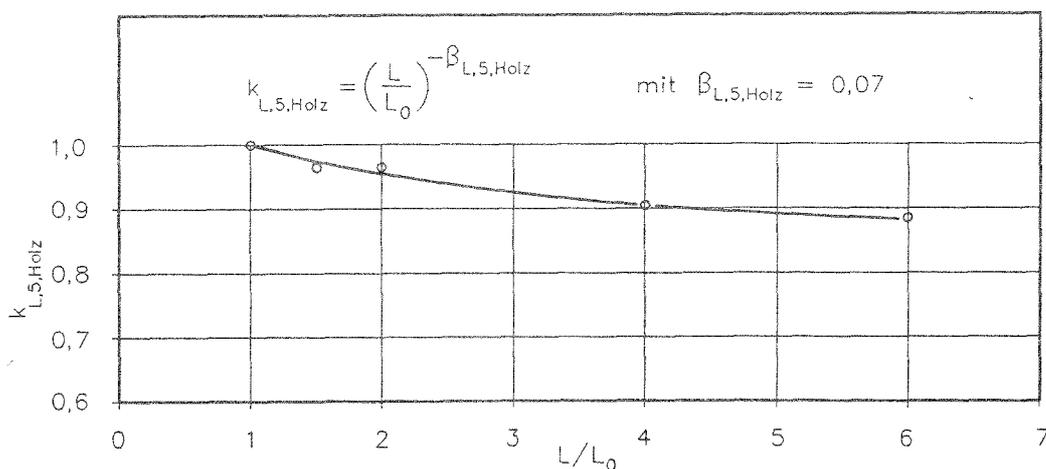


Bild 6.6a: Einfluß der Trägerlänge auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

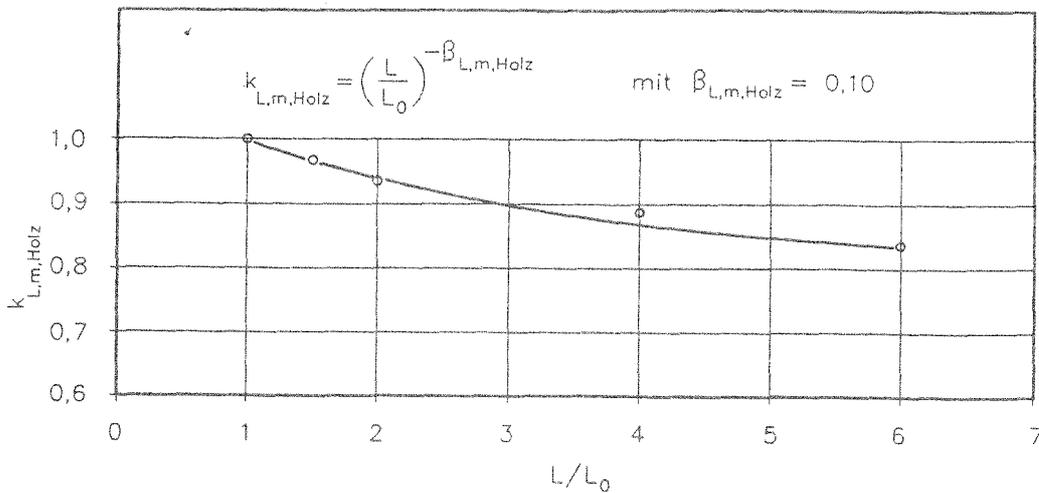


Bild 6.6b: Einfluß der Trägerlänge auf den Mittelwert der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

Aus diesen Bildern ist zu erkennen, daß sich eine Vergrößerung der Trägerlänge stärker auf den Mittelwert der Biegefestigkeit auswirkt als auf die zugehörige 5%-Fraktile.

Ein Vergleich mit den Bildern 6.3a und 6.3b zeigt, daß der Einfluß der Trägerlänge auf die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen geringer ist als im Falle der Träger mit Keilzinkenversagen. Diese Tendenz kann mit der geringeren Streuung des "Materials" Holz erklärt werden.

6.2.3.2 Einfluß der Trägerhöhe

Für die Faktoren $k_{H,5,Holz}$ und $k_{H,m,Holz}$ zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen ergeben sich in Anlehnung an Gl(6.8) folgende Beziehungen:

$$k_{H,5,Holz} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,5,Holz}} \quad (6.12a)$$

und

$$k_{H,m,Holz} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,m,Holz}} \quad (6.12b)$$

Hierbei entspricht H_0 wiederum der Höhe des Bezugsträgers ($H_0 = 300 \text{ mm}$) und H der Höhe eines beliebigen Trägers.

In *Bild 6.7a* und *Bild 6.7b* ist der Verlauf der Faktoren $k_{H,5,\text{Holz}}$ und $k_{H,m,\text{Holz}}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis H/H_0 dargestellt. In diesen Bildern sind auch die Exponenten $\beta_{H,5,\text{Holz}}$ und $\beta_{H,m,\text{Holz}}$ angegeben, mit deren Hilfe die Simulationsergebnisse am besten beschrieben werden können.

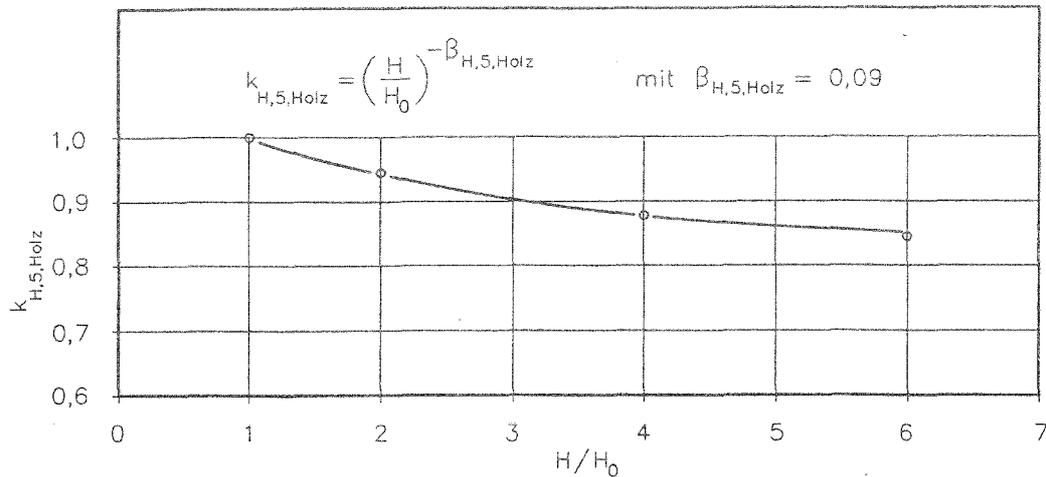


Bild 6.7a: Einfluß der Trägerhöhe auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

Auch hier ist die Tendenz zu erkennen, daß sich eine Veränderung der Trägergröße stärker auf den Mittelwert der Biegefestigkeit auswirkt als auf die zugehörige 5%-Fraktile.

Ein Vergleich mit *Bild 6.6a* und *6.6b* zeigt weiterhin, daß der Einfluß der Trägerhöhe sowohl bei der 5%-Fraktile als auch beim Mittelwert ausgeprägter ist als der Einfluß der Trägerlänge. Die gleiche Tendenz wurde bereits in *Abschnitt 6.1.3.2* für Träger mit Keilzinkenversagen festgestellt, bei denen der Variationskoeffizient der Keilzinkenzugfestigkeit unter 0,2 lag.

Ein Vergleich mit *Bild 6.4* zeigt, daß auch der Einfluß der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen aufgrund des kleineren Variationskoeffizienten geringer ist als im Falle der Träger mit Keilzinkenversagen.

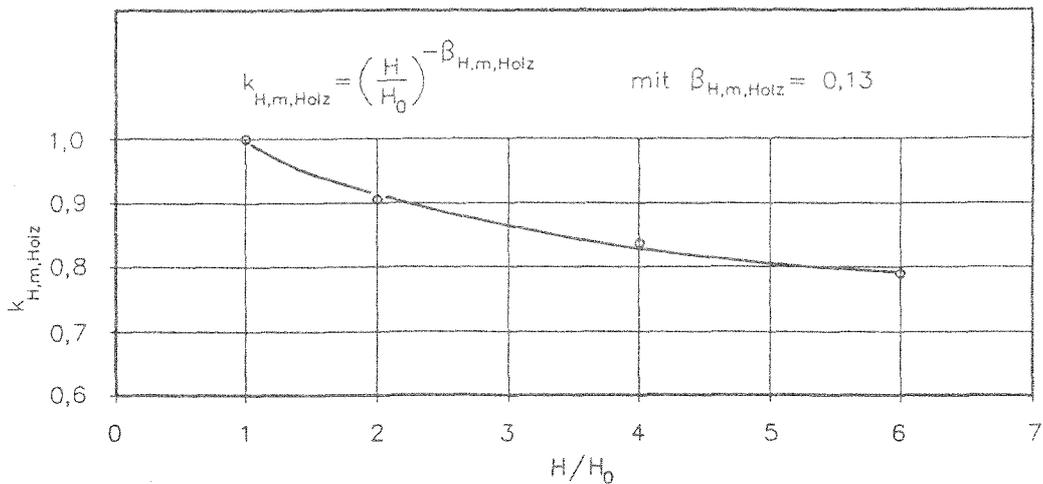


Bild 6.7b: Einfluß der Trägerhöhe auf den Mittelwert der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

6.2.3.3 Einfluß der Belastungsart

In Anlehnung an Gl(6.9) ergeben sich für die Faktoren $k_{F,5,Holz}$ und $k_{F,m,Holz}$ zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart (mit zwei Einzellasten) folgende Beziehungen:

$$k_{F,5,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,5,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,5,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,Holz}} \quad (6.13a)$$

und

$$k_{F,m,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,m,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,m,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,Holz}} \quad (6.13b)$$

wobei der Wert $1/3$ dem Verhältnis des Lastabstandes Δ_0 zur Trägerlänge L_0 des Standardträgers (Belastung in den Drittelpunkten) entspricht.

In **Bild 6.8a** und **Bild 6.8b** ist der Verlauf der Faktoren $k_{F,5,Holz}$ und $k_{F,m,Holz}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis Δ/L dargestellt.

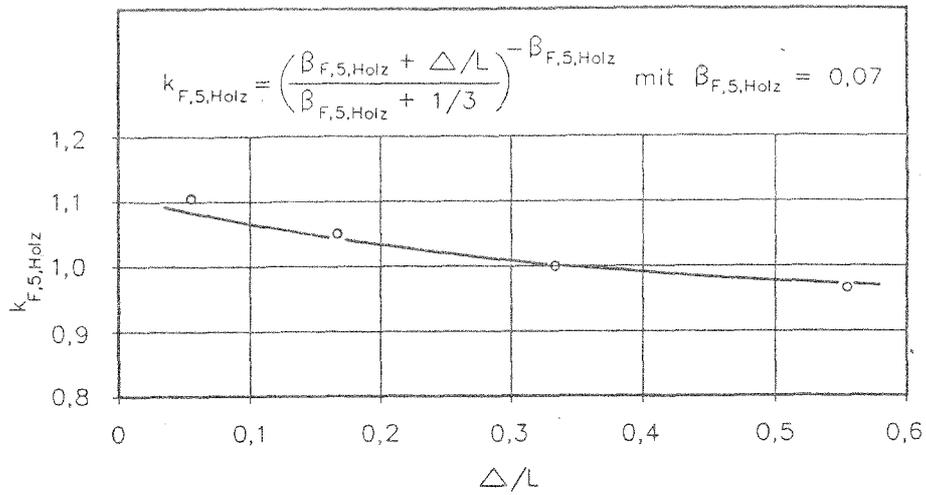


Bild 6.8a: Einfluß der Belastungsart auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

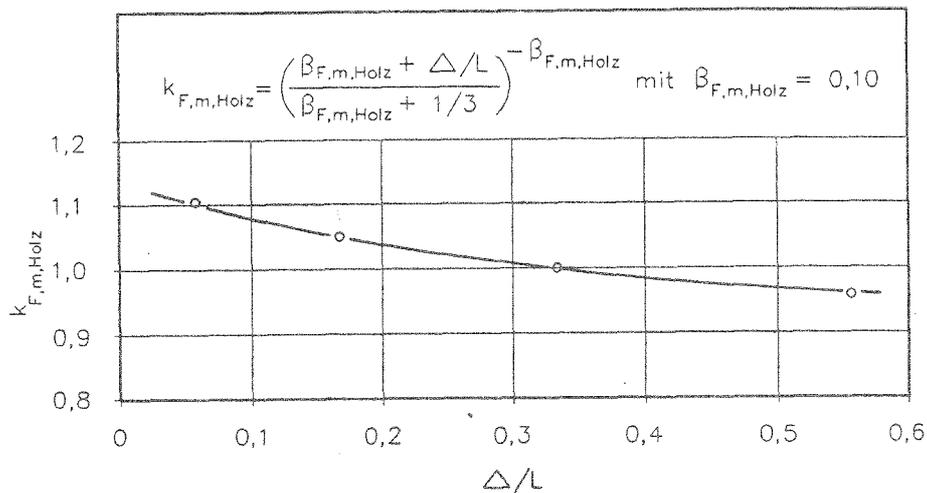


Bild 6.8b: Einfluß der Belastungsart auf den Mittelwert der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

Hieraus ist zu erkennen, daß der Einfluß der Belastungsart mit den gleichen Exponenten beschrieben werden kann wie der Einfluß der Trägerlänge. Diese Tendenz wurde auch in *Abschnitt 6.1.3.3* für die Träger mit Keilzinkenversagen festgestellt.

6.3 Zusammenstellung der Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der bisher durchgeführten Simulationsrechnungen ohne weitere Bewertung oder Diskussion zusammengefaßt.

6.3.1 Träger mit Keilzinkenversagen

Zur Ermittlung der 5%-Fraktile $x_{5,KZV}$ und des Mittelwertes m_{KZV} der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Keilzinkenversagen gelten folgende Beziehungen:

$$x_{5,KZV} = k_{L,5,KZV} \cdot k_{H,5,KZV} \cdot k_{F,5,KZV} \cdot x_{5,KZV}^0 \quad (6.4a)$$

und

$$m_{KZV} = k_{L,m,KZV} \cdot k_{H,m,KZV} \cdot k_{F,m,KZV} \cdot m_{KZV}^0 \quad (6.4b)$$

Hierbei sind

$x_{5,KZV}^0$ und m_{KZV}^0 = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers (mit Keilzinkenversagen),

$k_{L,5,KZV}$ und $k_{L,m,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge,

$k_{H,5,KZV}$ und $k_{H,m,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe,

$k_{F,5,KZV}$ und $k_{F,m,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart.

Unter Annahme einer Normalverteilung ergibt sich der zugehörige Variationskoeffizient v_{KZV} zu:

$$v_{\text{KZV}} = \frac{1 - x_{5,\text{KZV}}/m_{\text{KZV}}}{1,645} \quad (6.2)$$

Die charakteristischen Festigkeitswerte des Standardträgers ergeben sich in Abhängigkeit von der Keilzinkenzugfestigkeit zu:

$$x_{5,\text{KZV}}^0 = k_{0,5,\text{KZV}} \cdot f_{\text{Z},5,\text{KZV}} \quad (6.3a)$$

und

$$m_{\text{KZV}}^0 = k_{0,m,\text{KZV}} \cdot f_{\text{Z},m,\text{KZV}} \quad (6.3b)$$

Hierbei sind

$f_{\text{Z},5,\text{KZV}}$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Keilzinken
und $f_{\text{Z},m,\text{KZV}}$ zugfestigkeit,

$k_{0,5,\text{KZV}}$ = Faktoren zur Beschreibung der Biegefestigkeit
und $k_{0,m,\text{KZV}}$ der Träger mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit
von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenver-
bindungen,

Die Faktoren k_i können mit Hilfe der folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$k_{\text{L},5,\text{KZV}} = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{\text{L},5,\text{KZV}}} \quad (6.7a)$$

$$k_{\text{L},m,\text{KZV}} = m_i \cdot \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{\text{L},m,\text{KZV},i}} \quad (6.7c)$$

$$k_{\text{H},5,\text{KZV}} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{\text{H},5,\text{KZV}}} \quad (6.8a)$$

$$k_{\text{H},m,\text{KZV}} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{\text{H},m,\text{KZV}}} \quad (6.8b)$$

$$k_{\text{F},5,\text{KZV}} = \left(\frac{\beta_{\text{F},5,\text{KZV}} + \Delta/L}{\beta_{\text{F},5,\text{KZV}} + 1/3} \right)^{-\beta_{\text{F},5,\text{KZV}}} \quad (6.9a)$$

$$k_{\text{F},m,\text{KZV}} = \left(\frac{\beta_{\text{F},m,\text{KZV}} + \Delta/L}{\beta_{\text{F},m,\text{KZV}} + 1/3} \right)^{-\beta_{\text{F},m,\text{KZV}}} \quad (6.9b)$$

In *Tabelle 6.9a und 6.9b* sind alle erforderlichen Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Fraktile $x_{5,KZV}$ und des Mittelwertes m_{KZV} der Biegefestigkeit des "Materials" Keilzinkenverbindung angegeben.

Tabelle 6.9a: Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Fraktile $x_{5,KZV}$

$v_{Z,KZV}$ ¹⁾	$k_{0,5,KZV}$	$\beta_{L,5,KZV}$	$\beta_{H,5,KZV}$	$\beta_{F,5,KZV}$
0,15	1,19	0,10	0,14	0,10
0,20	1,20	0,15	0,16	0,15
0,25	1,18	0,22	0,22	0,22
0,30	1,13	0,35	0,35	0,35

¹⁾ Variationskoeffizient der Keilzinkenzugfestigkeit

Tabelle 6.9b: Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit m_{KZV}

$v_{Z,KZV}^{1)}$	$k_{0,m,KZV}$		m_i	$\beta_{L,m,KZV,i}$		$\beta_{H,m,KZV}$	$\beta_{F,m,KZV}$
0,15	1,29	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 1$	1,0	0,46	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 0,67$	0,32	1,0
		$1 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 2$	1,0	0,23	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 1,0$	0,21	0,5
		$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,920	0,11	$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,15	0,11
0,20	1,27	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 1$	1,0	0,50	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 0,67$	0,33	1,0
		$1 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 2$	1,0	0,25	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 1,0$	0,23	0,5
		$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,933	0,15	$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,18	0,15
0,25	1,23	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 1$	1,0	0,54	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 0,67$	0,36	1,0
		$1 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 2$	1,0	0,27	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 1,0$	0,26	0,5
		$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,966	0,22	$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,22	0,22
0,30	1,19	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 1$	1,0	0,64	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 0,67$	0,39	1,0
		$1 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \leq 2$	1,0	0,32	$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} = 1,0$	0,30	0,5
		$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,973	0,28	$2 \leq \frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL}$	0,28	0,35

1) Variationskoeffizient der Keilzinkenzugfestigkeit

6.3.2 Träger mit Holzversagen

Zur Ermittlung der 5%-Fraktile $x_{5,\text{Holz}}$ und des Mittelwertes der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Holzversagen gelten folgende Beziehungen:

$$x_{5,\text{Holz}} = k_{L,5,\text{Holz}} \cdot k_{H,5,\text{Holz}} \cdot k_{F,5,\text{Holz}} \cdot x_{5,\text{Holz}}^0 \quad (6.10a)$$

und

$$m_{\text{Holz}} = k_{L,m,\text{Holz}} \cdot k_{H,m,\text{Holz}} \cdot k_{F,m,\text{Holz}} \cdot m_{\text{Holz}}^0 \quad (6.10b)$$

Hierbei sind

$x_{5,\text{Holz}}^0$
und m_{Holz}^0 = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers (in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften der Brettlamellen),

$k_{L,5,\text{Holz}}$
und $k_{L,m,\text{Holz}}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge,

$k_{H,5,\text{Holz}}$
und $k_{H,m,\text{Holz}}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe,

$k_{F,5,\text{Holz}}$
und $k_{F,m,\text{Holz}}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart.

Unter Annahme einer Normalverteilung ergibt sich der zugehörige Variationskoeffizient v_{KZV} zu:

$$v_{\text{KZV}} = \frac{1 - x_{5,\text{KZV}}/m_{\text{KZV}}}{1,645} \quad (6.2)$$

Die Faktoren k_i können mit Hilfe der folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$k_{L,5,\text{Holz}} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,5,\text{Holz}}} \quad (6.11a)$$

$$k_{L,m,\text{Holz}} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,m,\text{Holz}}} \quad (6.11b)$$

$$k_{H,5,Holz} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{H,5,Holz}} \quad (6.12a)$$

$$k_{H,m,Holz} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{H,m,Holz}} \quad (6.12b)$$

$$k_{F,5,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,5,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,5,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,Holz}} \quad (6.13a)$$

$$k_{F,m,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,m,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,m,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,Holz}} \quad (6.13b)$$

Die zur Berechnung der 5%-Fraktile $x_{5,Holz}$ und des Mittelwertes m_{Holz} der Biegefestigkeit erforderlichen Zahlenwerte sind in Tabelle 6.10a und 6.10b angegeben.

Tabelle 6.10a: Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Fraktile $x_{5,Holz}$

$\beta_{L,5,Holz}$	$\beta_{H,5,Holz}$	$\beta_{F,5,Holz}$
0,07	0,09	0,07

Tabelle 6.10b: Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit m_{Holz}

$\beta_{L,m,Holz}$	$\beta_{H,m,Holz}$	$\beta_{F,m,Holz}$
0,10	0,13	0,10

7 Überprüfung des theoretischen Modells mit Hilfe von Trägerversuchen

7.1 Darstellung der Versuche

Zur Überprüfung des in *Kapitel 5* vorgestellten theoretischen Modells und der in *Kapitel 6* durchgeführten Berechnungen wurden insgesamt 42 Biegeversuche mit Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Holzgüte durchgeführt. In *Bild 7.1* sind die Abmessungen und die Belastung dieser Träger dargestellt.

