

**Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz
in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR – INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. François Colling

aus M'Bandaka (Zaire)

Tag der mündlichen Prüfung : 23.05.1990
Hauptreferent : Univ.-Prof. Dr.-Ing. J Ehlbeck
Korreferenten : Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Brüninghoff
em. o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Möhler

Karlsruhe 1990

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Hauptreferates und die wertvollen Diskussionen, die den Fortgang der Arbeit begleiteten sowie für die bereitwillige Unterstützung, die er mir stets zukommen ließ.

Mein herzlicher Dank gilt ebenso Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinz Brüninghoff für die kritische Durchsicht der Arbeit und die freundliche Übernahme des ersten Korreferates.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn em. o. Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr.-Ing E.h. Karl Möhler für sein Interesse an der Arbeit und die freundliche Übernahme des zweiten Korreferates und der damit verbundenen Mühen.

Großen Dank schulde ich auch meiner Frau Iris, die nicht nur jedes Wort dieser Arbeit getippt und gelesen hat, sondern mir während der ganzen Zeit auch viel Geduld und Verständnis entgegengebracht hat.

Ich wünschte nur, mein Vater hätte das alles noch erleben können.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>		Seite
1	Einleitung	1
2	Derzeitiger Kenntnisstand	6
2.1	Allgemeines	6
2.2	Einfluß der Ästigkeit des Gesamtträgers	8
2.3	Einfluß der Versagensart	15
2.4	Einfluß der Holzeigenschaften der Decklamelle	18
2.5	Einfluß der Trägergröße	25
2.6	Mögliche Verstärkungsmaßnahmen	35
3	Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen	41
3.1	Derzeitiger Kenntnisstand	41
3.2	Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von festigkeitsrelevanten Einflußgrößen	48
3.2.1	Allgemeines	48
3.2.2	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	50
3.2.2.1	Proben, die bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt wurden	51
3.2.2.2	Einfluß der Versagensart	55
3.2.2.2.1	Proben mit überwiegendem Keilzinkenversagen	55
3.2.2.2.2	Proben mit überwiegendem Holzversagen	56
3.2.2.2.3	Proben mit Mischbruch	58
3.2.2.3	Einfluß der Holzeigenschaften	58
3.2.2.3.1	Einfluß des Elastizitätsmoduls, der Rohdichte, der Jahrringbreite und des Frühholzanteiles	59
3.2.2.3.2	Einfluß der Markröhre	63
3.2.2.4	Einfluß der Keilzinkengeometrie	65
3.2.2.5	Einfluß von produktionsabhängigen Faktoren	67
3.2.3	Zusammenfassung	69
4	Tragverhalten von Brettabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit in einem Brettschichtholzträger	71
4.1	Allgemeines	71
4.2	Träger mit konstanten Lamellen-Elastizitätsmoduln	72
4.3	Träger mit nicht konstanten Lamellen-Elastizitätsmoduln	76

	Seite
5	Das Rechenmodell 82
5.1	Das Simulationsprogramm 83
5.1.1	Lage der Keilzinkenverbindungen 83
5.1.2	Zuordnung der Holzfeuchte 85
5.1.3	Zuordnung der Rohdichte 86
5.1.4	Zuordnung der Ästigkeit 86
5.1.5	Bestimmung des Zellen-Elastizitätsmoduls 91
5.1.5.1	Nicht keilgezinkte Brettabschnitte 91
5.1.5.2	Keilgezinkte Brettabschnitte 94
5.1.6	Bestimmung der Zellen-Festigkeit 95
5.1.6.1	Nicht keilgezinkte Brettabschnitte 95
5.1.6.2	Keilgezinkte Brettabschnitte 100
5.1.7	Variationsmöglichkeiten 101
5.2	Das Finite Elemente Programm 103
5.2.1	Nichtlineares Tragverhalten des Holzes unter Druckbeanspruchung 106
5.2.2	Ausfall eines Elementes im Zugbereich 110
5.2.3	Versagenskriterien 113
5.3	Überprüfung des Rechenmodells mit Hilfe von Trägerversuchen 115
6	Das theoretische Modell 118
6.1	Aufteilung des Endproduktes "Brettschichtholz" in die beiden Materialien "Keilzinkenverbindung" und "Holz" 118
6.2	Bestimmung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der Materialien "Keilzinkenverbindung" und "Holz" 120
6.3	Bestimmung der Auftretenshäufigkeit einer bestimmten Versagensart 130
6.4	Zahlenbeispiel 130

	Seite	
7	Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der Materialien "Keilzinkenverbindung" und "Holz"	132
7.1	Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen	135
7.1.1	Allgemeines	