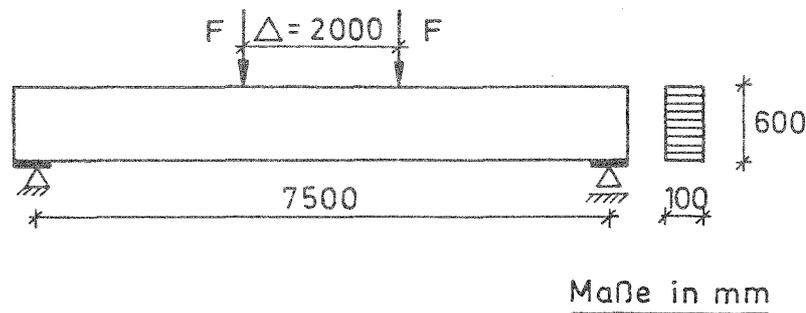


Bild 7.1: Abmessungen und Belastung der Versuchsträger

Die Größe und die Belastungsart der geprüften Träger entsprachen nicht denen des Bezugsträgers, so daß mit Hilfe dieser Versuche auch eine gewisse Überprüfung der in *Kapitel 6* ermittelten Faktoren zur Beschreibung des Volumeneffektes auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern möglich war.

Insgesamt wurden 6 Versuchsreihen mit jeweils 7 Trägern geprüft. Während an die Lage der auftretenden Keilzinkenverbindungen keine Bedingungen gestellt wurden, mußten die Holzeigenschaften der jeweils drei äußeren Lamellen die in *Tabelle 7.1* angegebenen Anforderungen erfüllen.

Während bei den ersten drei Versuchsreihen die Decklamellen nach rein visuellen Gesichtspunkten ausgewählt wurden, stellten bei den Versuchsreihen IV und V die mittlere Brettrohichte und der mittlere Brett-Elastizitätsmodul die alleinigen Auswahlkriterien ohne Rücksicht auf die Ästigkeit dar. Die Decklamellen der Reihe VI hingegen wurden in Anlehnung an eine mögliche kombinierte visuelle/maschinelle Holzsortierung ausgewählt.

Tabelle 7.1: Anforderungen an die Holzeigenschaften der drei äußeren Lamellen

Versuchsreihe	Anforderungen
I	$0,35 \leq \text{KAR}$
II	$0,20 \leq \text{KAR} \leq 0,35$
III	$\text{KAR} \leq 0,20$
IV	$500 \text{ kg/m}^3 \leq \rho^1$
V	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq E$
VI	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq E$ und $\text{KAR} \leq 0,20$

¹ Rohdichte bei einer Holzfeuchte von 12 - 14%

Die mittlere Brett-Rohdichte wurde mittels Wägung bestimmt, während der mittlere Brett-Elastizitätsmodul mit Hilfe von Längsschwingungen nach GÖRLACHER [28] ermittelt wurde. Von jedem Träger wurden die effektive Biegerandspannung $ef\sigma$ nach Gl(6.1) zum Zeitpunkt des Versagens berechnet, für die folgende Beziehung gilt:

$$ef\sigma = k_{\sigma} \cdot \sigma^0, \quad (7.1)$$

wobei σ^0 der Biegerandspannung ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Lamellen-Elastizitätsmoduln entspricht ($\sigma^0 = M/W$). Der Faktor k_{σ} ist hierbei abhängig vom Trägeraufbau, d.h. von der Anordnung der Lamellen mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul über die Trägerhöhe.

Da jedoch bei den Versuchsträgern nicht alle Elastizitätsmoduln der Einzellamellen bekannt waren, wurde für jede Versuchsserie der Faktor k_{σ} mit den in Tabelle 7.2 angegebenen Brett-Elastizitätsmoduln berechnet. Diese Werte wurden anhand von jeweils 1000 simulierten Brettern ermittelt und entsprechen den Elastizitätsmoduln, die bei den jeweils gestellten Anforderungen nach Tabelle 7.1 im Mittel zu erwarten sind.

Tabelle 7.2: Mittlerer Brett-Elastizitätsmodul

Versuchsreihe	mittlerer Brett-Elastizitätsmodul [N/mm ²]	
	äußere Lamellen	innere Lamellen
I - III	13000	13000
IV	16200	13000
V - VI	17000	13000

Die Faktoren k_{σ} , die auf der Grundlage dieser Werte für jede Versuchsreihe zu erwarten sind, sind in Tabelle 7.3 angegeben.

Hieraus ist zu erkennen, daß z.B. bei den Trägern der Versuchsreihe VI die in der äußeren Lamelle tatsächlich auftretenden Spannungen etwa 9% höher sind, als dies aufgrund der rechnerischen Spannung $\sigma^0 = M/W$ zu erwarten ist.

Da bei homogenen Trägern mit konstantem Lamellen-Elastizitätsmodul die Beziehung $\sigma = \sigma^0$ besteht, gibt der Faktor k_{σ} auch an, um welches Maß die rechnerische Biegefestigkeit σ^0 gesteigert werden kann, wenn auch die inneren Lamellen die an die drei äußeren Lamellen gestellten Anforderungen erfüllen.

Tabelle 7.3: Faktoren $k_{\sigma} = \sigma / \sigma^0$ zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Lamellen-Elastizitätsmoduln

Versuchsreihe	k_{σ}
I - III	1,0
IV	1,073
V - VI	1,088

In Tabelle 7.4a und 7.4b sind für jeden Versuchsträger neben der rechnerischen Biegefestigkeit σ^0 auch die zugehörige Spannung σ nach Gl(7.1) sowie die festgestellte Bruchursache angegeben.

Aus diesen Tabellen sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- schärfere Anforderungen an die Ästigkeit der Bretter bewirken ein häufigeres Auftreten eines Keilzinkenversagens (vgl. Reihe I - III). Dies kann damit erklärt werden, daß mit geringer werdender Ästigkeit die Festigkeit des "Materials" Holz zunimmt, während die Tragfähigkeit des "Materials" Keilzinkenverbindung hiervon unbeeinträchtigt bleibt. Dies bewirkt, daß sich die Festigkeitsverteilungen dieser beiden "Materialien" weiter voneinander entfernen, so daß sich das Endprodukt Brettschichtholz verstärkt am schwächeren "Material" orientiert;
- werden an die Rohdichte oder den Elastizitätsmodul der Bretter bestimmte Mindestanforderungen gestellt, so sind im Mittel höhere Biegefestigkeiten möglich als bei einer rein visuellen Auswahl der Bretter anhand deren Ästigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, daß mit steigender Rohdichte oder steigendem Elastizitätsmodul der Bretter nicht nur die Festigkeit des "Materials" Holz zunimmt, sondern auch die des "Materials" Keilzinkenverbindung;
- die höchsten Tragfähigkeiten sind zu erwarten, wenn bei der Auswahl der Bretter sowohl die Ästigkeit als auch die Rohdichte oder der Elastizitätsmodul als Kriterium herangezogen werden (vgl. Reihe VI).

Aussagen über die charakteristischen Biegefestigkeiten der einzelnen Trägertypen lassen die hier durchgeführten Versuche nicht zu, weil bei einer Probenzahl von jeweils nur 7 Versuchsträgern keine zuverlässige Bestimmung der 5%-Fraktile möglich war.

Tabelle 7.4a: Versuchsergebnisse; Reihe I, II und III

Träger	σ^0 N/mm ²	= $ef\sigma$ N/mm ²	Bruchursache
I - 1	32,9		Ast
I - 2	37,5		Ast
I - 3	33,7		Ast
I - 4	34,7		Ast
I - 5	35,3		Ast
I - 6	30,7		Ast
I - 7	38,3		Ast
Mittelwert Var. - koef.	34,7 0,08		
II - 1	32,2		Ast
II - 2	35,5		Ast
II - 3	41,8		KZV ¹
II - 4	45,7		KZV
II - 5	44,1		Ast
II - 6	33,6		KZV
II - 7	39,6		KZV
Mittelwert Var. - koef.	38,9 0,15		
III - 1	42,8		KZV
III - 2	37,7		KZV
III - 3	36,4		KZV
III - 4	32,3		Ast
III - 5	41,3		KZV
III - 6	44,7		Ast
III - 7	47,1		KZV
Mittelwert Var. - koef.	40,3 0,13		

¹ KZV = Keilzinkenverbindung

Tabelle 7.4b: Versuchsergebnisse; Reihe IV, V und VI

Träger	σ^0 N/mm ²	$ef\sigma$ N/mm ²	Bruchursache
IV - 1	40,2	43,1	KZV ¹
IV - 2	44,5	47,7	Ast
IV - 3	33,0	35,4	KZV
IV - 4	47,2	50,6	KZV
IV - 5	42,6	45,7	KZV
IV - 6	48,4	51,9	Schubbruch
IV - 7	44,4	47,6	Ast
Mittelwert Var. - koeff.	42,9 0,12	46,0 0,12	
V - 1	34,1	37,1	Ast
V - 2	45,5	49,5	KZV
V - 3	39,9	43,4	Ast
V - 4	45,3	49,3	Ast
V - 5	37,6	40,9	KZV
V - 6	44,6	48,5	KZV
V - 7	59,7	65,0	KZV
Mittelwert Var. - koeff.	43,8 0,19	47,7 0,19	
VI - 1	49,0	53,3	Ast
VI - 2	36,6	39,8	Ast
VI - 3	44,8	48,7	Ast
VI - 4	41,7	45,4	KZV
VI - 5	45,3	49,3	KZV
VI - 6	50,2	54,6	Ast
VI - 7	55,3	60,2	KZV
Mittelwert Var. - koeff.	46,1 0,13	50,2 0,13	

¹ KZV = Keilzinkenverbindung

7.2 Prognosen des theoretischen Modells

In diesem Abschnitt werden die Tragfähigkeiten der geprüften Trägertypen mit Hilfe des in *Kapitel 5* beschriebenen theoretischen Modells abgeschätzt. Die hierzu erforderlichen Kennwerte der Festigkeitsverteilungen der beiden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung jedes Trägertyps werden dabei auf der Grundlage der in *Abschnitt 6.3* zusammengefaßten Simulationsergebnisse berechnet.

Bei der Auswahl der Decklamellen standen Bretter mit einer Länge von etwa 4 m zur Verfügung, so daß sich folgende Größen zur Abschätzung des Volumeneffektes ergeben:

$$(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = (7500/5400) \cdot (4/4) = 1,39 = L/L_0$$

$$H/H_0 = 600/300 = 2,0$$

$$\Delta/L = 2000/7500 = 0,267$$

Um die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen möglichst zuverlässig abschätzen zu können, wurden an dem Tag, an dem alle Versuchsträger hergestellt wurden, insgesamt 15 keilgezinkte Brettabschnitte entnommen und deren Biegefestigkeit in Anlehnung an [21] ermittelt. In *Tabelle 7.5* sind die Versuchsergebnisse den entsprechenden Werten aller Proben aus [21] gegenübergestellt.

Tabelle 7.5: Vergleich der Holzeigenschaften und der Biegefestigkeiten der am Herstellungstag der Brettschichtholzträger entnommenen Keilzinkenverbindungen mit den zugehörigen Werten aller Proben; Mittelwerte

	f_B N/mm ²	E_{\min} N/mm ²	ρ_{\min} kg/m ³
Am Herstellungstag entnommene Proben	53,6	11570	441
Alle Proben (siehe [21])	50,6	12340	444

Hieraus ist zu erkennen, daß am Herstellungstag der Versuchsträger eine bessere Keilzinkenqualität produziert wurde, als dies im Mittel zu erwarten ist (etwa 6% höhere Biegefestigkeit). In Anbetracht der Tatsache, daß diese höheren Festigkeitswerte bei gleichzeitig geringerer Holzqualität erzielt wurden, wird bei den nachfolgend beschriebenen Berechnungen von einer um 10% erhöhten Keilzinkenzugfestigkeit ausgegangen.

Unter der Annahme, daß alle Versuchsträger aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen, sind für jeden Trägertyp die zu erwartende 5%-Fraktile $x_{5,KZV}$ und der Mittelwert m_{KZV} der Biegefestigkeit in den Tabellen 7.6a und 7.6b angegeben (siehe hierzu auch Abschnitt 6.1.4). In diesen Tabellen sind auch alle zur Berechnung dieser Werte erforderlichen Faktoren angegeben. Der Variationskoeffizient v_{KZV} ergibt sich für alle Versuchsreihen zu etwa 0,20.

Tabelle 7.6a: Berechnung der 5%-Fraktile $x_{5,KZV}$

Versuchsreihe	$f_{Z,5,KZV}^1$ N/mm ²	$v_{Z,KZV}$	$k_{0,5,KZV}$	$x_{5,KZV}^0$ N/mm ²	$k_{L,5,KZV}$	$k_{H,5,KZV}$	$k_{F,5,KZV}$	$x_{5,KZV}$ N/mm ²
I - III	25,7	0,20	1,20	30,8	0,952	0,895	1,022	26,9
IV	30,8	0,20	1,20	37,0	0,952	0,895	1,022	32,2
V - VI	33,7	0,18	1,20	40,4	0,958	0,900	1,020	35,6

Tabelle 7.6b: Berechnung der mittleren Biegefestigkeit m_{KZV}

Versuchsreihe	$f_{Z,m,KZV}^1$ N/mm ²	$v_{Z,KZV}$	$k_{0,m,KZV}$	m_{KZV}^0 N/mm ²	$k_{L,m,KZV}$	$k_{H,m,KZV}$	$k_{F,m,KZV}$	m_{KZV} N/mm ²
I - III	38,5	0,20	1,27	48,9	0,921	0,864	1,037	40,4
IV	46,5	0,20	1,27	59,1	0,921	0,864	1,037	48,8
V - VI	48,1	0,18	1,27	61,1	0,924	0,877	1,036	51,3

¹ 10% höhere Werte als in Abschnitt 6.1.4 angegeben

Nimmt man jedoch an, daß alle Träger aufgrund eines Holzversagens zu Bruch gehen, so sind die in Tabelle 7.7a und 7.7b angegebenen Festigkeitswerte $x_{5,\text{Holz}}$ und m_{Holz} zu erwarten (siehe hierzu auch Abschnitt 6.2.2).

Tabelle 7.7a: Berechnung der 5% - Fraktile $x_{5,\text{Holz}}$

Versuchsreihe	$x^0_{5,\text{Holz}}$ N/mm ²	$k_{L,5,\text{Holz}}$	$k_{H,5,\text{Holz}}$	$k_{F,5,\text{Holz}}$	$x_{5,\text{Holz}}$ N/mm ²
I	28,4				26,4
II	33,3				31,0
III	37,3				34,7
IV	40,9	0,977	0,940	1,013	38,1
V	43,0				40,0
VI	47,4				44,1

Tabelle 7.7b: Berechnung der mittleren Biegefestigkeit m_{Holz} sowie des Variationskoeffizienten v_{Holz}

Versuchsreihe	m^0_{Holz} N/mm ²	$k_{L,m,\text{Holz}}$	$k_{H,m,\text{Holz}}$	$k_{F,m,\text{Holz}}$	m_{Holz} N/mm ²	v_{Holz}
I	39,1				35,2	0,15
II	43,7				39,3	0,13
III	47,9				43,1	0,12
IV	52,0	0,968	0,914	1,017	46,8	0,11
V	54,2				48,7	0,11
VI	58,2				52,3	0,10

Bei Versuchen mit "normalen" Brettschichtholzträgern wird sich aber in der Regel weder ein reines Holzversagen noch ein reines Keilzinkenversagen einstellen, sondern das Endprodukt Brettschichtholz wird je

nach den Festigkeitseigenschaften der "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz ein gemischtes Tragverhalten aufweisen. Sind die Festigkeitsverteilungen dieser "Materialien" bekannt, so kann dieses Tragverhalten mit Hilfe des in *Kapitel 5* beschriebenen "Mischverfahrens" abgeschätzt werden.

In *Tabelle 7.8* sind der vom theoretischen Modell erwartete Medianwert σ_{50} (\approx Mittelwert) und die zugehörige 5%-Fraktile σ_5 der Biegefestigkeit jeder Versuchsreihe angegeben. Diese Werte wurden auf der Grundlage der in den *Tabellen 7.6a-b und 7.7a-b* angegebenen Werten mit Hilfe der *Bilder 5.2 und 5.3* ermittelt. Die hierzu erforderlichen Kenngrößen sind ebenfalls angegeben.

Als das schwächere "Material" mit der geringeren 5%-Fraktile erwies sich bei nahezu allen Versuchsreihen die Keilzinkenverbindung. Lediglich bei Trägertyp I, bei dem in den Decklamellen größere Äste auftraten, liegt die erwartete 5%-Fraktile der Träger mit Holzversagen geringfügig unter dem entsprechenden Wert der Träger mit Keilzinkenversagen.

Tabelle 7.8: Berechnung der 5%-Fraktile σ_5 und des Medianwertes σ_{50} der Biegefestigkeit jeder Versuchsreihe mit Hilfe des theoretischen Modells

Reihe	$\frac{x_{5,1}}{x_{5,2}}$	$\frac{m_1}{m_2}$	v_1	$\frac{\sigma_5}{x_{5,1}}$	$\frac{\sigma_{50}}{m_1}$	σ_5 N/mm ²	σ_{50} N/mm ²	$m^1_{\text{Vers.}}$ N/mm ²
I	0,981	0,871	0,15	0,933	0,953	24,6	33,5	34,7
II	0,868	1,028	0,20	0,985	0,900	26,5	36,4	38,9
III	0,775	0,937	0,20	0,998	0,949	26,8	38,3	40,3
IV	0,845	1,043	0,21	0,991	0,893	31,9	43,6	46,0
V	0,890	1,053	0,19	0,985	0,893	35,1	45,8	47,7
VI	0,807	0,981	0,19	0,999	0,936	35,6	48,0	50,2

¹ Mittelwerte aus *Tabelle 7.4a-b*

Weiterhin wurde mit Hilfe von $GI(5.6)$ die für jede Versuchsreihe zu erwartende Auftretenshäufigkeit eines Keilzinkenversagens abgeschätzt. In Tabelle 7.9 sind die berechneten Prozentzahlen angegeben.

Tabelle 7.9: Erwartete Auftretenshäufigkeit P_{KZV} eines Keilzinkenversagens

Versuchsreihe	$\frac{m_{\text{Holz}} - m_{\text{KZV}}}{\sqrt{s_{\text{Holz}}^2 + s_{\text{KZV}}^2}}$	P_{KZV} %
I	-0,539	30
II	-0,115	45
III	0,281	61
IV	-0,174	43
V	-0,234	40
VI	0,090	54

Aus Tabelle 7.8 und 7.9 ist zu erkennen, daß es mit dem theoretischen Modell möglich ist, die bei den Trägerversuchen festgestellten Tendenzen auf rechnerischem Wege zu beschreiben. So wird z.B. die zunehmende Auftretenshäufigkeit eines Keilzinkenversagens mit kleiner werdender Ästigkeit der Brettlamellen genauso erfaßt wie die höhere Tragfähigkeit der Träger, bei denen an die Rohdichte oder an den Elastizitätsmodul der Lamellen bestimmte Mindestanforderungen gestellt wurden.

Im Gegensatz zu den Trägerversuchen mit begrenzter Probenzahl ist es mit Hilfe des theoretischen Modells aber nicht nur möglich, Aussagen über die mittleren Biegefestigkeiten zu machen, sondern auch über die zugehörigen 5%-Fraktilen.

Aus Tabelle 7.8 ist zu erkennen, daß bei kleiner werdender Ästigkeit der Brettlamellen die 5%-Fraktilen dem Verlauf der mittleren Biegefestigkeit nur teilweise folgt. So ist zwischen den charakteristischen Biegefestigkeiten der Reihen II und III im Gegensatz zum Mittelwert kein nennenswerter Unterschied mehr festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bereits beim Trägertyp II das "Material" Holz soviel besser ist als das "Material" Keilzinkenverbindung, daß die 5%-Fraktilen des Endproduktes Brettschichtholz praktisch identisch ist mit

dem entsprechenden Wert des schwächeren "Materials". Eine alleinige Steigerung der Holzfestigkeit durch eine Verringerung der zulässigen Astgröße ermöglicht daher keine nennenswerte Anhebung der 5%-Fraktile.

Eine merkliche Steigerung der charakteristischen Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern ist nur dann zu erreichen, wenn neben den Festigkeitseigenschaften des "Materials" Holz auch die des "Materials" Keilzinkenverbindung verbessert werden. Dies ist z.B. durch bestimmte Mindestanforderungen an die Rohdichte oder den Elastizitätsmodul der Bretter möglich (vgl. Reihe IV-VI).

Weiterhin ist zu erkennen, daß, mit Ausnahme der Reihe I, die erwarteten 5%-Fraktile der Versuchsträger praktisch identisch sind mit den 5%-Fraktile der zugehörigen "Materialien" Keilzinkenverbindung ($\sigma_5/x_{5,1} \approx 1$). Bei den hier geprüften Trägertypen ist also zu erwarten, daß von jeweils 100 Trägern die 5 Träger mit den geringsten Tragfähigkeiten alle aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen.

Dies bedeutet, daß in praktischen Fällen, in denen versucht wird, Brettschichtholzträger mit hoher Tragfähigkeit herzustellen, die bei der Bemessung maßgebende charakteristische Biegefestigkeit ausschließlich von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen bestimmt wird. Die Holzfestigkeit ist in diesen Fällen nur von untergeordneter Bedeutung und beeinflusst lediglich den zu erwartenden Mittelwert der Biegefestigkeit.

7.3 Vergleich zwischen Versuch und Rechnung

In *Bild 7.2* sind für jede Versuchsreihe neben den Versuchsergebnissen (Einzelwerte) auch die Streubereiche $\sigma_{50} \pm s$ angegeben, in denen laut Rechenmodell etwa 2/3 aller Werte zu erwarten sind. Hierbei entspricht der Wert s der Standardabweichung einer durch die 5%-Fraktile σ_5 und den Medianwert σ_{50} "hineingezwängten" Normalverteilung.

In diesem Bild ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und den Rechenergebnissen zu erkennen. Bei allen Versuchsreihen wurde das Tragverhalten der geprüften Träger sowohl hinsichtlich der absoluten Festigkeitswerte als auch der Streubreite der Versuchswerte richtig erfaßt.

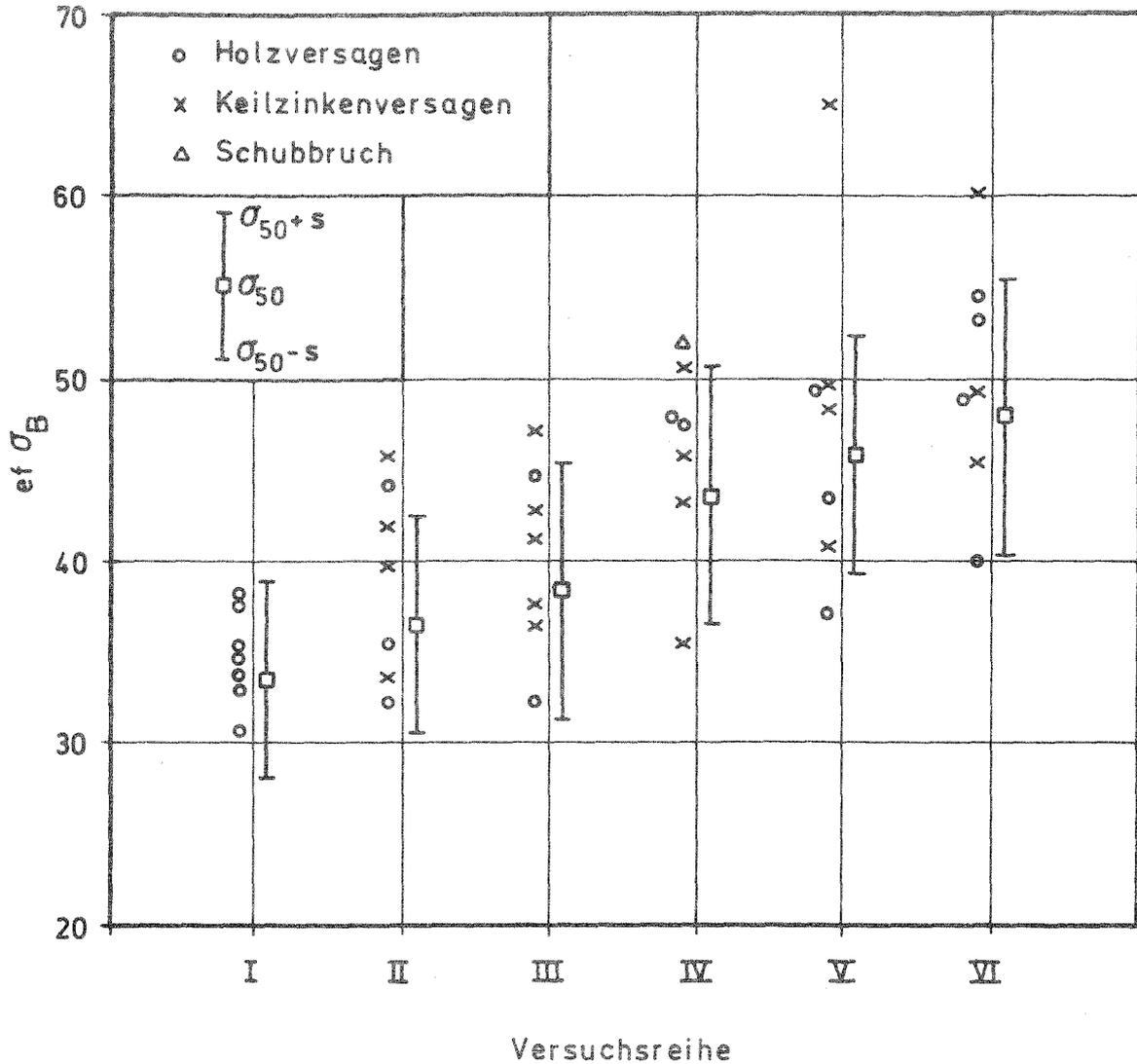


Bild 7.2: Vergleich zwischen den Versuchswerten und den Rechenergebnissen

Diese gute Übereinstimmung über den gesamten Tragfähigkeitsbereich wird auch in Bild 7.3 deutlich, in dem die im Versuch ermittelten mittleren Biegefestigkeiten ($ef \sigma$) den zugehörigen erwarteten Medianwerten (σ_{50}) gegenübergestellt sind. Die größte Differenz zwischen Versuchswert und Rechenwert beträgt hierbei etwa 6% bei Reihe II.

Aus diesem Bild ist aber auch zu erkennen, daß der vom Rechenmodell erwartete Medianwert σ_{50} in allen Fällen unter der mittleren Biegefestigkeit der geprüften Träger liegt. Dies deutet auf eine systematische Unterschätzung der Versuchsträger durch das theoretische Modell hin.

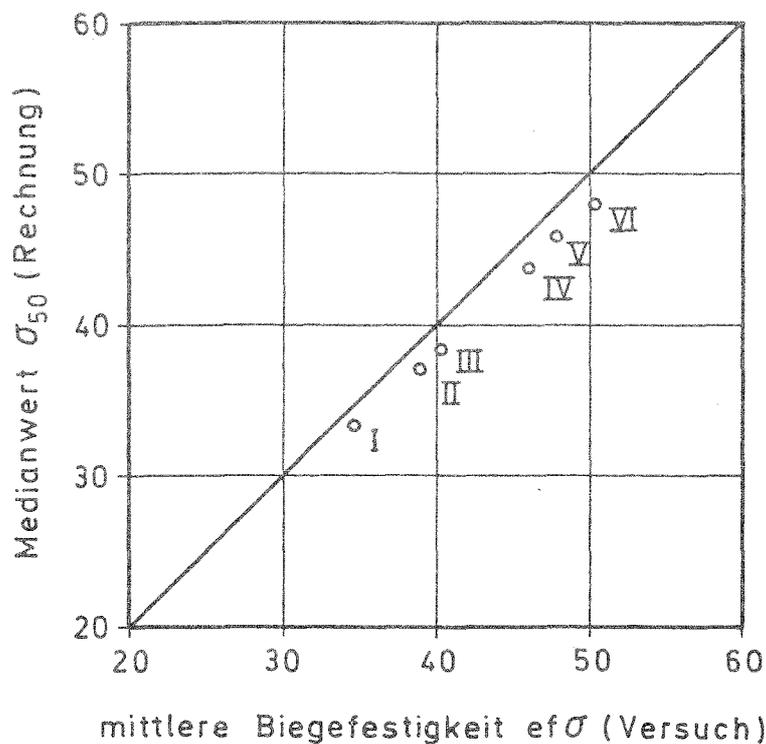


Bild 7.3: Vergleich zwischen den Versuchswerten und den Rechenergebnissen (Mittelwerte)

Im folgenden sind einige Gründe aufgeführt, die als mögliche Ursachen für einen solchen systematischen "Fehler" in Frage kommen:

- der Medianwert einer Verteilung muß nicht mit dem Mittelwert identisch sein. Bei rechtsschiefen Verteilungen mit einem verlängerten Arm in Richtung der hohen Festigkeitswerte ist der Medianwert betragsmäßig kleiner als der Mittelwert, der bekanntlich dem Schwerpunkt der Verteilung entspricht;
- bei der Untersuchung der Tragfähigkeit des "Materials" Keilzinkenverbindung wurde ein reines Spröbruchkriterium zugrundegelegt (siehe *Abschnitt 6.1.1*). Dies bedeutet, daß die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen als erschöpft angesehen wurde, sobald die erste Keilzinkenverbindung ausfiel, auch wenn die benachbarten Elemente die dadurch entstehenden hohen Zusatzspannungen hätten aufnehmen können. Aufgrund dieser vereinfachten Annahme ist es möglich, daß je nach Holzqualität der Brettlamellen die mittlere Biegefestigkeit dieser Träger unterschätzt wird. Die 5%-Fraktile bleibt hiervon jedoch unbetroffen, denn dieser Wert wird in der Hauptsache von solchen Trägern be-

- stimmt, bei denen die Keilzinkenverbindungen in der äußeren Zuglamelle im hochbeanspruchten Bereich auftreten und das angenommene Spröbruchverhalten somit auch zutrifft;
- die für jede Versuchsreihe vom Rechenmodell vorhergesagten Festigkeitswerte gelten für die Grundgesamtheit aller in den deutschen Leimbaubetrieben hergestellten Brettschichtholzträger, deren Lamellen die jeweils gestellten Anforderungen erfüllen. Die Versuchsträger hingegen wurden alle innerhalb eines Tages in ein und derselben Firma hergestellt. Dies bedeutet, daß die Versuchsergebnisse nur für das im Herstellungszeitraum zur Verfügung stehende Brettmaterial und die am Herstellungstag produzierte Keilzinkenqualität Gültigkeit besitzen. So ist es durchaus möglich, daß die eingebauten Keilzinkenverbindungen eine noch höhere Festigkeit aufwiesen, als dies aufgrund der im vorigen Abschnitt erwähnten Versuche mit 15 Proben zu erwarten war.

Insgesamt gesehen kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden, sodaß das in *Kapitel 5* beschriebene theoretische Modell - aufbauend auf den Simulationsrechnungen des im Rahmen dieser Forschungsreihe entwickelten Rechenmodells - das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Güte und Trägerabmessungen treffend erfaßt. Die festgestellten Abweichungen sind gering und liegen zudem auf der sicheren Seite.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, daß es nur aufgrund der Einschränkungen bzgl. der Trägerherstellung möglich war, die vom Rechenmodell vorhergesagten Tendenzen auch versuchsmäßig nachzuweisen. So hätte eine Entnahme bzw. Herstellung der Versuchsträger zu verschiedenen Zeitpunkten bei verschiedenen Leimbaubetrieben (mit unterschiedlicher Keilzinkenqualität) eine zusätzliche, z.T. unerklärte Streuung der Versuchswerte zur Folge gehabt, die eine eigentlich vorhandene Tendenz hätte zunichte machen oder zumindest verwischen können.

8 Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen

8.1 Allgemeines

Bei den im vorigen Kapitel durchgeführten Trägerversuchen zur Überprüfung des theoretischen Modells zeigte sich, daß in praktischen Fällen, in denen versucht wird, Brettschichtholzträger mit hoher Tragfähigkeit herzustellen, die 5%-Fraktile des Endproduktes Brettschichtholz nahezu identisch ist mit der 5%-Fraktile des schwächeren der beiden "Materialien" Keilzinkenverbindung und Holz. Trotz einer um 10% erhöhten Keilzinkenzugfestigkeit war bei fünf der sechs untersuchten Trägertypen die Keilzinkenverbindung als das schwächere "Material" mit der geringeren 5%-Fraktile zu erwarten. Die berechneten zugehörigen Mittelwerte der Biegefestigkeit lagen hingegen nur in zwei Fällen unter den entsprechenden Werten der Träger mit Holzversagen (vgl. *Tabelle 7.6 und 7.7*).

Dieses Verhalten kann mit der größeren Streuung der Biegefestigkeit bei den Trägern mit Keilzinkenversagen erklärt werden, die zum großen Teil auf den Einfluß von produktionsabhängigen Faktoren bei der Herstellung der Keilzinkenverbindungen zurückzuführen ist. Diese Einflußfaktoren, die rechnerisch kaum zu erfassen sind, verhindern eine engere Korrelation zwischen der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen und den Holzeigenschaften der Brettlamellen. Aufgrund dieser, im Vergleich zur Holzfestigkeit, geringeren "Steuerbarkeit" der Keilzinkenfestigkeit liegt die erwartete charakteristische Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen in nahezu allen Fällen unter dem entsprechenden Wert der Träger mit Holzversagen.

Eine größere Streuung wirkt sich weiterhin nachteilig auf die Tragfähigkeit bei größer werdendem Trägervolumen aus, so daß der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart auf die Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen ausgeprägter ist als auf die Träger mit Holzversagen. Dies bedeutet wiederum, daß sich die 5%-Fraktilen der beiden "Materialien" mit zunehmender Trägergröße immer weiter voneinander entfernen, so daß sich die 5%-Fraktile des Endproduktes Brettschichtholz in zunehmendem Maße dem entsprechenden Wert des "Materials" Keilzinkenverbindung annähert.

Somit erscheint es gerechtfertigt, den Verlauf der charakteristischen Biegefestigkeit σ_5 der Brettschichtholzträger ausschließlich mit Hilfe

der 5%-Fraktile $x_{5,KZV}$ des "Materials" Keilzinkenverbindung zu beschreiben.

Für die charakteristische Biegefestigkeit σ_5^0 des gewählten Standardträgers mit einer Höhe von 300 mm gilt in Anlehnung an *Gl(6.3a)* und *Bild 6.2a* folgende Beziehung:

$$\sigma_5^0 = 1,20 \cdot f_{Z,5,KZV} \quad , \quad (8.1)$$

wobei $f_{Z,5,KZV}$ der charakteristischen Keilzinkenzugfestigkeit entspricht. Die charakteristische Biegefestigkeit des Bezugsträgers wird somit ausschließlich mit Hilfe der charakteristischen Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen beschrieben, die ihrerseits maßgeblich von den Holzeigenschaften Rohdichte und Elastizitätsmodul der Brettlamellen sowie von produktionsabhängigen Faktoren bestimmt wird.

Umgekehrt kann mit Hilfe von *Gl(8.1)* auch die charakteristische Keilzinkenzugfestigkeit bestimmt werden, die mindestens erforderlich ist, um Brettschichtholzträger mit einer gewünschten bzw. festgelegten charakteristischen Biegefestigkeit σ_5^0 zu gewährleisten.

In diesem Fall müssen die Leimbaubetriebe, die einen Brettschichtholzträger mit vorgegebener charakteristischer Biegefestigkeit herstellen wollen, nachweisen, daß die von ihnen hergestellten Keilzinkenverbindungen die an ihre Tragfähigkeit gestellten Anforderungen erfüllen.

Mit Hilfe einer solchen Maßnahme dürfte es auch möglich sein, den oft negativen Einfluß der produktionsabhängigen Faktoren einzuschränken. So fällt es einem "guten" Leimbaubetrieb leichter, einen geforderten charakteristischen Festigkeitswert zu erreichen als einem Leimbaubetrieb, der bei der Herstellung der Keilzinkenverbindungen etwas nachlässig ist, und dessen Keilzinkenverbindungen daher neben einer geringeren mittleren Festigkeit auch eine größere Streuung in den Festigkeitswerten aufweisen. Im Gegensatz zur derzeit üblichen Bemessung würden die gewissenhaften Leimbaubetriebe hierdurch "belohnt", während die anderen Betriebe einen Anreiz hätten, es ihnen gleich zu tun, weil sie sonst kein hochwertiges Brettschichtholz herstellen dürften und auch könnten.

Nun stellt sich allerdings die Frage, wie die Leimbaubetriebe eine bestimmte charakteristische Zugfestigkeit nachweisen können. Eine laufende Überprüfung der Keilzinkenzugfestigkeit ist praktisch nicht durchführbar, so daß nur die Möglichkeit verbleibt, die Qualität der

Keilzinkenverbindungen über deren Biegefestigkeit abzuschätzen: kennt man das Verhältnis zwischen Zug- und Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen, so kann deren Zugfestigkeit mit Hilfe von Biegeversuchen an keilgezinkten Brettabschnitten abgeschätzt werden.

8.2 Bisherige Untersuchungen

Auf der Grundlage der in [21] beschriebenen Biegeversuche und der in [17] beschriebenen Zugversuche mit keilgezinkten Brettabschnitten ergeben sich folgende Verhältniswerte der 5%-Fraktilen und der Mittelwerte:

$$\frac{f_{Z,5,KZV}}{f_{B,5,KZV}} = \frac{23,4}{36,3} = 0,64$$

und

$$\frac{f_{Z,m,KZV}}{f_{B,m,KZV}} = \frac{35,0}{50,6} = 0,69$$

Diese Werte gelten für zwei repräsentative Stichproben mit jeweils 845 bzw. 239 Versuchswerten, wobei an die Holzeigenschaften der miteinander verbundenen Bretter keine besonderen Anforderungen gestellt wurden. Daher ist es durchaus möglich, daß diese Verhältniswerte nicht auf "homogenere" Keilzinkenverbindungen übertragbar sind, bei denen die Holzeigenschaften der beiden Stoßhälften, z.B. infolge einer maschinellen Holzsortierung, nicht zu sehr voneinander abweichen.

So ergaben die Versuche von RADOVIC/ROHLFING [46] mit keilgezinkten Furnierschichtholzproben mittlere Zugfestigkeiten, die nur etwa 21 - 28% unter den mittleren Biegefestigkeiten lagen, und auch JOHANSSON [30], [31] ermittelte für das Verhältnis der mittleren Festigkeiten Werte zwischen 0,70 und 0,79. Eine zuverlässige Aussage über das Verhältnis der beiden 5%-Fraktilen war jedoch nicht möglich, weil die Anzahl der jeweils durchgeführten Versuche zu gering war.

Daher wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen mit Hilfe von systematischen und umfangreichen Versuchen untersucht.

8.3 Eigene Versuche

8.3.1 Probenentnahme

Zur Untersuchung des Verhältnisses Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen ist es von großer Wichtigkeit, daß die Prüfkörper zur Ermittlung der Zug- und Biegefestigkeit vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Dies betrifft sowohl die Holzeigenschaften als auch die herstellungsbedingten Faktoren. Auf der Grundlage dieser Überlegungen wurden die Proben wie nachfolgend beschrieben entnommen bzw. hergestellt: Aus insgesamt vier deutschen Holzleimbaubetrieben¹ wurden etwa 4 m lange Bretter entnommen und deren Rohdichte mittels Wägung und Längs - Elastizitätsmodul mit Hilfe von Schwingungsmessungen [28] zerstörungsfrei bestimmt. Anschließend wurde jedes Brett je nach Lage der Äste in zwei oder vier Abschnitte zersägt. Die Zuordnung der Brettabschnitte zu den Zug- und Biegeprüfkörpern erfolgte anhand des in *Bild 8.1* dargestellten Schemas. Mit Hilfe dieses Verfahrens war gewährleistet, daß ein Probenpaar nahezu identische Holzeigenschaften aufwies.

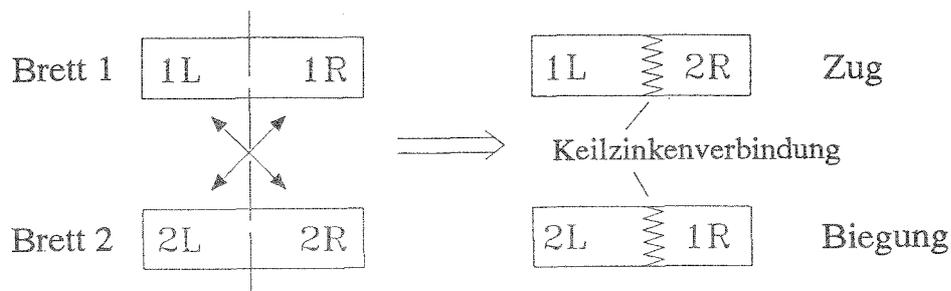


Bild 8.1: Herstellungsprinzip der Versuchskörper

¹ Den Firmen Christian Burgbacher Holzwerke in Trossingen, J. und W. Derix Holzleimbau in Niederkrüchten, Anton Hess Holzleimbau in Miltenberg und Fürst zu Fürstenberg Holzleimbau in Donaueschingen sei nochmals für die freundliche Unterstützung bei diesen Untersuchungen gedankt.

Die Herstellung und Verleimung der Keilzinkenverbindungen erfolgte in jedem Leimbaubetrieb innerhalb einer Stunde, so daß auch die Herstellungsbedingungen (Schärfe der Fräser, Leim, Preßdruck u.ä.) für alle Prüfkörper weitestgehend identisch waren.

Um zu untersuchen, ob das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen von den Holzeigenschaften der keilgezinkten Bretter beeinflußt wird, wurden folgende drei Versuchsreihen geprüft:

Tabelle 8.1: Anforderungen an die Holzeigenschaften der keilgezinkten Bretter

Versuchsreihe	Anforderungen an die Holzeigenschaften der Bretter
I	keine; beliebige Bretter
II	$11500 \text{ N/mm}^2 \leq E^{1)} \leq 13500 \text{ N/mm}^2$
III	$15000 \text{ N/mm}^2 \leq E^{1)}$

¹⁾ mittlerer Längs-Elastizitätsmodul

Die Prüfkörper wiesen die in Deutschland gebräuchlichsten Keilzinkenprofile (15 mm- und 20 mm-Profil) auf. Dies sollte Aufschluß darüber geben, ob das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen vom Keilzinkenprofil abhängig ist. Hierzu wurden für jedes Keilzinkenprofil Proben aus jeweils zwei Leimbaubetrieben entnommen.

Von jeder Firma wurden für jede Versuchsreihe je 30 Zug- und Biegeprüfkörper hergestellt, so daß sich die Anzahl der entnommenen Proben zu insgesamt 720 ergibt (2 Profile x 2 Firmen x 3 Versuchsreihen x 2 Festigkeitsprüfungen x 30 Prüfkörper).

8.3.2 Biegeversuche

Die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen wurde mit Hilfe des in Bild 8.2 dargestellten Versuchsaufbaues ermittelt:

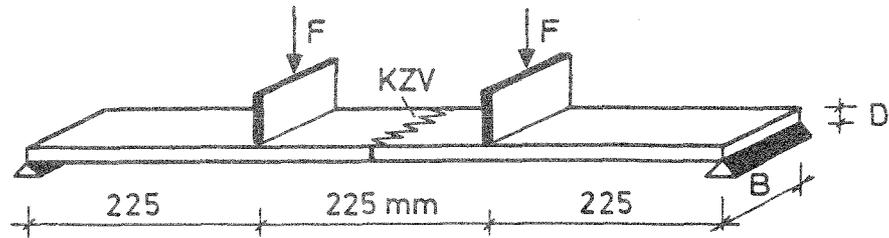


Bild 8.2: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen

Die rechnerische Biegefestigkeit f_B wurde ohne Berücksichtigung des Verschwächungsgrades im Zinkengrund auf den Bruttoquerschnitt bezogen:

$$f_B = 1350 \frac{F_{\max}}{B D^2} \text{ in N/mm}^2 \quad (8.2)$$

mit

- F_{\max} = aufnehmbare Last in N,
- B = Brettbreite in mm,
- D = Brettdicke in mm.

8.3.3 Zugversuche

Die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen wurde mit Hilfe der in Bild 8.3 dargestellten Versuchsvorrichtung bestimmt.

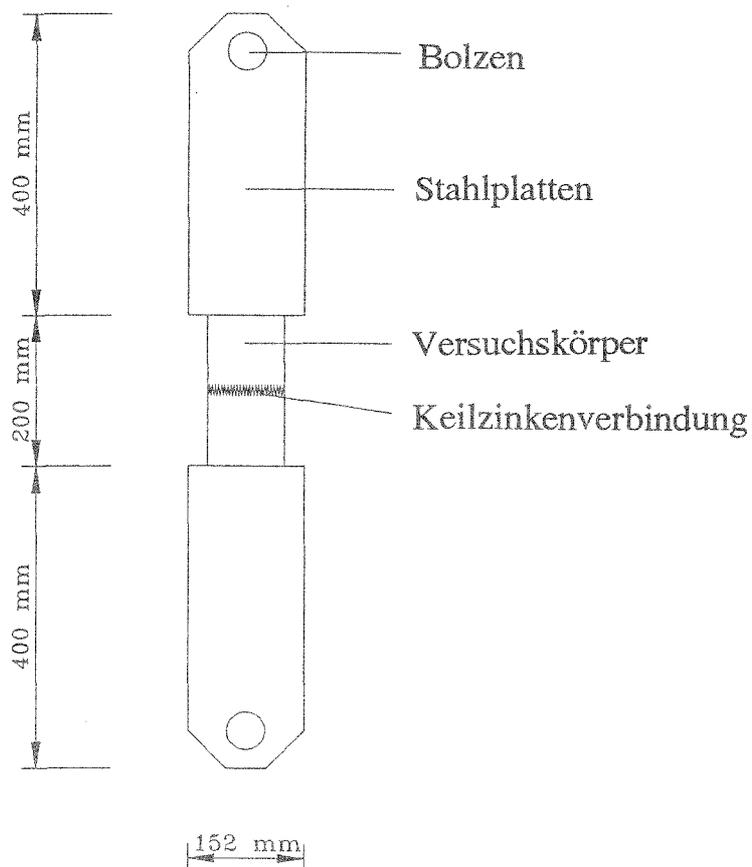


Bild 8.3: Vorrichtung zur Ermittlung der Keilzinken- Zugfestigkeit

Die rechnerische Zugfestigkeit f_Z wurde ohne Berücksichtigung des Schwächungsgrades im Zinkengrund mit Hilfe der folgenden Gleichung ermittelt:

$$f_Z = \frac{F_{\max}}{BD} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (8.3)$$

mit:

- F_{\max} = aufnehmbare Last in N
- B = Brettbreite in mm
- D = Brettdicke in mm

8.4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

8.4.1 Allgemeines

Insgesamt 23 Proben gingen bei der Herstellung der Keilzinkenverbindungen verloren (Kappen an falscher Stelle, "Zerstörung" während des Preßvorganges aufgrund zu geringer Länge der keilzuzinkenden Brettabschnitte). Weitere Prüfkörper wurden von der Auswertung ausgeschlossen, weil sie z.B. im Bereich großer Äste und nicht im Bereich der Keilzinkenverbindungen versagten (vgl. *Bild 8.4*). Somit wurden bei der Auswertung der Versuchsergebnisse insgesamt 673 Proben berücksichtigt.

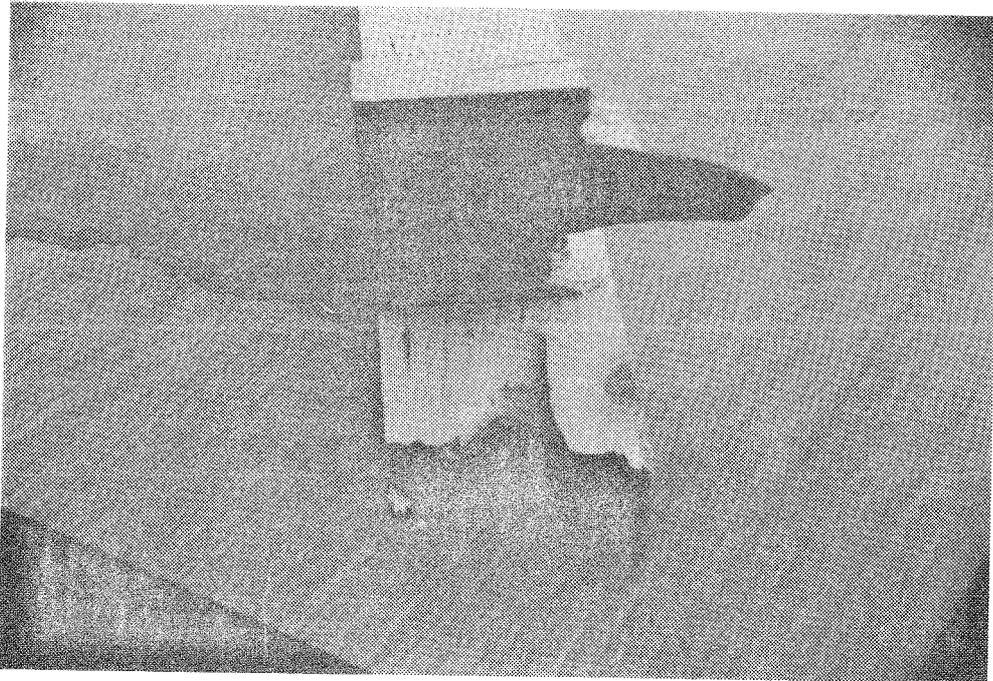


Bild 8.4: Prüfkörper mit Versagen im Einspannbereich durch großen Ast (Zugversuch).

Bei den Versuchen wurden neben der erreichten Höchstlast auch das Bruchbild der Proben aufgenommen (siehe hierzu auch *Abschnitt 8.4.4*). Beim Vergleich der Bruchbilder der Zugproben mit denen der Biegeprüfkörper zeigte sich die Wirksamkeit des in *Abschnitt 8.3.1* beschriebenen Verfahrens zur Probenentnahme bzw. -herstellung: etwa 2/3 der Probenpaare wies ein nahezu identisches Bruchverhalten auf. Dies bedeutet, daß wenn ein Prüfkörper im Zugversuch z.B. durch Herausziehen der Zinken (Scherbruch in den Flanken) versagte, daß

dann auch sein Gegenstück im Biegeversuch das gleiche Bruchbild aufwies. Nur in etwa 5% der Fälle wiesen die Probenpaare gänzlich unterschiedliches Bruchverhalten auf. Dies konnte aber in den meisten Fällen auf die unterschiedliche Beanspruchung der Prüfkörper im Zug- und im Biegeversuch zurückgeführt werden (z.B. größerer Einfluß der Äste im Zugversuch als im Biegeversuch).

8.4.2 Alle Proben

8.4.2.1 Holzeigenschaften

EHLBECK et al [21] zeigten bei ihren Untersuchungen, daß die Tragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung in der Regel von dem Brett mit den "schlechteren" Holzeigenschaften bestimmt wird, d.h. das Versagen einer Keilzinkenverbindung wird durch einen Bruch im Brett mit der geringeren Rohdichte und/oder Elastizitätsmodul ausgelöst. Aus diesem Grunde benutzten *Ehlbeck et al* bei der Auswertung ihrer Versuche den jeweils kleineren Wert der Rohdichte (ρ_{\min}) und des Elastizitätsmoduls (E_{\min}) der jeweils keilgezinkten Brettabschnitte. In Anlehnung an die dort gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen erfolgte auch bei den hier beschriebenen Versuchen die Auswertung auf die gleiche Weise. Dies diente auch der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse. In *Tabelle 8.2a und b* sind für jede Versuchsreihe und Firma die Mittelwerte und die zugehörigen Variationskoeffizienten für die Rohdichte ρ_{\min} und den Elastizitätsmodul E_{\min} angegeben.

Tabelle 8.2a: Mittelwerte m [N/mm^2] und Variationskoeffizienten v von E_{\min}

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>							
m	11146	11391	12416	10750	11308	11680	11439
v	0,20	0,14	0,14	0,14	0,17	0,15	0,16
<u>Reihe II</u>							
m	12403	11932	12299	12236	12167	12274	12223
v	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04
<u>Reihe III</u>							
m	15868	15197	16276	15497	15528	15925	15724
v	0,04	0,06	0,07	0,05	0,05	0,07	0,06

Tabelle 8.2b: Mittelwerte m [kg/m^3] und Variationskoeffizienten v von ρ_{\min}

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>							
m	418	428	457	410	423	426	429
v	0,08	0,07	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08
<u>Reihe II</u>							
m	423	435	462	432	428	447	438
v	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
<u>Reihe III</u>							
m	473	492	538	478	482	509	495
v	0,05	0,03	0,06	0,06	0,05	0,08	0,07

Aus diesen Tabellen ist folgendes zu erkennen:

- die Proben der Reihe II weisen etwas höhere Mittelwerte für ρ_{\min} und E_{\min} auf als Reihe I. Dies ist auf die Auswahlkriterien der Proben zurückzuführen (*Tabelle 8.1*): da bei Reihe I keine Anforderungen an die Holzeigenschaften der Bretter gestellt wurden, ist es durchaus möglich, daß z.B. ein Brett mit sehr niedrigem Elastizitätsmodul und ein Brett mit sehr hohem Elastizitätsmodul keilgezinkt wurden. Da in die Zusammenstellung in *Tabelle 8.2* nur der kleinere Wert des Elastizitätsmoduls aufgenommen wurde wird deutlich, daß durch diese "Ausreißer" die Mittelwerte für ρ_{\min} und E_{\min} bei Reihe I geringer ausfallen als bei Reihe II;
- bei Reihe III sind aufgrund der Anforderungen an die Holzeigenschaften (nur Bretter mit hohem Elastizitätsmodul) die Mittelwerte für ρ_{\min} und E_{\min} naturgemäß deutlich höher als bei Reihe I und II;
- die Streuungen (Variationskoeffizienten) der Holzeigenschaften sind bei Reihe II und III deutlich geringer als bei Reihe I. Dieses Ergebnis kann ebenfalls mit den Auswahlkriterien der Bretter erklärt werden und hat vermutlich die größten Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen und somit auch der Brettschichtholzträger: da die Holzeigenschaften der Bretter mit der Festigkeit einer Keilzinkenverbindung korreliert sind, ist bei geringerer Streuung der Holzeigenschaften auch eine geringere Streuung der Festigkeitswerte zu erwarten. Und da weiterhin die charakteristische Festigkeit (5%-Fraktile) bei gleicher mittlerer Festigkeit mit geringer werdender Streuung ansteigt, wirkt sich eine Reduzierung der Streubreite bei den Holzeigenschaften der Bretter auch günstig auf die bei der Bemessung maßgebende 5%-Fraktile der Festigkeit aus.

8.4.2.2 Festigkeiten

In *Tabelle 8.3a und b* sind die Ergebnisse der Zug- und Biegeversuche zusammengefaßt. Hieraus sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- sowohl bei den Zug- als auch bei den Biegeversuchen liegen bei Reihe II die Mittelwerte der Festigkeiten etwas über den entsprechenden Werten der Reihe I. Dies kann, wie im vorigen Abschnitt bereits angedeutet, mit den im Mittel "besseren" Holzeigenschaften der Bretter von Reihe II erklärt werden (vgl. ρ_{\min} und E_{\min} in *Tabelle 8.2*);

- die mittleren Festigkeitswerte der Reihe III liegen etwa 20% über den entsprechenden Werten der Reihe I und II. Dieses Ergebnis kann ebenfalls mit den Holzeigenschaften der Bretter erklärt werden, die aufgrund der Auswahlkriterien bei Reihe III deutlich "besser" waren als bei den beiden anderen Versuchsreihen. Diese Versuche bestätigen somit die in [21] aufgezeigte Korrelation zwischen der Festigkeit von Keilzinkenverbindungen und den Holzeigenschaften der miteinander verbundenen Bretter;
- die Streuungen der Festigkeitswerte (Variationskoeffizienten) sind bei Reihe II und III deutlich geringer als bei Reihe I. Auch dieses Ergebnis war aufgrund der im vorigen Abschnitt gemachten Ausführungen über die Holzeigenschaften zu erwarten;
- die Keilzinkenverbindungen mit einem 15 mm - Profil weisen im Mittel 5 - 10% höhere Festigkeiten auf als die Proben mit einem 20 mm - Profil. Diese Versuche bestätigen somit die Untersuchungen von EHLBECK et al [21], bei denen der positive Einfluß der "besseren" Profileigenschaften des 15 mm - Profils auf die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen nachgewiesen werden konnte.

Tabelle 8.3a: Ergebnisse der Zugversuche (Mittelwert m [N/mm^2], Variationskoeffizient v , Probenzahl N); alle Proben

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>							
m	37,1	33,5	35,3	29,7	35,4	32,5	33,9
v	0,27	0,23	0,16	0,19	0,26	0,20	0,23
N	30	27	30	29	57	59	116
<u>Reihe II</u>							
m	38,8	36,0	35,1	33,1	37,3	34,3	35,7
v	0,15	0,16	0,22	0,15	0,16	0,19	0,18
N	27	29	30	28	56	58	114
<u>Reihe III</u>							
m	48,8	42,9	42,7	34,6	45,9	38,9	42,5
v	0,17	0,14	0,16	0,11	0,17	0,18	0,19
N	28	28	29	25	56	54	110

Tabelle 8.3b: Ergebnisse der Biegeversuche (Mittelwert m [N/mm²], Var.-koeff. v , Probenzahl N); alle Proben

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>							
m	51,1	48,2	51,6	45,2	49,6	48,7	49,2
v	0,17	0,14	0,16	0,15	0,16	0,17	0,16
N	28	30	30	25	58	55	113
<u>Reihe II</u>							
m	54,7	48,4	54,2	47,0	52,1	50,7	51,3
v	0,09	0,09	0,12	0,10	0,11	0,13	0,12
N	29	21	30	29	50	59	109
<u>Reihe III</u>							
m	66,3	58,9	63,1	54,0	62,6	59,0	60,8
v	0,09	0,10	0,13	0,07	0,11	0,13	0,13
N	28	28	30	25	56	55	111

8.4.2.3 Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit

Einzelwerte, Probenpaare

Im Rahmen dieses Abschnittes soll das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit der einzelnen Probenpaare untersucht werden. Insgesamt standen hierzu 313 Probenpaare zur Verfügung.

In Tabelle 8.4 sind die Ergebnisse für jede Versuchsreihe, Firma und Keilzinkenprofil dargestellt.

Tabelle 8.4: Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit (Mittelwert m , Variationskoeffizient v , Anzahl der Werte N); Einzelwerte

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>							
m	0,74	0,69	0,69	0,67	0,71	0,68	0,70
v	0,24	0,16	0,16	0,21	0,21	0,18	0,20
N	28	27	30	25	55	55	110
<u>Reihe II</u>							
m	0,72	0,73	0,65	0,71	0,72	0,68	0,70
v	0,18	0,19	0,25	0,20	0,18	0,22	0,20
N	26	16	30	28	42	58	100
<u>Reihe III</u>							
m	0,74	0,73	0,68	0,65	0,73	0,67	0,70
v	0,16	0,14	0,18	0,12	0,15	0,16	0,16
N	26	27	29	21	53	50	103

Aus dieser Tabelle sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen ist beim 15mm - Profil geringfügig höher als beim 20mm-Profil. Dies deutet darauf hin, daß die günstigeren Profileigenschaften des 15mm - Profils sich eher auf die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung auswirkt als auf deren Biegefestigkeit. Insbesondere bei Reihe III, bei der die Prüfkörper vermehrt durch ein Scherversagen in den Zinkenflanken (Herausziehen der Finger) zu Bruch gehen (siehe hierzu auch *Abschnitt 8.4.3.2*) wird dies deutlich;
- die Streuung der Verhältniswerte Zug-/Biegefestigkeit ist bei Reihe III geringer als bei Reihe I und II;
- das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen ist nicht von den Holzeigenschaften der Bretter abhängig: die mittleren Verhältniswerte sind für alle Versuchsreihen praktisch identisch.

In Bild 8.5 sind die Werte für das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen in Form eines Häufigkeitsdiagrammes dargestellt. In diesem Diagramm sind alle Versuchswerte ohne Unterscheidung nach Versuchsreihe, Firma oder Keilzinkenprofil enthalten. Dieses Bild veranschaulicht, in welchem großem Bereich die Einzelwerte schwanken.

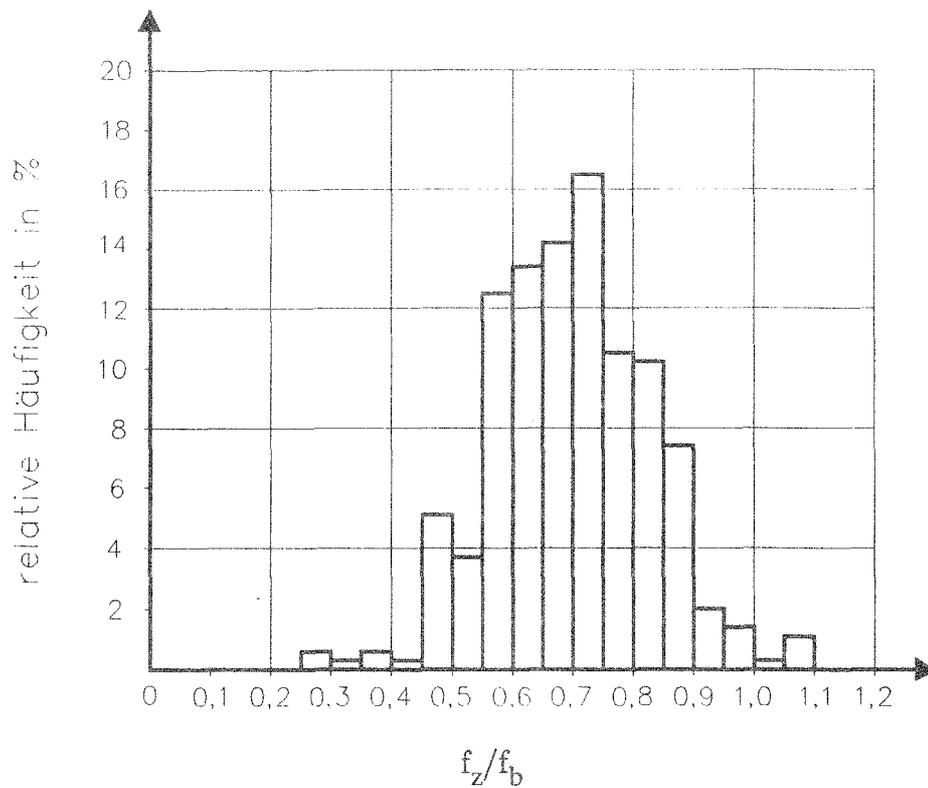


Bild 8.5: Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit f_z/f_B von Keilzinkenverbindungen; Einzelwerte

Charakteristische Werte

Ziel der hier durchgeführten Versuche ist es, das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen zu bestimmen, um so in der Lage zu sein, die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen auf der Grundlage der einfacher zu bestimmenden Biegefestigkeit abschätzen zu können. Ist dies gewährleistet, so kann mit Hilfe der Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen auch die zu erwartende Biegefestigkeit der zugehörigen Brettschichtholzträger abgeschätzt werden, die ja bekanntlich sehr stark von der Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen abhängig ist. Da im Zusammenhang mit der Bemessung immer die charakteristischen Festigkeiten (5%-Fraktilen) maßgebend sind, wurde mit Hilfe der durchgeführten Versuche auch das Verhältnis charakteristische Zugfestigkeit/charakteristische Biegefestigkeit untersucht.

Hierbei stellte sich die Frage: wie bestimme ich die 5%-Fraktile, wenn pro Versuchsreihe und Firma nur maximal 30 Versuchswerte zur Verfügung stehen? Im Rahmen der Auswertungen wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der 5%-Fraktile benutzt (Gauß-Normalverteilung, Student-t-Verteilung, Weibull-Verteilung, "Abzählen"), die naturgemäß unterschiedliche Werte für die charakteristischen Festigkeiten ergaben. Das Verhältnis charakteristische Zugfestigkeit/charakteristische Biegefestigkeit erwies sich hierbei als relativ unempfindlich gegenüber diesen unterschiedlichen Verfahren, so daß die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung ermittelt wurden.

In Tabelle 8.5a-c sind für jede Versuchsreihe und Firma die charakteristischen Festigkeitswerte und die zugehörigen Verhältniswerte angegeben. Aus dieser Tabelle sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- das Verhältnis charakteristische Zugfestigkeit/ charakteristische Biegefestigkeit beträgt im Mittel 0,60 und ist somit geringer als das mittlere Verhältnis der Einzelwerte aus Tabelle 8.4. Dies ist auf die unterschiedlichen Streuungen der Versuchswerte bei Zug- und Biegebeanspruchung zurückzuführen (siehe Tabelle 8.3a und b): die größere Streuung (Variationskoeffizient) der Zugfestigkeit führt im Vergleich zur Biegefestigkeit zu einem geringeren charakteristischen Festigkeitswert, so daß das Verhältnis der charakteristischen Festigkeiten kleiner ist als das Verhältnis der Mittelwerte;

- die charakteristischen Festigkeitswerte der Reihe II liegen deutlich über den zugehörigen Werten der Reihe I. Dies verdeutlicht den positiven Einfluß einer geringeren Streuung der Versuchswerte, die in diesem Fall auf eine Reduzierung der Streubreite der Holzeigenschaften der Bretter zurückzuführen ist: obwohl die mittleren Festigkeitswerte der Reihe II nur geringfügig über denen der Reihe I liegen, führt die alleinige Eingrenzung der Holzeigenschaften zu höheren charakteristischen Festigkeitswerten. Eine solche Maßnahme ist aber nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung zu erreichen;
- die charakteristischen Festigkeitswerte der Reihe III liegen zwischen 30 und 40% über den entsprechenden Werten der Reihe II. Berücksichtigt man, daß die Proben der Versuchsreihe I den Keilzinkenverbindungen entsprechen, wie sie z.Zt. in den deutschen Leimbaubetrieben hergestellt werden (visuelle Holzsortierung, ohne besondere Anforderungen an die Rohdichte oder den Elastizitätsmodul der Bretter), so zeigt dieser Vergleich die Möglichkeiten bzw. das Potential einer maschinellen Holzsortierung auf: aufgrund der bereits mehrfach nachgewiesenen Abhängigkeit zwischen Keilzinkenfestigkeit und Holzeigenschaften der Bretter ist es nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung auf der Grundlage der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls möglich, hohe Festigkeiten zu erzielen und vor allem zu gewährleisten. In Anbetracht der engen Abhängigkeit zwischen der Keilzinkenfestigkeit und der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern, ist diese Aussage von größter Bedeutung;
- aus *Tabelle 8.5c* ist keine Abhängigkeit des Verhältnisses charakteristische Zugfestigkeit/charakteristische Biegefestigkeit von den Holzeigenschaften (Reihe I-III) oder dem Keilzinkenprofil zu erkennen. Somit kann dieser Verhältniswert unabhängig von etwaigen Sortierklassen oder Fräsertypen mit etwa 0,6 angegeben werden.

Tabelle 8.5a: Charakteristische Zugfestigkeit $f_{Z,5,KZV}$ [N/mm²] von Keilzinkenverbindungen; alle Proben

$f_{Z,5,KZV}$	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil	Profil	Alle
					15 mm	20 mm	
<u>Reihe I</u>	20,4	20,8	25,8	20,3	20,3	22,1	20,9
<u>Reihe II</u>	29,3	26,6	22,2	25,1	27,7	23,3	25,1
<u>Reihe III</u>	35,2	31,9	31,2	28,3	33,0	27,4	29,9

Tabelle 8.5b: Charakteristische Biegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ [N/mm²] von Keilzinkenverbindungen; alle Proben

$f_{B,5,KZV}$	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil	Profil	Alle
					15 mm	20 mm	
<u>Reihe I</u>	37,0	36,7	37,7	34,0	36,7	35,0	35,9
<u>Reihe II</u>	46,8	41,5	43,9	39,1	43,0	39,8	41,2
<u>Reihe III</u>	56,7	49,0	49,6	48,1	51,1	46,0	48,2

Tabelle 8.5c: Verhältnis $f_{Z,5,KZV} / f_{B,5,KZV}$; alle Proben

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil	Profil	Alle
					15 mm	20 mm	
<u>Reihe I</u>	0,55	0,57	0,68	0,60	0,55	0,63	0,58
<u>Reihe II</u>	0,63	0,64	0,50	0,64	0,64	0,59	0,61
<u>Reihe III</u>	0,62	0,65	0,63	0,59	0,65	0,60	0,60

8.4.3 Proben mit überwiegendem Versagen im Keilzinkenbereich

8.4.3.1 Allgemeines

Wie bereits im *Abschnitt 8.4.1* beschrieben, wurde bei den Versuchen auch das Bruchbild der Prüfkörper aufgezeichnet. Hierbei zeigte sich, daß bei den Biegeproben das Versagen in der überwiegenden Zahl aller Fälle im Bereich der Keilzinkenverbindungen eintrat, während bei den Zugproben die Reißlinie häufiger auch durch Äste verlief, die außerhalb des Keilzinkenbereiches oder im Einspannbereich lagen. Da das Versagen der Prüfkörper immer schlagartig eintrat, war es nicht möglich festzustellen, ob das Versagen von der Keilzinkenverbindung ausging und sich in den Bereich der Äste fortpflanzte oder umgekehrt.

Um zu untersuchen, inwieweit das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen hierdurch beeinflußt wird, wurden die Versuche nochmals ausgewertet, wobei diesmal nur solche Proben berücksichtigt wurden, bei denen das Versagen zu mindestens 80% im Keilzinkenbereich eintrat.

8.4.3.2 Festigkeiten

In *Tabelle 8.6a und b* sind die Versuchsergebnisse zusammengefaßt. Aus diesen Tabellen ist zu erkennen, daß sich die Einschränkung "Versagen mindestens zu 80% im Keilzinkenbereich" wie erwartet eher auf die Zugfestigkeit auswirkt als auf die Biegefestigkeit: während die mittlere Zugfestigkeit dieser Proben in allen Fällen höher ist als die aller Proben (vgl. *Tabelle 8.3a*), blieb die Biegefestigkeit nahezu konstant.

Tabelle 8.6a: Ergebnisse der Zugversuche (Mittelwert m [N/mm^2], Variationskoeffizient v , Probenzahl N); Proben mit mindestens 80% Versagen im Keilzinkenbereich

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>							
m	39,7	35,1	36,0	31,9	38,0	34,5	36,0
v	0,24	0,22	0,15	0,16	0,24	0,17	0,21
N	19	12	25	14	31	39	70
<u>Reihe II</u>							
m	41,2	38,8	36,4	33,1	40,3	34,9	36,9
v	0,13	0,13	0,20	0,13	0,13	0,18	0,17
N	17	9	24	20	26	44	70
<u>Reihe III</u>							
m	50,4	43,8	44,5	34,7	47,7	39,9	43,4
v	0,17	0,12	0,12	0,10	0,17	0,17	0,19
N	20	14	22	19	34	41	75

Tabelle 8.6b: Ergebnisse der Biegeversuche (Mittelwert m [N/mm^2], Variationskoeffizient v , Probenzahl N); Proben mit mindestens 80% Versagen im Keilzinkenbereich

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>							
m	52,7	49,9	51,5	45,3	51,4	48,6	49,9
v	0,16	0,14	0,17	0,15	0,15	0,18	0,16
N	24	22	27	24	46	51	97
<u>Reihe II</u>							
m	55,5	48,3	55,4	46,9	52,8	51,3	51,9
v	0,08	0,06	0,10	0,10	0,10	0,13	0,12
N	22	13	26	25	35	51	86
<u>Reihe III</u>							
m	67,5	59,7	63,8	54,0	63,7	59,5	61,5
v	0,08	0,10	0,13	0,06	0,11	0,13	0,12
N	23	22	27	21	45	48	93

8.4.3.3 Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit

Da, wie in *Abschnitt 8.4.2.3*, für die Bemessung das Verhältnis der charakteristischen Zugfestigkeit zur charakteristischen Biegefestigkeit von vorrangiger Bedeutung ist soll auch nur dieser Verhältniswert hier untersucht werden. Auf eine Darstellung der Einzelwerte (Probenpaare) wird daher verzichtet.

In *Tabelle 8.7a-c* sind für jede Versuchsreihe und Firma die charakteristischen Zug- und Biegefestigkeiten unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung sowie die zugehörigen Verhältniswerte angegeben. Anhand dieser Zahlenwerte ergibt sich ein etwas höherer Wert für das Verhältnis charakteristische Zugfestigkeit/charakteristische Biegefestigkeit als dies bei allen Proben der Fall ist (vgl. *Tabelle 8.5c*). Eine Abhängigkeit vom Keilzinkenprofil oder von den Holzeigenschaften ist aber auch hier nicht zu erkennen, so daß anhand dieser Versuchsauswertung das Verhältnis der charakteristischen Festigkeitswerte mit einem konstanten Wert von etwa 0,65 angegeben werden kann.

8.4.4 Einfluß der Versagensart

Die Untersuchungen von EHLBECK et al. [21] zeigten, daß bei keilgezinkten Brettabschnitten mit "schlechten" Holzeigenschaften (niedrige Rohdichte bzw. Elastizitätsmodul) in der Regel ein Biegebruch im Zinkengrund (vgl. *Bild 8.6*) eintrat, während bei Keilzinkenverbindungen mit hochwertigen Brettern vermehrt ein Scherbruch entlang der Zinkenflanken (siehe *Bild 8.7*) zu beobachten war. Bei Keilzinkenverbindungen mit Brettern durchschnittlicher Qualität traten neben diesen beiden Versagensarten selbst auch verschiedene Mischformen auf (siehe *Bild 8.8*).

Tabelle 8.7a: Charakteristische Zugfestigkeit $f_{Z,5,KZV}$ [N/mm²] der Keilzinkenverbindungen; Proben mit mindestens 80% Versagen im Keilzinkenbereich

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>	23,9	22,3	26,9	23,3	22,9	25,1	23,6
<u>Reihe II</u>	32,4	30,2	24,4	26,1	31,6	24,6	26,3
<u>Reihe III</u>	35,9	34,9	35,5	28,7	34,2	28,8	29,7

Tabelle 8.7b: Charakteristische Biegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ [N/mm²] der Keilzinkenverbindungen; Proben mit mindestens 80% Versagen im Keilzinkenbereich

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>	39,2	38,7	36,9	33,9	38,9	34,6	36,4
<u>Reihe II</u>	48,1	43,4	46,5	38,9	44,1	40,3	41,7
<u>Reihe III</u>	58,9	50,1	50,5	48,9	52,5	46,4	48,9

Tabelle 8.7c: Verhältnis $f_{Z,5,KZV}/f_{B,5,KZV}$; Proben mit mindestens 80% Versagen im Keilzinkenbereich

	Firma 1	Firma 2	Firma 3	Firma 4	Profil 15 mm	Profil 20 mm	Alle
<u>Reihe I</u>	0,61	0,58	0,73	0,69	0,59	0,73	0,65
<u>Reihe II</u>	0,68	0,70	0,52	0,67	0,72	0,61	0,63
<u>Reihe III</u>	0,61	0,70	0,70	0,59	0,65	0,62	0,61

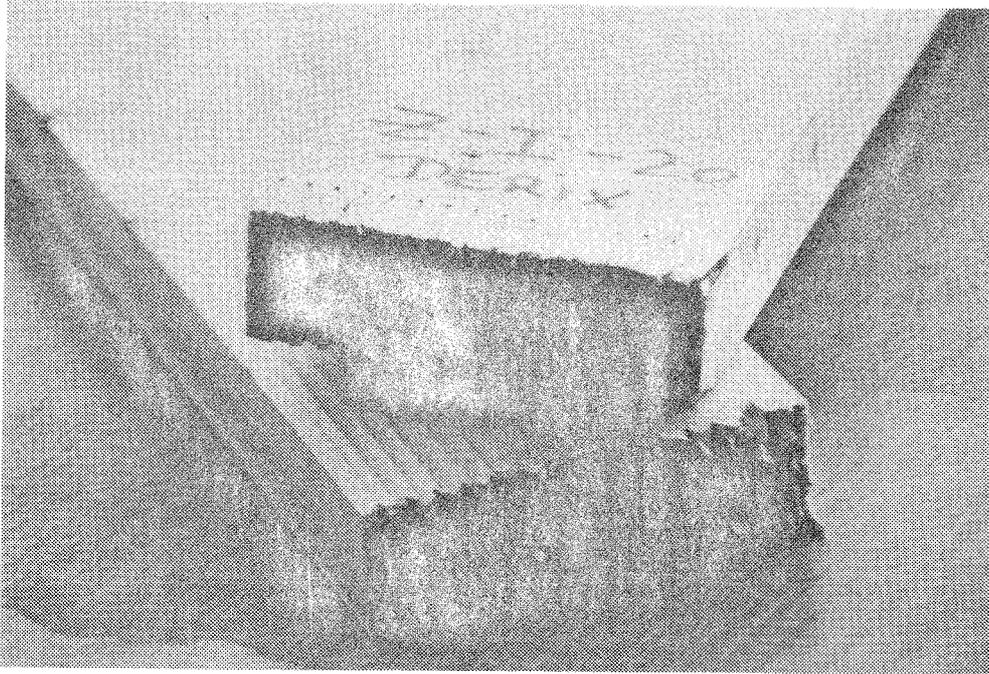


Bild 8.6: Keilzinkenverbindung mit Holzbruch im Zinkengrund

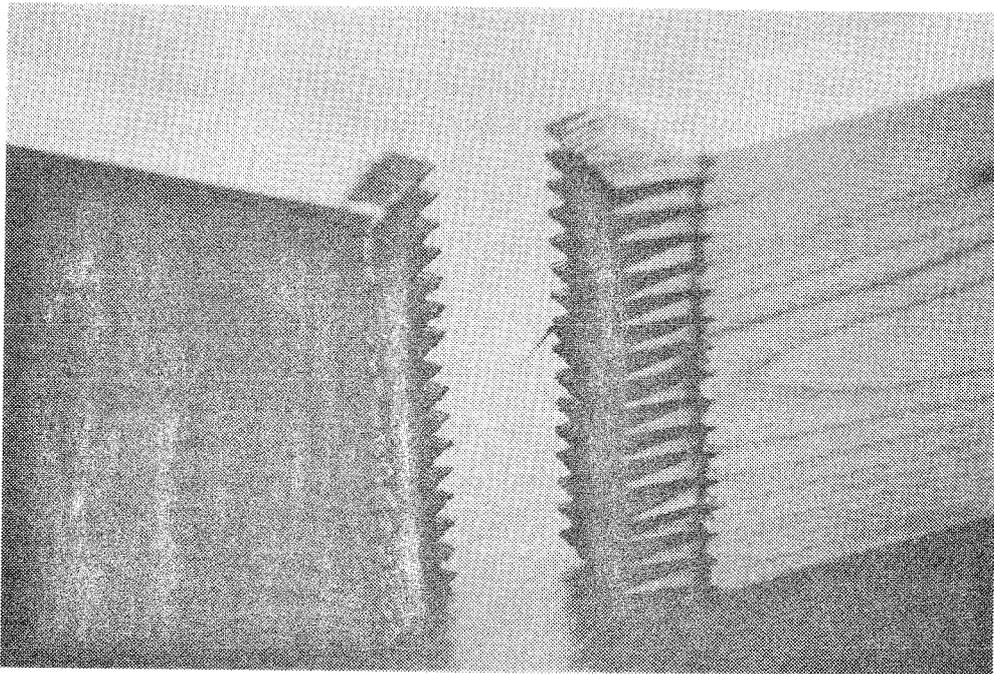


Bild 8.7: Keilzinkenverbindung mit Scherbruch in den Zinkenflanken

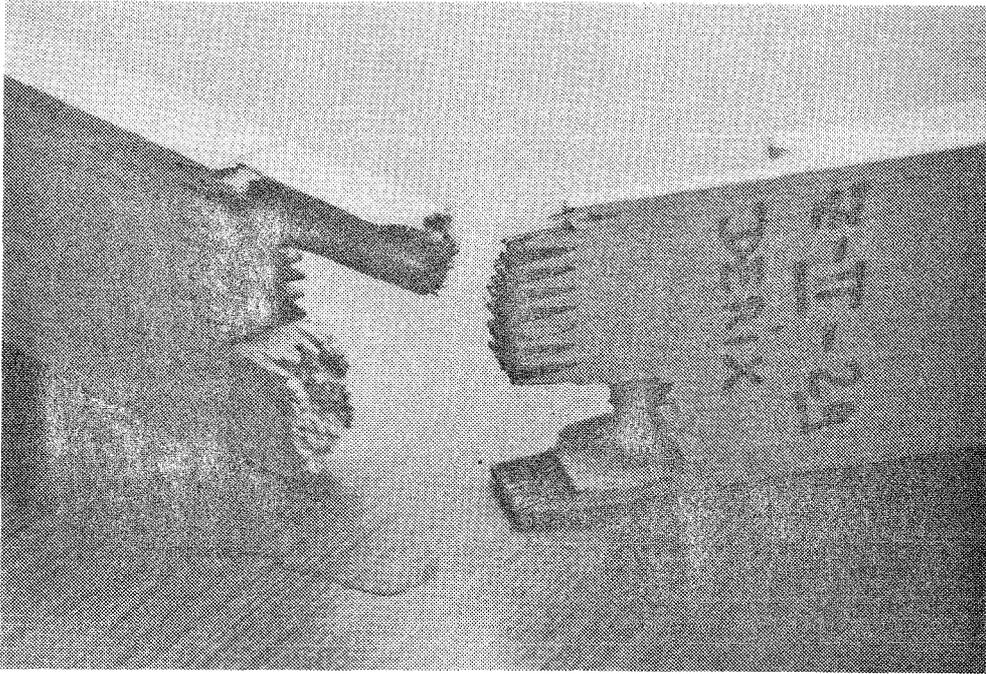


Bild 8.8: Keilzinkenverbindung mit Mischbruch

Diese Tendenz, daß mit steigender Rohdichte und Elastizitätsmodul die Wahrscheinlichkeit eines Scherbruches entlang der Zinkenflanken wächst, bestätigte sich auch bei den hier durchgeführten Versuchen: Aus *Tabelle 8.8a und b* ist zu erkennen, daß bei Versuchsreihe III (Bretter mit hohem Elastizitätsmodul) deutlich mehr Proben durch ein Herausziehen der Zinken versagten als bei den Reihen I und II (Bretter mit durchschnittlichem Elastizitätsmodul). Weiterhin ist aus dieser Tabelle zu erkennen, daß die Keilzinkenverbindungen mit Scherver-sagen in den Zinkenflanken im Mittel höhere Festigkeiten aufweisen als die Proben mit Holzbruch im Zinkengrund. Auch diese Tendenz, die, wie eben beschrieben, auf den Einfluß der Holzeigenschaften zurückzuführen ist, bestätigt die Erkenntnisse, die in [21] gewonnen wurden.

Tabelle 8.8a: Ergebnisse der Zugversuche (Mittelwert m [N/mm^2],
Variationskoeffizient v , Probenzahl N)

	mind. 80% Schерbruch in den Zinkenflanken			mind. 80% Holzbruch im Zinkengrund			Mischbruch		
	15mm	20mm	Alle	15mm	20mm	Alle	15mm	20mm	Alle
<u>Reihe I</u>									
m	41,0	35,5	37,6	33,1	30,7	32,0	38,7	35,3	36,8
v	0,14	0,22	0,19	0,26	0,19	0,23	0,28	0,14	0,22
N	6	10	16	40	35	75	8	10	18
<u>Reihe II</u>									
m	45,6	34,0	36,6	35,1	32,8	34,0	40,7	35,9	38,5
v	0,08	0,15	0,19	0,16	0,20	0,18	0,11	0,20	0,16
N	2	7	9	35	29	64	19	16	35
<u>Reihe III</u>									
m	48,9	39,3	43,7	42,3	41,8	42,1	44,1	36,3	41,3
v	0,17	0,22	0,22	0,14	0,09	0,12	0,17	0,23	0,21
N	18	21	39	18	11	29	14	8	22

Tabelle 8.8b: Ergebnisse der Biegeversuche (Mittelwert m [N/mm^2], Variationskoeffizient v , Probenzahl N)

	mind. 80% Scherbruch in den Zinkenflanken			mind. 80% Holzbruch im Zinkengrund			Mischbruch		
	15mm	20mm	Alle	15mm	20mm	Alle	15mm	20mm	Alle
<u>Reihe I</u>									
m	59,8	55,9	57,1	47,2	44,7	46,4	52,4	45,2	47,2
v	0,09	0,13	0,12	0,15	0,13	0,14	0,07	0,16	0,15
N	9	19	28	44	23	67	5	13	18
<u>Reihe II</u>									
m	54,2	54,0	54,0	50,1	49,9	50,0	55,2	50,1	53,0
v	0,16	0,15	0,14	0,10	0,13	0,11	0,09	0,12	0,11
N	3	11	14	30	35	65	17	13	30
<u>Reihe III</u>									
m	65,5	61,0	63,1	59,9	55,5	58,1	62,1	59,3	60,6
v	0,10	0,14	0,13	0,11	0,09	0,11	0,11	0,14	0,12
N	23	26	49	23	17	40	10	12	22

In den *Abschnitten 8.4.2.3 und 8.4.3.3* wurde festgestellt, daß das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen nicht von den Holzeigenschaften der keilgezinkten Bretter abhängig ist. Daher ist auch nicht zu erwarten, daß dieser Verhältniswert von der Versagensart der Keilzinkenverbindungen beeinflusst wird. Detaillierte Versuchsauswertungen von METZGER [41] bestätigten diese Annahme, wobei zu berücksichtigen ist, daß infolge der Aufteilung der Proben in Versuchsreihen, Firmen und Versagensart die Anzahl der jeweils zur Verfügung stehenden Versuchswerte z.T. sehr gering war und die Ergebnisse demzufolge großen Streuungen unterworfen waren. Auf eine Darstellung der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet.

8.4.5 Einfluß der Markröhre

Bei den Untersuchungen von EHLBECK et al [21] zeigte sich, daß allein das Vorhandensein der Markröhre in einem der beiden keilgezinkten Brettabschnitte ausreicht, die Tragfähigkeit der betroffenen Keilzinkenverbindungen zu beeinträchtigen. Die Proben mit Markröhre

wiesen hierbei im Mittel etwa 5-10% geringere Festigkeiten auf als die Proben ohne Markröhre.

In *Tabelle 8.9a und 8.9b* sind die Ergebnisse der hier durchgeführten Versuche zusammengestellt. Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, daß nur bei Reihe I die Proben ohne Markröhre eine höhere Festigkeit aufwiesen als die Proben mit Markröhre: bei Reihe II lagen die zugehörigen Festigkeitswerte in der gleichen Größenordnung, während bei Reihe III die Proben mit Markröhre sogar höhere Festigkeiten aufwiesen als die Proben ohne Markröhre. Anhand der hier durchgeführten Versuche ist somit keine eindeutige Tendenz festzustellen. Die Ergebnisse aus *Tabelle 8.9a und 8.9b* deuten lediglich darauf hin, daß der Einfluß der Markröhre mit besser werdenden Holzeigenschaften geringer wird. Diese Aussage kann jedoch nicht als statistisch abgesichert angesehen werden.

Tabelle 8.9a: Ergebnisse der Zugversuche (Mittelwert m [N/mm^2], Variationskoeffizient v , Probenzahl N)

	Proben ohne Markröhre			Proben mit Markröhre		
	15mm	20mm	Alle	15mm	20mm	Alle
<u>Reihe I</u>						
m	36,9	33,2	34,7	32,6	31,4	32,2
v	0,26	0,18	0,23	0,24	0,23	0,23
N	24	36	60	23	12	35
<u>Reihe II</u>						
m	39,0	33,3	35,4	37,0	34,8	36,2
v	0,17	0,19	0,20	0,14	0,21	0,17
N	20	34	54	32	17	49
<u>Reihe III</u>						
m	44,4	39,2	42,0	46,7	41,6	44,5
v	0,16	0,19	0,18	0,19	0,20	0,20
N	34	29	63	12	9	21

Tabelle 8.9b: Ergebnisse der Biegeversuche (Mittelwert m [N/mm^2], Variationskoeffizient v , Probenzahl N)

	Proben ohne Markröhre			Proben mit Markröhre		
	15mm	20mm	Alle	15mm	20mm	Alle
<u>Reihe I</u>						
m	50,9	49,6	50,2	47,0	45,4	46,3
v	0,16	0,17	0,17	0,14	0,14	0,14
N	38	43	81	15	12	27
<u>Reihe II</u>						
m	52,3	50,6	51,3	53,9	51,2	52,5
v	0,10	0,13	0,12	0,12	0,14	0,13
N	28	43	71	15	15	30
<u>Reihe III</u>						
m	63,2	57,5	60,1	63,2	67,8	65,5
v	0,11	0,12	0,13	0,08	0,10	0,10
N	41	47	88	8	8	16

Da weiterhin in der Literatur auf den festigkeitsmindernden Einfluß des marknahen Holzes (juvenile wood) hingewiesen wird, ist sogar zu vermuten, daß es gar nicht entscheidend ist, ob die Markröhre selbst in einem Querschnitt auftritt oder nicht, sondern wieviele der "ersten" Jahrringe vorhanden sind. Da es aber keine eindeutige Definition des marknahen Bereiches (Angabe in mm oder Anzahl der Jahrringe) gibt, und da weiterhin nahezu alle der hier untersuchten Proben marknahes Holz aufwiesen und in vielen Fällen die Markröhre nur ganz knapp außerhalb des Brettquerschnittes lag (übliche Einschneidepraxis in den Sägewerken), erscheint die Frage berechtigt, ob eine genaue rechnerische Abschätzung dieses Einflusses überhaupt möglich und auch erforderlich ist. Daß das marknahe Holz einen Einfluß auf das Festigkeitsverhalten ausübt, steht jedoch außer Frage und wird in Bild 8.9 verdeutlicht: während im überwiegenden Teil der Keilzinkenverbindung ein Scherversagen entlang der Zinkenflanken auftrat, versagte der Bereich der Markröhre und der ersten Jahrringe im Bereich des Zinkengrundes, was auf die "schlechteren" Holzeigenschaften des marknahen Holzes hindeutet.

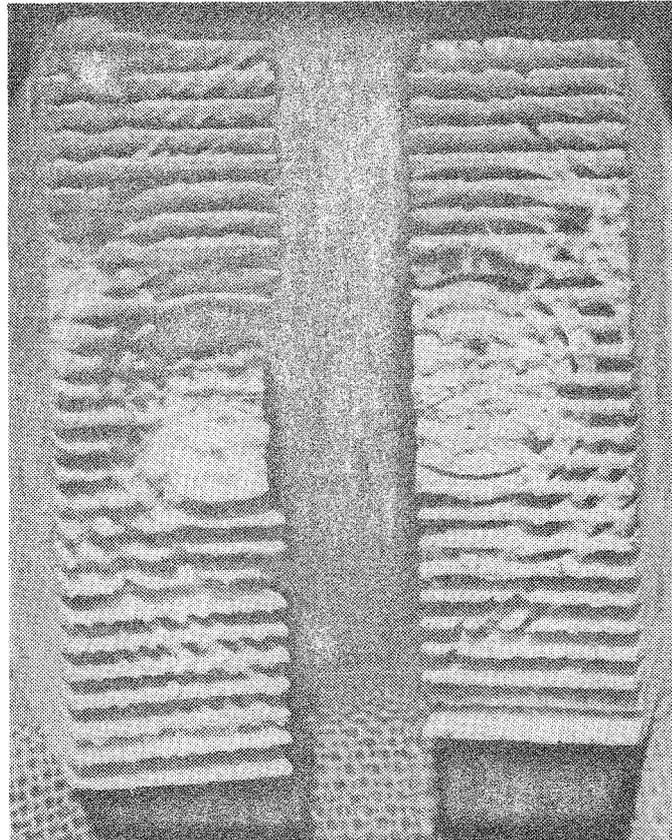


Bild 8.9: Typisches Bruchbild einer Keilzinkenverbindung mit Markröhre

Ein Einfluß der Markröhre auf das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen konnte anhand der hier durchgeführten Untersuchungen ebenfalls nicht festgestellt werden.

8.5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse sind im folgenden zusammengestellt:

- eine Reduzierung der Streubreite der Holzeigenschaften Rohdichte oder Elastizitätsmodul hat eine geringere Streuung der Festigkeitswerte zur Folge und führt somit zu höheren, für die Bemessung ausschlaggebenden, charakteristischen Tragfähigkeiten (vgl. Reihe II und Reihe I);

- die Forderung eines Mindest-Elastizitätsmoduls der Bretter von 15000 N/mm^2 führt zu einer 30 bis 40%-igen Erhöhung der charakteristischen Festigkeitswerte (5%-Fraktilen) gegenüber den Werten, die mit der z.Zt. praktizierten rein visuellen Holzsortierung ohne besondere Anforderungen an die Holzeigenschaften der Bretter realisierbar sind (vgl. Reihe III mit Reihe I);
- das Verhältnis charakteristische Zugfestigkeit/charakteristische Biegefestigkeit der Proben mit überwiegendem Versagen im Keilzinkenbereich ergab sich unabhängig von den Holzeigenschaften, dem Vorhandensein der Markröhre oder dem Keilzinkenprofil zu 0,65.

Darüberhinaus bestätigten die hier durchgeführten Untersuchungen viele der von EHLBECK et al. [21] beschriebenen Tendenzen (z.B. Einfluß der Holzeigenschaften, der Versagensart oder des Keilzinkenprofils auf die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung).

Das im Hinblick auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern bedeutendste Ergebnis dieser Versuche ist ohne Zweifel die Tatsache, daß es nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung auf der Grundlage der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls möglich ist, Keilzinkenverbindungen mit hoher Tragfähigkeit herzustellen und vor allem auch zu gewährleisten.

9 Bemessung

9.1 Grundlagen

Spannungsberechnung

Bei der Bemessung von Brettschichtholzbauteilen ist zu berücksichtigen, daß die Spannungsverteilung über die Trägerhöhe vom Trägeraufbau abhängig ist. Werden Träger planmäßig mit Lamellen unterschiedlicher Steifigkeit zusammengebaut, so muß die Berechnung der vorhandenen Biegerandspannung in Anlehnung an die Theorie der Verbundquerschnitte erfolgen, weil nur diese mit den im Rahmen dieses Vorhabens ermittelten Festigkeitswerten vergleichbar ist. In solchen Fällen werden nämlich bei der näherungsweise Bestimmung der größten Biegerandspannung mit $\sigma = M/W$ die in der äußeren Lamelle tatsächlich auftretenden Spannungen unterschätzt.

Unter Annahme eines symmetrischen Trägeraufbaues ergibt sich in Anlehnung an *Gl(6.1)* folgende Gleichung zur Berechnung der auftretenden Biegerandspannungen:

$$\sigma_B = \frac{M}{efEI} \cdot E_a \cdot H/2 \quad , \quad (9.1)$$

wobei M dem vorhandenen Moment, E_a dem Elastizitätsmodul der äußeren Zuglamellen, H der Querschnittshöhe und $efEI$ der effektiven Biegesteifigkeit des Brettschichtholzträgers entsprechen.

Volumeneinfluß

Auf der Grundlage der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen ergibt sich nachfolgende Beziehung zur Berechnung der charakteristischen Biegefestigkeit σ_5 eines Brettschichtholzträgers mit beliebiger Trägergröße. Hierbei wurde der Einfachheit halber vorausgesetzt, daß der Längen- und Höheneffekt mit ein und demselben Exponenten β beschrieben werden können. Diese Annahme erscheint aufgrund der in *Kapitel 6* durchgeführten Simulationsrechnungen gerechtfertigt.

$$\sigma_5 = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \cdot \frac{H}{H_0} \right)^\beta k_F \sigma_5^0 \quad (9.2)$$

mit

- σ_5 = charakteristische Biegefestigkeit eines Brett-schichtholzträgers der Länge L und der Höhe H unter beliebiger Belastung,
- σ_5^0 = charakteristische Biegefestigkeit des Standardträgers unter Dretpunktbelastung mit der Länge $L_0 = 5400$ mm und der Höhe $H_0 = 300$ mm
- BL = mittlere Länge der verwendeten Bretter,
- BL_0 = mittlere Länge der im Standardträger eingebauten Bretter ($BL_0 = 4000$ mm),
- k_F = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart.

Bei den durchgeführten Simulationsrechnungen ergab sich für die Träger mit Holzversagen ein Exponent β zur Beschreibung des "Volumeneffektes" in der Größenordnung von 0,07 bis 0,09.

Bei den Trägern mit Keilzinkenversagen erwies sich β als sehr stark von der Streuung der Keilzinkenzugfestigkeit abhängig. Auf der Grundlage von umfangreichen Zugversuchen (siehe EHLBECK et al [17]) ergibt sich ein Variationskoeffizient der Keilzinkenzugfestigkeit von etwa 0,20 (siehe hierzu auch *Abschnitt 6.1.4*). Dieser Wert wurde anhand von Keilzinkenverbindungen ermittelt, die aus insgesamt 18 deutschen Leimbaubetrieben entnommen wurden und kann daher als repräsentativ für die in Deutschland hergestellten Keilzinkenverbindungen angesehen werden. Für diesen Variationskoeffizienten ($v = 0,20$) ergibt sich ein Exponent zur Beschreibung des Volumeneffektes bei Trägern mit Keilzinkenversagen von $\beta = 0,15$. Dieser Wert wurde auch von COLLING [13] und EHLBECK/COLLING [22] für die Bemessung von Brettschichtholzträgern vorgeschlagen.

Versuche von EHLBECK et al [21] zeigten jedoch, daß der Variationskoeffizient der Keilzinkenzugfestigkeit von Betrieb zu Betrieb unterschiedlich ist und dessen Größe auch von produktionsabhängigen Faktoren beeinflußt wird: so ist die Zahl der "Ausreißer" bei sorgfältiger Produktion geringer, was zu einer Reduzierung der Streuung und somit auch des Variationskoeffizienten führt.

Die in *Kapitel 8* durchgeführten Zug- und Biegeversuche mit keilgezinkten Brettabschnitten zeigten weiterhin, daß der Variationskoeffizient der Keilzinkenfestigkeit sehr stark von der Streubreite der Holzeigenschaften und somit auch von der Art der Holzsortierung

abhängig ist. So kann die Streuung der Festigkeitswerte mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung auf der Grundlage der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls deutlich reduziert werden.

In Anbetracht der Tatsache, daß im EUROCODE 5 [3] bestimmte Mindestanforderungen an die Keilzinkenfestigkeit gestellt werden, ist zu erwarten, daß die Leimbaubetriebe bei der Herstellung ihrer Keilzinkenverbindungen größere Sorgfalt walten lassen, was sich sicherlich auch auf die Streuung der Festigkeitswerte auswirken wird. Daher erscheint es, auch im Hinblick auf eine mögliche maschinelle Holzsortierung, gerechtfertigt, für die zukünftige Bemessung von Brettschichtholzträgern einen geringeren Wert für den Variationskoeffizienten der Keilzinkenzugfestigkeit zugrunde zu legen. In Anlehnung an die Versuchsergebnisse aus *Abschnitt 8.4.2.2* erscheint eine Reduzierung des Variationskoeffizienten um 0,05 gerechtfertigt.¹ Somit wird ein Wert von $v_{Z,KZV} = 0,15$ vorgeschlagen, auf dessen Grundlage sich für die Träger mit Keilzinkenversagen ein Exponent von $\beta = 0,10$ ergibt (siehe *Tabelle 6.9a*). Dieser Wert ist praktisch identisch mit dem Exponenten zur Beschreibung des Volumeneinflusses bei den Brettschichtholzträgern mit Holzversagen ($\beta \approx 0,07 - 0,09$). Daher erscheint es möglich, das Tragverhalten aller Träger mit einem Exponenten von $\beta = 0,1$ zu beschreiben.

In *Bild 9.1* sind die Ergebnisse von Versuchen mit Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Größe dargestellt, wobei sämtliche Träger von ein und demselben Leimbaubetrieb hergestellt wurden. Die Güteklasse dieser Träger entsprach der Güteklasse II und besser nach DIN 1052. Für diese Träger ist eine charakteristische Biegefestigkeit des Standardträgers von etwa 30 N/mm^2 zu erwarten (siehe COLLING et al [14]). Die Kurve, die sich auf der Grundlage dieses Wertes nach *Gl(9.1)* ergibt, ist ebenfalls in *Bild 9.1* dargestellt. Die mittlere Länge der eingebauten Bretter betrug bei allen Trägern etwa 4 m, so daß kein Einfluß der Brettlänge vorhanden war.

Die eingezeichnete Kurve gibt den Verlauf der 5%-Fraktile wieder, so daß 95% der Versuchswerte über dieser Kurve liegen sollten. Aus *Bild 9.1* ist zu erkennen, daß diese Bedingung erfüllt ist und daß die

¹ Die in *Tabelle 8.3* angegebenen Werte für v entsprechen den Variationskoeffizienten der Stichproben und sind größer als die, die durch das "Hineinzwängen" einer Normalverteilung durch die 5%-Fraktile und den Mittelwert einer rechtsschiefen Verteilung entstehen.

Kurve die Versuchswerte gut beschreibt. Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings, daß für große Träger vergleichsweise wenig Versuchswerte vorliegen. Insgesamt gesehen jedoch, erscheint die Annahme eines Exponenten von $\beta = 0,1$ zur Beschreibung des Einflusses der Trägergröße auf die Biegefestigkeit von Brettschichholzträgern gerechtfertigt.

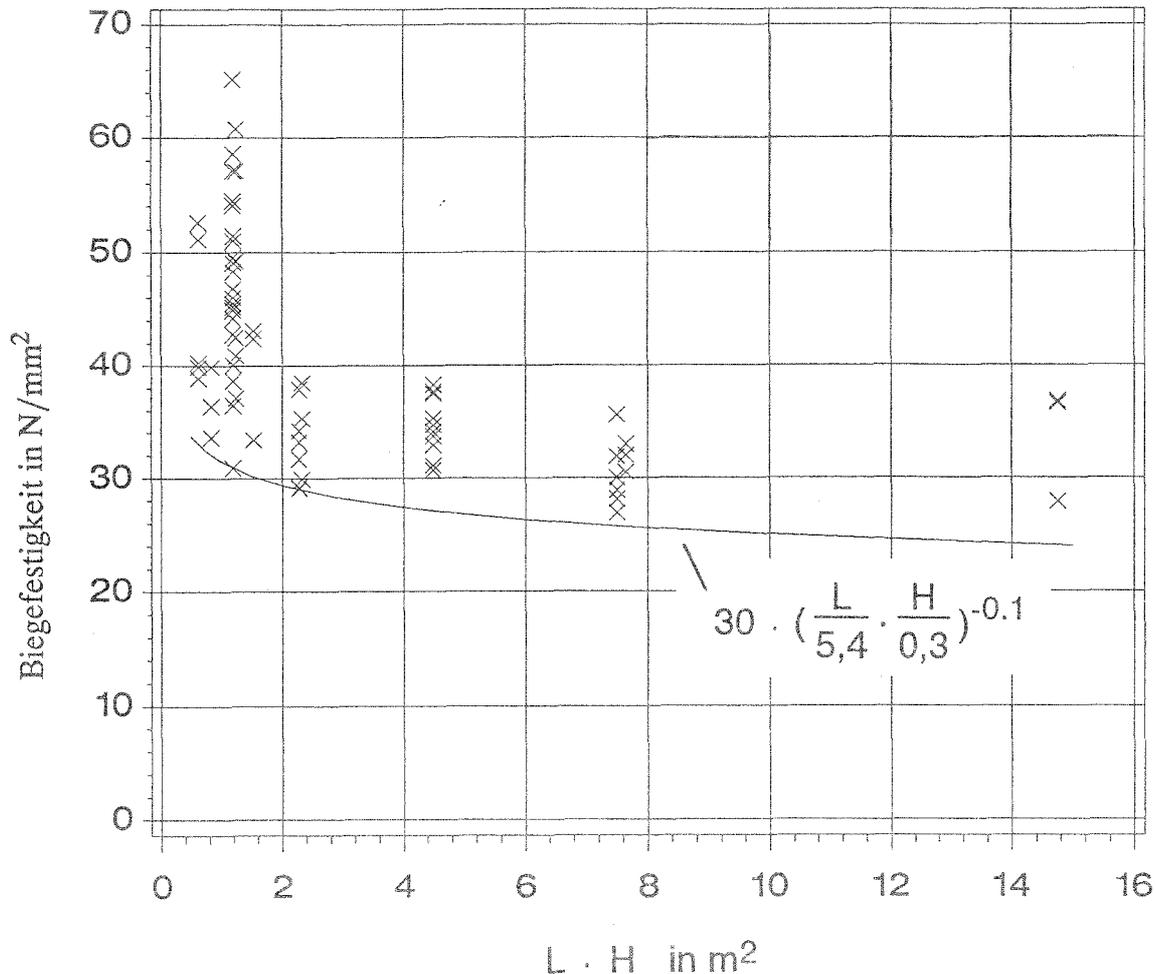


Bild 9.1: Biegefestigkeit von Brettschichholzträgern in Abhängigkeit von der Trägergröße

Wie in *Abschnitt 6.1.1* bereits beschrieben, ist der Einfluß der Brettlänge identisch mit dem Einfluß der Trägerabmessungen, da z.B. eine Halbierung der Brettlängen die Anzahl der vorhandenen Keilzinkenverbindungen genauso verdoppelt wie eine Verdopplung der Trägerlänge. Da aber die in einem Brettschichholzträger auftretenden

Brettlängen von Firma zu Firma unterschiedlich und dem Ingenieur zum Zeitpunkt der Bemessung nicht bekannt sind, ist eine Berücksichtigung dieses wichtigen Einflußparameters bei der Bemessung nicht möglich. Im Falle einer (maschinellen) Holzsortierung, bei der die Bretter als Ganzes, d.h. ungekürzt verarbeitet werden, könnte mit einem Wert von $BL_0/BL \approx 1$ gerechnet werden, während der Einfluß der Brettlänge im Falle einer (visuellen) Holzsortierung, bei der große Äste herausgeschnitten und die Bretter an diesen Stellen wieder keilgezinkt werden, mit einem pauschalen Abminderungsbeiwert von z.B. $(BL_0/BL \approx (4/2,5)^{-0,1} \approx 0,95)$ berücksichtigt werden könnte.

Für den Faktor k_F zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart kann keine allgemeingültige Gleichung angegeben werden. Die in *Gl(6.9a)* und *(6.13a)* angegebenen Beziehungen beschränken sich auf den Fall von zwei aufgebrachtten Einzellasten mit beliebigem Lastabstand Δ .

Für beliebige Lastanordnungen kann die Bestimmung der zugehörigen Faktoren k_F z.B. in Anlehnung an die Völligkeitsbeiwerte λ nach COLLING [10], [11] erfolgen. Danach gilt für den Fall einer gleichförmigen Streckenlast mit parabelförmiger Momentenverteilung

$$k_F = \left(\frac{0,345 + \beta - 0,027/\beta + 0,0013/\beta^2}{\beta + 1/3} \right)^\beta \quad (9.3)$$

Mit dem gewählten Exponenten $\beta = 0,10$ ergibt sich k_F zu 1,04, d.h. im Falle einer gleichförmigen Streckenlast ist eine 4% höhere charakteristische Biegefestigkeit zu erwarten als im Falle einer Drittelpunktbelastung.

In Anbetracht dessen, daß die auftretenden Lasten (Eigengewicht, Wind- und Schneelasten, Verkehrslasten) in der überwiegenden Zahl aller Fälle gleichförmig verteilte Streckenlasten sind, erscheint es fraglich, ob die Berücksichtigung des Faktors k_F zwingend erforderlich ist. Im Hinblick auf eine vereinfachte Bemessung wird daher vorgeschlagen mit einem konstanten Wert $k_F = 1,04$ zu rechnen.

Der Einfluß der kürzeren Brettlängen bei der z.Zt. praktizierten visuellen Holzsortierung und der Einfluß der Belastungsart (Streckenlast/Drittelpunktbelastung) heben sich somit praktisch auf $(0,95 \times 1,04 \approx 1,0)$, so daß sich *Gl(9.2)* weiter vereinfacht.

Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Forschungsreihe ist die Erkenntnis, daß es zur Herstellung von Brettschichtholzträgern mit hoher Tragfähigkeit nicht nur genügt, hochwertige Bretter zu verwenden, sondern daß darüberhinaus auch Keilzinkenverbindungen mit hoher Festigkeit gewährleistet sein müssen.

Bei den Simulationsrechnungen in *Abschnitt 6.1.2* ergab sich folgende Abhängigkeit zwischen der charakteristischen Biegefestigkeit σ_5^0 des Standardträgers mit Keilzinkenversagen und der charakteristischen Zugfestigkeit $f_{Z,5,KZV}$ der eingebauten Keilzinkenverbindungen:

$$\sigma_5^0 = 1,20 \cdot f_{Z,5,KZV} \quad (9.4)$$

In *Abschnitt 8.4.3.3* wurde folgende Beziehung zwischen der charakteristischen Zugfestigkeit $f_{Z,5,KZV}$ einer Keilzinkenverbindung und deren charakteristischen Biegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ ermittelt:

$$f_{Z,5,KZV} = 0,65 \cdot f_{B,5,KZV} \quad (9.5)$$

Wie in *Abschnitt 8.3.3* beschrieben, wurde die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen mit Hilfe einer Vorrichtung ermittelt, bei der eine gelenkige Einspannung der Prüfkörper gegeben ist (vgl. *Bild 8.3*). Die Wahl dieser Vorrichtung erfolgte im Hinblick auf eine einfache Bestimmung der Keilzinkenzugfestigkeit im Rahmen einer späteren laufenden Qualitätsüberwachung der Leimbaubetriebe. Bei diesen Versuchen konnten jedoch seitliche Verformungen der Prüfkörper, die eine zusätzliche Momentenbeanspruchung und somit auch eine geringere rechnerische Zugfestigkeit bewirken, nicht verhindert werden. Die ermittelten Festigkeitswerte entsprechen daher nicht der "behinderten" Zugfestigkeit, die ihrerseits die Grundlage für die im Rahmen dieser Forschungsreihe durchgeführten Simulationsrechnungen bildet und wie sie in *Gl(9.4)* vorausgesetzt wird.

Da das Ausmaß der Festigkeitsminderung infolge der auftretenden seitlichen Verformungen nicht bekannt ist und auch versuchstechnisch durch Messungen kaum zu bestimmen ist (vgl. LARSEN [34]), stellte sich die Frage, ob und, wenn ja, wie dieser Tatbestand berücksichtigt werden kann.

Als erste Näherung könnte der ermittelte Verhältniswert $f_{Z,5,KZV}/f_{B,5,KZV} = 0,65$ unverändert übernommen werden. Dies würde aber zu schärferen Anforderungen an die Keilzinkenfestigkeit führen als dies tatsächlich erforderlich wäre. COLLING et al [14] schlagen daher folgende Beziehung vor:

$$f_{Z,5,KZV} = 0,70 \cdot f_{B,5,KZV} \quad (9.6)$$

Gl(9.6) beinhaltet die Annahme, daß die behinderte Zugfestigkeit etwa 5-10% höher ist als die "freie" Zugfestigkeit, wie sie mit der Vorrichtung nach Bild 8.3 ermittelt wird. Diese Annahme ist rein empirisch und nicht durch Versuche belegt.

Unter Zugrundelegung von Gl(9.6) ergibt sich mit Hilfe von Gl(9.4) folgende Beziehung zwischen der charakteristischen Biegefestigkeit σ_5^0 des Standardträgers und der charakteristischen Biegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ der eingebauten Keilzinkenverbindungen:

$$\sigma_5^0 = 0,84 \cdot f_{B,5,KZV} \quad (9.7)$$

Diese Gleichung besagt, daß die charakteristische Biegefestigkeit eines Brettschichtholzträgers höchstens 84% der charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit betragen kann. Umgekehrt geht aus Gl(9.7) auch hervor, daß die charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit mindestens 19% ($1/0,84 = 1,19$) höher sein muß als die zu erreichende charakteristische Brettschichtholzbiegefestigkeit:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,19 \cdot \sigma_5^0 \quad (9.8)$$

In Anbetracht der in der Praxis überwiegend auftretenden Gleichstreckenlasten erscheint es jedoch gerechtfertigt auch die Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen auf diesen Lastfall zu beziehen und entsprechend der höheren Tragfähigkeit dieser Träger ($k_F = 1,04$) zu reduzieren. Somit ergibt sich Gl(9.8) zu:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,15 \cdot \sigma_5^0 \quad (9.9)$$

9.2 Bemessungsvorschlag

Auf der Grundlage der im Rahmen dieser Forschungsreihe durchgeführten Untersuchungen und der im vorigen Abschnitt gemachten Ausführungen läßt sich nachfolgend beschriebener Bemessungsvorschlag für Brettschichtholzträger unter Biegebeanspruchung ableiten.

Bei Brettschichtholzträgern mit homogenem Trägeraufbau (Lamellen einer Festigkeitsklasse) kann die vorhandene Biegerandspannung σ_B berechnet werden zu:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \quad (9.10)$$

wobei M dem vorhandenen Moment und W dem Flächenmoment 1. Grades (Widerstandsmoment) entspricht.

Bei Brettschichtholzträgern, bei denen Lamellen unterschiedlicher Festigkeitsklassen und Elastizitätsmoduln verwendet werden, kann die Biegerandspannung σ_B in Anlehnung an die Theorie der Verbundquerschnitte nach folgender Gleichung berechnet werden, wobei ein symmetrischer Trägeraufbau vorausgesetzt wird:

$$\sigma_B = \frac{M}{ef EI} \cdot E_a \cdot H/2 \quad , \quad (9.11)$$

wobei M wiederum dem vorhandenen Moment, H der Querschnittshöhe, E_a dem Elastizitätsmodul der äußeren Lamelle und $ef EI$ der effektiven Biegesteifigkeit des Brettschichtholzträgers entspricht. Die Berechnung von $ef EI$, die auch beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegungsnachweis) benötigt wird, kann mit folgender Gleichung erfolgen:

$$ef EI = \sum E_i I_i + \sum E_i A_i a_i^2 \quad , \quad (9.12)$$

wobei $E_i I_i$ der Biegesteifigkeit einer Einzellamelle und $E_i A_i a_i^2$ dem zugehörigen Steineranteil entsprechen. Die in den äußeren Bereichen angeordneten Lamellen müssen hierbei jeweils mindestens 15% der Trägerhöhe, mindestens jedoch zwei Lamellen betragen.

Die auftretende Biegerandspannung σ_B wird der erwarteten charakteristischen Biegefestigkeit σ_5 des betrachteten Trägers gegenübergestellt, die sich aus folgender Gleichung ergibt:

$$\sigma_5 = \left(\frac{L}{5400} \cdot \frac{H}{300} \right)^{-0,1} \cdot \sigma_5^0 \quad (9.13)$$

wobei σ_5^0 der charakteristischen Biegefestigkeit des Standardträgers (Länge $L_0 = 5400$ mm und $H_0 = 300$ mm) mit homogenem Trägeraufbau entspricht. L und H entsprechen der Länge und Höhe des betrachteten Trägers. Der Einfluß einer Gleichstreckenlast (etwa 4% höhere Festigkeit) und von kürzeren Brettern (bei im Mittel 2,5 m langen Brettern etwa 5% geringere Festigkeit) sind in dieser Gleichung bereits berücksichtigt.

Der Biegespannungsnachweis ist nach folgender Gleichung zu führen:

$$\max \sigma_B \leq \sigma_5 / \gamma_{\text{ges}} \quad (9.14)$$

wobei γ_{ges} einem noch festzulegenden Gesamt-Sicherheitsbeiwert entspricht. In Anlehnung an den Entwurf zum EUROCODE 5 [3] ist ein Wert für γ_{ges} von etwa 2,0 - 2,2 zu erwarten.

Der ausführende Leimbaubetrieb muß jetzt noch nachweisen, daß er in der Lage ist, Brettschichtholzträger mit der vorgegebenen Festigkeitsklasse herzustellen. Hierzu muß er gewährleisten, daß die von ihm produzierten Keilzinkenverbindungen folgende Bedingung erfüllen:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,15 \cdot \sigma_5^0 \quad (9.15)$$

wobei $f_{B,5,KZV}$ der charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen entspricht. Um diesen Nachweis zu erbringen, ist eine laufende Qualitätsüberwachung erforderlich.

9.3 Alternativvorschläge

9.3.1 Bemessung ohne Verbundtheorie aber mit Volumeneffekt

Im vorigen Abschnitt wurde ein Bemessungsvorschlag gemacht, bei dem ein Brettschichtholzträger als Verbundträger angesehen wird.

Diese Annahme, die ohne jeden Zweifel auch der Wirklichkeit entspricht, erhöht den Aufwand bei der Bemessung von Brettschicht-holzträgern. Geht man jetzt davon aus, daß sich in der Praxis "standardisierte" Trägersaufbauten durchsetzen werden, so kann auch die Bemessung dahingehend vereinfacht werden, daß nicht jedesmal die effektive Biegeandspannung über die effektive Biegesteifigkeit $ef EI$ berechnet werden muß.

Es ist zu erwarten, daß bei Verbundträgern Bretter aus nur zwei verschiedenen Festigkeitsklassen verwendet werden, und daß die Lamellen mit der höheren Festigkeitsklasse, wie bisher auch, in den jeweils äußeren 15% der Trägerhöhe angeordnet werden. Für diesen Fall ergibt sich die effektive Biegesteifigkeit $ef EI$ zu:

$$ef EI = k_E \cdot E_a \cdot I \quad (9.16)$$

mit

$$k_E = 0,7 + 0,3 \cdot E_i/E_a \quad (9.17)$$

Hierbei entspricht E_i bzw. E_a dem Elastizitätsmodul der inneren bzw. äußeren Lamellen und I dem Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment) des Brutto-Querschnittes.

Die effektive Biegeandspannung ergibt sich dann mit Hilfe von $GI(9.11)$ zu:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \cdot 1/k_E \quad (9.18)$$

Legt man sinnvolle Kombinationen von Lamellenfestigkeitsklassen fest, so stellt k_E für jeden Verbundträgertyp ein Konstante dar.

Im Sinne einer einfacheren Bemessung könnte die auftretende Biegeandspannung - wie bisher üblich - mit Hilfe von $GI(9.10)$ ($\sigma_B = M/W$) berechnet und der Einfluß der unterschiedlichen Lamellen-Elastizitätsmoduln in einer eigens für den jeweiligen Verbundträger geschaffenen Festigkeitsklasse berücksichtigt werden. Die charakteristische Biegefestigkeit $\sigma_{5,v}^0$ eines Standardverbundträgers kann hierbei mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnet und als Tabellenwert festgelegt werden:

$$\sigma_{5,v}^0 = k_E \cdot \sigma_{5,H}^0 \quad (9.19)$$

wobei $\sigma_{5,H}^0$ der charakteristischen Biegefestigkeit des Standardträgers mit homogenem Trägeraufbau (Festigkeitsklasse der äußeren Lamellen) entspricht.

Die Berücksichtigung des Volumeneffektes kann nach wie vor mit Hilfe von *Gl(9.13)* erfolgen, wobei als Basiswert die charakteristische Biegefestigkeit $\sigma_{5,v}^0$ des Standard-Verbundträgers dient.

Hinsichtlich der Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen ist folgendes zu beachten: da in einem Verbundträger die Lamellen mit hohem Elastizitätsmodul größere Kräfte anziehen als Lamellen mit geringem Elastizitätsmodul, sind in den äußeren Lamellen auch höhere Spannungen vorhanden, als dies bei der Berechnung mit $\sigma_B = M/W$ angenommen wird. Daher ist bei den Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen auch nicht die rechnerische Biegefestigkeit $\sigma_{5,v}^0$ des Verbundträgers zugrunde zu legen, sondern der höhere Wert $\sigma_{5,H}^0$ des homogenen Brettschichtholzträgers, bei dem alle Bretter der Festigkeitsklasse der äußeren Lamelle angehören.

Der hier vorgestellte erste Alternativvorschlag für die Bemessung von Brettschichtholzbiegeträgern ist im folgenden kurz zusammengefaßt:

Berechnung der vorhandenen Spannung:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \quad (9.10)$$

Berechnung der charakteristischen Biegefestigkeit eines Brettschichtholzträgers beliebiger Größe:

$$\sigma_{5,v} = \left(\frac{L}{5400} \cdot \frac{H}{300} \right)^{-0,1} \cdot \sigma_{5,v}^0 \quad (9.20)$$

wobei $\sigma_{5,v}^0$ der charakteristischen Biegefestigkeit des zugehörigen Standard-Verbundträgers (Tabellenwert) mit einer Höhe von $H_0 = 300$ mm entspricht. Bei Brettschichtholzträgern mit homogenem Trägeraufbau (Lamellen einer Festigkeitsklasse) ist $\sigma_{5,v}^0 = \sigma_{5,H}^0$.

Auf der Grundlage dieser Werte ist der Biegespannungsnachweis wie folgt zu führen:

$$\max \sigma_B \leq \sigma_{5,v} / \gamma_{ges} \quad , \quad (9.14)$$

wobei γ_{ges} einem noch festzulegenden Gesamt-Sicherheitsbeiwert entspricht.

Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,15 \cdot \sigma_{5,H}^0 \quad , \quad (9.15)$$

Hierbei ist auch bei Brettschichtholzträgern mit Lamellen unterschiedlicher Festigkeitsklassen (Verbundträger) die charakteristische Biegefestigkeit $\sigma_{5,H}^0$ des homogenen Trägers, bei dem alle Lamellen der Festigkeitsklasse der äußeren Lamellen angehören, einzusetzen.

9.3.2 Bemessung ohne Verbundtheorie und ohne Volumeneffekt

Die Berücksichtigung des Volumeneffektes nach *Gl(9.13)* bzw. *Gl(9.20)* stellt gegenüber der heutigen Bemessungspraxis einen erheblichen Mehraufwand dar: stellt sich in einem ersten Bemessungsschritt heraus, daß der gewählte Querschnitt nicht ausreicht, um die auftretenden Belastungen sicher aufzunehmen, so muß z.B. die Querschnittshöhe erhöht werden. Dies bewirkt aber gleichzeitig eine Reduzierung der Tragfähigkeit dieses Trägers, so daß es durchaus möglich ist, daß zur Bemessung eines einfachen Biegeträgers mehrere Iterationsschritte erforderlich sind.

Durch die Berücksichtigung des Volumeneffektes entstehen weiterhin Probleme, die bisher noch nicht ausreichend diskutiert sind, so daß auch noch keine befriedigenden Lösungen vorliegen. Beispiele noch offener Fragen sind:

- welche Länge ist bei Durchlaufträgern einzusetzen?
- welche Höhe ist bei Brettschichtholzträgern mit veränderlicher Querschnittshöhe einzusetzen?
- wie sieht die Bemessung von Trägern unter Doppelbiegung aus (bei Biegung um die schwache Achse wird die Trägerbreite zur Trägerhöhe)?

Weitere Problemfälle, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht absehbar sind, sind nicht auszuschließen.

Die Berücksichtigung des in Fachkreisen unbestrittenen Volumeneffektes birgt somit die Gefahr in sich, daß die genauere Bemessung von verhältnismäßig einfachen Holzbauteilen so kompliziert bzw. umständlich und arbeitsaufwendig wird, daß sie zum Entscheidungskriterium für oder gegen die Verwendung von Holz im Bauwesen werden kann. Diese Befürchtung gab den Anstoß zu dem nachfolgend beschriebenen zweiten Alternativvorschlag.

Bei den bisher vorgestellten Bemessungsvorschlägen wurde als Basiswert die charakteristische Biegefestigkeit eines 300 mm-hohen Standardträgers zugrunde gelegt. Kommen größere Träger zur Anwendung, so muß dieser Festigkeitswert abgemindert werden, weil sonst die Tragfähigkeit der großen Träger überschätzt wird. Im Hinblick auf die erforderliche Sicherheit der Konstruktionen ist daher bei diesen Bemessungsverfahren die Berücksichtigung eines Volumeneffektes unerlässlich.

Anders verhält es sich, wenn bei der Bemessung ein geringerer Festigkeitswert zugrunde gelegt wird, der auch ohne Abminderung die Tragfähigkeit großer Träger mit ausreichender Sicherheit beschreibt. Damit bliebe bei großen Brettschichtholzträgern das Ergebnis der Bemessung gegenüber den o.a. Verfahren unverändert, der Rechenaufwand hingegen wäre deutlich reduziert. Eine Nicht-Berücksichtigung des Volumeneinflusses führt in diesem Fall dazu, daß die Tragfähigkeit von kleinen Trägern unterschätzt wird, was diesmal aber auf der sicheren, wenn auch ungünstigen bzw. unwirtschaftlichen Seite liegt. In den Fällen, in denen ein höherer Bemessungsaufwand gerechtfertigt erscheint und die höhere Tragfähigkeit kleiner Brettschichtholzträger auch rechnerisch genutzt werden soll, darf der zugrundegelegte Festigkeitswert erhöht werden. Somit wäre auch weiterhin eine einfache Bemessung gewährleistet, wobei ein genauerer Nachweis ermöglicht und nicht vorgeschrieben wird.

Nun stellt sich allerdings die Frage, welcher Festigkeitswert bzw. welcher neue Standardträger der Bemessung zugrundegelegt werden soll. In *Bild 9.1 (Abschnitt 9.1)* ist zu erkennen, daß der Einfluß der Trägergröße im Bereich $L \cdot H \leq 6$ am ausgeprägtesten ist und daß die erwartete Festigkeitsabnahme mit zunehmenden Trägerabmessungen geringer wird. Daher wird vorgeschlagen, einen 600 mm hohen Brettschichtholzträger mit einer Länge von $L = 18 \cdot H = 10,8$ m als neuen

Standardträger zu verwenden. Aus *Bild 9.1* ist ersichtlich, daß dieser Träger mit $L \cdot H = 6,5 \text{ m}^2$ durchaus als geeignet angesehen werden kann, auch die Tragfähigkeit noch größerer Träger mit ausreichender Sicherheit zu beschreiben. Dieser Vorschlag wird unterstützt durch Untersuchungen von KOLB/FRECH [33] und EHLBECK/COLLING [19], die bei ihren Versuchen ab einer Trägerhöhe von etwa 500 mm keine nennenswerte zusätzliche Festigkeitsabnahme mehr feststellen konnten. Diese Aussage kann in Anbetracht der Anzahl der durchgeführten Versuche zwar nicht als statistisch abgesichert angesehen werden, sie bestätigt jedoch die o.a. Tendenz, daß der zu erwartende Festigkeitsabfall bei noch größeren Trägern nur mehr gering ist und somit nur schwerlich durch Versuche nachgewiesen werden kann.

Hinsichtlich der Anforderungen an die Keilzinkenverbindungen ist zu berücksichtigen, daß die in *Gl(9.15)* ausgedrückte Bedingung auf der Grundlage eines 300 mm hohen Trägers hergeleitet wurde. Wird die charakteristische Biegefestigkeit eines neuen Standardträgers als Basiswert verwendet, so muß auch die Anforderung an die Keilzinkenbiegefestigkeit auf diesen neuen Wert umgeschrieben werden. In Anlehnung an *Gl(9.13)* ergibt sich die charakteristische Biegefestigkeit $\sigma_{5,H}^0(H=600)$ des neuen Standardträgers zu:

$$\begin{aligned}\sigma_{5,H}^0(H=600) &= \left(\frac{600}{300} \cdot \frac{10800}{5400} \right)^{-0,1} \cdot \sigma_{5,H}^0 \\ &= 0,87 \cdot \sigma_{5,H}^0 \quad ,\end{aligned}$$

wobei $\sigma_{5,H}^0$ der charakteristischen Biegefestigkeit des 300 mm hohen Standardträgers mit homogenem Trägeraufbau entspricht.

Die Bedingung, die die Keilzinkenverbindungen erfüllen müssen ergibt sich somit zu:

$$f_{B,5,KZV} \geq \frac{1,15}{0,87} \cdot \sigma_{5,H}^0(H=600) \quad ,$$

bzw.

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,32 \cdot \sigma_{5,H}^0(H=600) \quad , \quad (9.21)$$

Der zweite Alternativvorschlag für die Bemessung von Brettschicht-holzbiegeträgern ergibt sich in zusammengefaßter Form zu:

Berechnung der vorhandenen Spannung:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} \quad (9.10)$$

Biegespannungsnachweis:

$$\max \sigma_B \leq \sigma_{5,v}^0 / \gamma_{ges} \quad , \quad (9.22)$$

wobei $\sigma_{5,v}^0$ der charakteristischen Biegefestigkeit des betrachteten Standard-Verbundträgers mit einer Höhe von $H_0 = 600$ mm und einer Länge von $L_0 = 10800$ mm entspricht (Tabellenwert). Bei Brettschicht-holzträgern mit homogenem Trägeraufbau (Lamellen einer Festigkeitsklasse) ist $\sigma_{5,v}^0 = \sigma_{5,H}^0$.

Bei Brettschichtholzträgern mit $H < 600$ mm oder $L < 10800$ mm darf folgender Nachweis geführt werden:

$$\max \sigma_B \leq \sigma_{5,v} / \gamma_{ges} \quad , \quad (9.14)$$

mit

$$\sigma_{5,v} = \left(\frac{L}{10800} \cdot \frac{H}{600} \right)^{-0,1} \cdot \sigma_{5,v}^0 \quad . \quad (9.23)$$

Anforderungen an die charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,32 \cdot \sigma_{5,H}^0 \quad . \quad (9.21)$$

Hierbei ist auch bei Brettschichtholzträgern mit Lamellen unterschiedlicher Festigkeitsklassen (Verbundträger) die charakteristische Biegefestigkeit $\sigma_{5,H}^0$ des homogenen Trägers, bei dem alle Lamellen der Festigkeitsklasse der äußeren Lamellen angehören, einzusetzen.

10 Zusammenfassung

Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen bildete das im ersten und zweiten Teil dieser Forschungsreihe entwickelte "Karlsruher Rechenmodell". Hierbei konnte die Wirklichkeitsnähe der Simulationen mit Hilfe von insgesamt 242 Zugversuchen mit astbehafteten Brettabschnitten weiter verbessert werden: es konnte gezeigt werden, daß die Streuung der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes geringer ist, als dies von der für das gesamte Brettangebot gültigen Reststreuung der Regressionsgleichung erwartet wird. Somit werden, wie bei der Zuordnung des Elastizitätsmoduls, auch bei der Simulation der Zugfestigkeit die durch das Wachstum des Baumes bedingten Regelmäßigkeiten berücksichtigt.

Weiterhin wurden anhand von umfangreichen Messungen die Holzeigenschaften des in deutschen Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes untersucht. Von insgesamt 2760 Brettern wurde die mittlere Rohdichte mittels Wägung und der mittlere Längs-Elastizitätsmodul mittels Schwingungsmessung bestimmt. Von insgesamt 1434 Brettern wurde zusätzlich die jeweils größte im Brett auftretende Querschnittsschwächung infolge von Ästen (KAR-Wert) ermittelt. Hierbei wurden Bretter aus den drei Haupt-Herkunftsgebieten Deutschland/Österreich, Ostblock und Skandinavien berücksichtigt. Diese Untersuchungen zeigten, daß die Bretter aus Skandinavien im Mittel eine geringere Ästigkeit, eine höhere Rohdichte und einen höheren Elastizitätsmodul aufweisen als die Bretter aus den beiden anderen Regionen. Die Streuungen der Holzeigenschaften lagen jedoch bei allen Herkunftsgebieten in der gleichen Größenordnung, so daß große Überschneidungen der jeweiligen Verteilungen festzustellen waren. Die hier durchgeführten Untersuchungen lassen daher erwarten, daß sich die Herkunft der Bretter vornehmlich auf die Ausbeute an Brettern für die unterschiedlichen Festigkeitsklassen auswirkt.

Weiterhin zeigte sich, daß die derzeitig praktizierte, rein visuelle Holzsortierung nach DIN 4074 das zur Verfügung stehende Brettmaterial nur sehr grob einteilt und daher nicht effektiv nutzt. Auch können die Vorteile einer hohen Rohdichte (bei Anschlüssen) oder eines hohen Elastizitätsmoduls (bei Verformungsnachweisen) nicht genutzt werden. Dies ist nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung auf der Basis der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls möglich.

Bisherige Untersuchungen zeigten, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern im wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt wird: der Festigkeit der Brettlamellen selbst und der Festigkeit der unvermeidlich auftretenden Keilzinkenverbindungen. Darüberhinaus erwies sich auch das gegenseitige Verhältnis dieser beiden Faktoren als wichtige Einflußgröße: je stärker sich die Festigkeitseigenschaften der beiden "Materialien" Holz und Keilzinkenverbindung voneinander unterscheiden, umso häufiger tritt das schwächere "Material" als Versagensursache auf, und umso mehr nähert sich die Tragfähigkeit des Endproduktes Brettschichtholz der Tragfähigkeit des schwächeren "Materials" an.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein statistisches Modell entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, die o.a. Tendenzen zu erfassen. Dieses Modell teilt die komplexe Problematik des Endproduktes Brettschichtholz in zwei kleinere Problembereiche (Träger mit Holzversagen und Träger mit Keilzinkenversagen) auf, innerhalb derer es möglich ist, den festigkeitsbestimmenden Einfluß jedes einzelnen Parameters eindeutig zu beschreiben. Ausgehend von den "echten" Festigkeitsverteilungen der Träger mit Holzversagen und der Träger mit Keilzinkenversagen ist es mit diesem Modell möglich, die Tragfähigkeit des Endproduktes Brettschichtholz abzuschätzen.

Die hierzu erforderlichen "echten" Festigkeitsverteilungen wurden mit Hilfe des "Karlsruher Rechenmodells" in Abhängigkeit von der Ästigkeit, der Rohdichte und des Elastizitätsmoduls der Bretter, der Keilzinkenfestigkeit und deren Streuung sowie von der Trägergröße und der Belastungsart ("Volumeneffekt") bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen und die Vorhersagen des statistischen Modells wurden mit Hilfe von insgesamt 42 Biegeversuchen mit 600 mm hohen Brettschichtholzträgern überprüft. Hierbei wurden 6 Versuchsreihen (à 7 Träger) mit unterschiedlichen Anforderungen an die Holzeigenschaften der Lamellen geprüft. Diese Anforderungen stellten mögliche Grenzwerte unterschiedlicher Arten der Holzsortierung dar (visuell, maschinell und kombiniert visuell/maschinell).

Für jede Versuchsreihe wurde die Tragfähigkeit der zugehörigen Träger mit Hilfe des "Karlsruher Rechenmodells" und des statistischen Modells berechnet. Hierbei konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden: bei sämtlichen Versuchsreihen lag die größte Abweichung zwischen berechneter und

ermittelter Festigkeit (Mittelwerte) unter 5%, wobei die Vorhersage in allen Fällen auf der sicheren Seite lag.

Als wichtigste Ergebnisse dieser Versuche sind zu nennen:

- schärfere Anforderungen an die Ästigkeit der Brettlamellen bewirken ein häufigeres Auftreten eines Keilzinkenversagens, so daß eine strengere visuelle Holzsortierung nur bedingt zu höheren Festigkeiten führt;
- werden bestimmte Mindestanforderungen an die Rohdichte und/oder den Elastizitätsmodul der Bretter gestellt, so sind deutlich höhere Festigkeiten zu erreichen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich diese Holzeigenschaften nicht nur auf die Festigkeit der Brettlamellen selbst auswirken, sondern als auch auf die der Keilzinkenverbindungen.

Mit diesen Trägerversuchen konnten somit eindrucksvoll die Möglichkeiten bzw. das Potential einer maschinellen Holzsortierung im Hinblick auf die Steigerung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern aufgezeigt werden.

Im Gegensatz zu den Brettlamellen selbst reicht im Falle einer Keilzinkenverbindung die alleinige Kenntnis der Holzeigenschaften nicht aus, um deren Festigkeit mit ausreichender Sicherheit vorherzusagen zu können. Hier ist aufgrund der Bedeutung der produktionsabhängigen Einflußfaktoren (Leim, Schärfe der Fräser usw.) eine laufende Kontrolle der Keilzinkenqualität d.h. -festigkeit erforderlich. Im Hinblick auf die Tatsache, daß bei Brettschichtholzträgern die maßgebenden äußeren Lamellen vornehmlich auf Zug beansprucht werden, wäre eine laufende Überwachung der Keilzinkenzugfestigkeit in den Betrieben wünschenswert. Dies ist aber kaum durchführbar, so daß nur die Möglichkeit verbleibt, die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung über deren Biegefestigkeit abzuschätzen.

Daher wurde im Rahmen dieses Vorhabens das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen mit Hilfe von jeweils 360 Zug- und Biegeversuchen untersucht. Zum besseren Vergleich der Festigkeitswerte wiesen die Zug- und Biegeproben jeweils paarweise identische Holzeigenschaften (Rohdichte und Elastizitätsmodul) auf. Als wichtigste Ergebnisse dieser Versuche sind zu nennen:

- das Verhältnis charakteristische Zugfestigkeit zur charakteristischen Biegefestigkeit ergab sich unabhängig vom

- Keilzinkenprofil und den Holzeigenschaften der keilgezinkten Brettabschnitte zu etwa 0,65;
- eine Eingrenzung der Streuung der Holzeigenschaften bewirkte ebenfalls eine geringere Streuung der Festigkeitswerte. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die bei der Bemessung ausschlaggebende charakteristische Festigkeit (5%-Fraktile) von großer Bedeutung;
 - mit einer Mindestanforderung an den Elastizitätsmodul der Brettlamellen von $E \geq 15000 \text{ N/mm}^2$ sind etwa 30-40% höhere charakteristische Festigkeitswerte zu erreichen, als dies mit der derzeit praktizierten rein visuellen Holzsortierung der Fall ist.

Auch diese Versuche zeigten somit die Vorteile einer maschinellen Holzsortierung auf der Basis der Rohdichte und/oder des Elastizitätsmoduls auf.

Auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurden drei verschiedene Vorschläge für die Bemessung von Brettschichtholzbiegeträgern gemacht, die alle den festgestellten Einfluß der Trägergröße (Volumeneffekt) berücksichtigen. Der Einfluß der Keilzinkenverbindungen wird in Form von produktionstechnischen Anforderungen berücksichtigt, die von den Leimbaubetrieben im Rahmen einer laufenden Qualitätsüberwachung erfüllt werden müssen.

Im Hinblick auf eine (möglichst) einfache Bemessung befürworten die Autoren den nachfolgend beschriebenen Vorschlag, bei dem der Bemessung ein charakteristischer Festigkeitswert zugrundegelegt wird, der ohne weitere Abminderung auch das Tragverhalten von großen Trägern mit ausreichender Sicherheit erfaßt. Hierdurch wird erreicht, daß bei kleinen Trägern ein genauerer Nachweis zur Berücksichtigung des (in diesem Falle günstigen) "Volumeneffektes" geführt werden darf, im Gegensatz zu den beiden anderen Bemessungsvorschlägen jedoch nicht geführt werden muß:

Berechnung der vorhandenen Spannung:

$$\sigma_B = \frac{M}{W}$$

Biegespannungsnachweis:

$$\max \sigma_B \leq \sigma_{5,v}^0 / \gamma_{ges} \quad ,$$

wobei $\sigma_{5,v}^0$ der charakteristischen Biegefestigkeit des betrachteten Standard-Verbundträgers mit einer Höhe von $H_0 = 600 \text{ mm}$ und einer

Länge von $L_0 = 10800$ mm entspricht (Tabellenwert). Bei Brettschichtholzträgern mit homogenem Trägersaufbau (Lamellen einer Festigkeitsklasse) ist $\sigma_{5,v}^0 = \sigma_{5,H}^0$.

Bei Brettschichtholzträgern mit $H < 600$ mm oder $L < 10800$ mm darf folgender Nachweis geführt werden:

$$\max \sigma_B \leq \sigma_{5,v} / \gamma_{ges} \quad ,$$

mit

$$\sigma_{5,v} = \left(\frac{L}{10800} \cdot \frac{H}{600} \right)^{-0,1} \cdot \sigma_{5,v}^0 \quad .$$

Anforderungen an die charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen:

$$f_{B,5,KZV} \geq 1,32 \cdot \sigma_{5,H}^0 \quad .$$

Die Ergebnisse dieser Forschungsreihe bildeten in den vergangenen Jahren die Grundlagen zur Erarbeitung von Festlegungen und Regelungen im Rahmen der europäischen Harmonisierung (Eurocode 5, CEN) und flossen somit unmittelbar in die internationale Normung ein.

11 Literatur

- [1] ASTM D 3737-87. Standard Method for establishing stresses for structural glued laminated timber (glulam)
- [2] CP 112 1967: The structural use of timber, part 2. London, British Standards Institution
- [3] Eurocode Nr.5 (Entwurf) 1987: Gemeinsame einheitliche Regeln für Holzbauwerke. Bericht EUR 9887 der Kommission der Europäischen Gemeinschaften
- [4] ISO 8375 1985: Solid timber in structural sizes - Determination of some physical and mechanical properties

- [5] Aplin, E.N. 1972: Stiffness - graded Eastern Spruce laminated beams. *Forest Products Journal* 22(1): 26 - 31
- [6] Bohannon, B. 1964: Prestressed laminated wood beams. US Forest Service, FPL 8, Madison, Wisc.
- [7] Bohannon, B. 1966: Effect of size on bending strength of wood members. U.S. Forest Service, Research Paper FPL 56, Madison, Wisc.
- [8] Bohannon, B. 1966: Flexural behaviour of large glued-laminated beams. U.S. Forest Service, Research Paper FPL 72, Madison, Wisc.
- [9] Bohannon, B.; Moody, R.C. 1969: Large glued - laminated timber beams with two grades of tension laminations. U.S.D.A. Forest Service Research Paper FPL 113, Madison, Wisc.
- [10] Colling, F. 1986: Einfluß des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Rechteckträgers. *Holz als Roh- und Werkstoff* 44: 121 -125 und 179 - 183
- [11] Colling, F. 1986: Influence of volume and stress distribution on the shear strength and tensile strength perpendicular to grain. CIB-W18/19-12-3, Florence, Italy
- [12] Colling, F.; Görlacher, R. 1989: Eigenschaften des in Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes. *Bauen mit Holz* 91: 327 - 331
- [13] Colling, F. 1990: Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe

- [14] Colling, F.; Ehlbeck, J.; Görlacher, R. 1991: Glued laminated timber - Contribution to the determination of the bending strength of glulam beams. CIB-W18, Oxford, UK
- [15] Egner, K. 1941: Festigkeit von aus kunstharzverleimten Brettern zusammengesetzten, geraden und gebogenen Balken. Holz als Roh- und Werkstoff 4: 9
- [16] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1984: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe
- [17] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Teil 2: Eingangsdaten für das Rechenmodell. Holz als Roh- und Werkstoff 43: 369 - 373
- [18] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1986: Strength of glued laminated timber. CIB-W18/19-12-1, Florence, Italy
- [19] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen. Bauen mit Holz 89(10): 646 - 655
- [20] 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 der Universität Karlsruhe
- [21] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Wenz, J. 1989: Prüfung der Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen der Lamellen für Brettschichtholz. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe
- [22] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1990: Bending strength of glulam beams - A design proposal. CIB-W18, Lisbon, Portugal
- [23] Fewell, A.R.; Curry, W.T. 1983: Depth factor adjustments in the determination of characteristic bending stresses for visually stress - graded timber. The Structural Engineer 61B(2): 35 - 40.

- [24] Filler, M.C.; Hofstrand, A.D.; Howe, J.P. 1964: Laminated beam design for four Western Softwoods. *Forest Products Journal* 14(10): 451 - 455
- [25] Fox, S.P. 1978: Development and tests of 26f - E Hem - fir glulam beams. *Forest Products Journal* 28(6): 48 - 55
- [26] Freas, A.D.; Selbo, M.L. 1954: Fabrication and design of glued - laminated wood structural members. USDA Techn. Bull. 1069
- [27] Glos, P. 1978: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff - und Einwirkungskenngrößen. *Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke*, Heft 35, SFB 96, München
- [28] Görlacher, R. 1989: Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. *Dissertation der Fakultät für Bauingenieur - und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe*
- [29] Heimeshoff, B.; Glos, P. 1980: Zugfestigkeit und Biege - E - Modul von Fichten - Brettlamellen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 38: 51 - 59
- [30] Johansson, C.-J. 1983: Hallfasthet hos fingerskarvat virke till limträ: Bestämning av böj - och draghallfasthet hos fingerskarvade limträlamellar. *Teknisk Rapport, Sp - rapp 10, Borås, Statens Provingsanstalt*
- [31] Johansson, C.-J. 1986: Hallfasthet hos fingerskarvat virke till limträ: Fingerskarvade höghallfasta limträlameller. *Teknisk Rapport, Sp - rapp 09, Borås, Statens Provingsanstalt*
- [32] Kolb, H. 1974: Versuche mit verleimten Holzbauteilen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 32: 257 - 262
- [33] Kolb, H.; Frech, P. 1977: Testing of big glulam timber beams. *CIB-W18/8-12-1, Bruxelles, Belgique*
- [34] Larsen, H.J. 1980: Tests of beams. *Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Danmark*
- [35] Littleford, T.W. 1974: Tests of laminated beams from E - rated Western Spruce and Lodgepole Pine. *Western Forest Products Laboratory, Vancouver, BC, Report VP - X - 132*
- [36] Madsen, B.; Littleford, T.W. 1962; Finger joints for structural usage. *Forest Products Journal* 2: 68 - 73.
- [37] Madsen, B.; Buchanan, A.H. 1984: Size effects in timber explained by a modified weakest link theory. *IUFRO, Xalapa, Mexico*

- [38] Marx, C.M.; Moody, R.C. 1981: Bending strength of shallow glued - laminated beams of a uniform grade. Forest Products Laboratory, Research Paper FPL 380, Madison, Wisc.
- [39] Marx, C.M.; Moody, R.C. 1981: Strength and stiffness of small glued - laminated beams with different qualities of tension laminations. Forest Products Laboratory, Research Paper FPL 381, Madison, Wisc.
- [40] Marx, C.; Moody, R.C. 1982: Effect of lumber width and tension lamination quality on the bending strength of four - ply laminated beams. Forest Products Journal 32(1): 45 - 52
- [41] Metzger, P. 1991: Verhältnis Zug- zu Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen. Vertieferarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe (unveröffentlicht)
- [42] Moody, R.C.; Bohannon, B. 1970: Flexural properties of glued - laminated Southern Pine beams with lamination positioned by visual - stiffness criteria. U.S.D.A. Forest Service Research Paper FPL 127, Madison, Wisc.
- [43] Moody, R.C. 1974: Design criteria for large structural glued - laminated timber beams using mixed species of visually graded lumber. USDA Forest Service Research Paper FPL 236, Madison Wisc.
- [44] Moody, R.C. 1977: Improved utilization of lumber in glued - laminated beams. USDA Forest Service, Research Paper FPL 292, Madison Wisc.
- [45] Newlin, J.A.; Trayer, G.W. 1924: Form factor of beams subjected to transverse load only. NACA Report No. 181
- [46] Radovic, B.; Rohlfing, H. 1986: Untersuchungen über die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlichem Verschwächungsgrad. Forschungsvorhaben I. 4 - 34701, FMFA, Stuttgart
- [47] Shuler, C.E.; Grant, D.A.; Moody, R.C. 1979: Evaluation of glued laminated beams of Eastern Spruce and Eastern Hemlock. Forest Products Journal 25(7): 23 - 28
- [48] Steck, G. 1982: Die Zuverlässigkeit des Vollholzbalkens unter reiner Biegung. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur - und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe
- [49] Weibull, W. 1939: A statistical theory of the strength of materials. Ing. Vetensk. Akad. Handl. No. 151

- [50] Wilson, T.R.C.; Cottingham, W.S. 1952: Tests of glued-laminated wood beams and columns and development of principles of design. US Forest Prod. Lab. Rep. R 1687
- [51] Ylinen, A. 1942: Über den Einfluß der Probekörpergröße auf die Biegefestigkeit des Holzes. Holz als Roh- und Werkstoff 5(9): 299 - 305

Bending strength of glulam beams in dependence on the wood properties of the laminations in view of the development of design proposals

Summary

Within the scope of this research project, a statistical model has been developed, on the base of which it is possible to describe the behaviour of the final product 'glulam' depending on the 'true' strength distributions of the beams with finger joint failure and the beams with wood failure in knot areas. This separation renders the possibility to clearly describe the strength determining influence of each parameter.

The required 'true' strength distributions were determined by the 'Karlsruhe Calculation Model' depending on knot size, wood density, modulus of elasticity (MOE) and length of the boards, the strength of finger joints and the corresponding variation as well as the size of beams and the load distribution (Monte Carlo simulations).

The results of the calculations were verified by 42 bending tests with glulam beams having a depth of 600 mm. The laminations were selected according to different criterions concerning knot size, wood density and MOE. A very good conformity between calculation and test results was stated (differences at maximum 5 %). These tests clearly showed the potential of mechanical grading of the laminations in view of an increase of the bearing capacity of glulam beams.

This tendency was confirmed by 720 bending and tension tests with finger joints. A simple limitation of the occurring variation of wood properties (wood density and MOE) results in a distinct increase of the strength values, even if the mean quality was maintained. Absolutely realistic minimum requirements raised to the wood density and the MOE of the laminations resulted in an increase of 30 to 40 % of the characteristic strength values compared with the values actually attainable.

Based on the results of this project, several proposals for the design of glulam beams were developed. The predominant influence of the finger joints calls for some minimum requirements raised to their bending strength.

Résistance du bois lamellé collé en fonction des propriétés des lamelles en vue du développement de propositions de calcul

Résumé

Au cours de ce projet de recherches,, un modèle statistique fût développé, avec l'aide duquel il est possible de décrire le comportement du produit final 'bois lamellé' collé sur la base des 'pures' distributions de résistance des poutres avec rupture causée par les aboutages et des poutres avec rupture causée par les noeuds. Ce démembrement rend possible de décrire en détail l'influence sur la résistance de chacun des paramètres.

Les 'pures' distributions de résistance requises furent déterminées avec le 'Modèle de Calcul de Karlsruhe' en fonction de la grandeur des noeuds, de la masse volumique du bois, du module d'élasticité et de la longueur des planches usées, de la résistance des aboutages et de la répartition correspondante, ainsi que des dimensions des poutres et du chargement (simulations Monte Carlo).

Les résultats de calcul furent vérifiés à l'aide de 42 essais avec des poutres ayant une hauteur de 600 mm. Les lamelles furent choisies suivant des exigences différentes (classification visuelle et machinelle). Une très bonne concordance entre les calculs et les essais pouvait être constatée (divergence maximale 5%). Avec l'aide de ces essais, les possibilités (le potentiel) de la classification machinelle pouvait être démontrée clairement.

Cette tendance fût confirmée par 720 essais en traction et flexion avec des aboutages. Ici la simple limitation de la variation des propriétés du bois (masse volumique et module d'élasticité) menait à une augmentation distincte de la résistance, même si la qualité moyenne restait constante. Posant des exigences minimum tout à fait réalistes, une augmentation de 30 à 40% de la résistance caractéristique, comparée avec les valeurs actuellement réalisables, fût observée.

Basées sur les connaissances acquises au cours des recherches, différentes propositions de calcul furent développées. L'influence prédominante des aboutages fût considérée dans des exigences minimum concernant leur résistance à flexion.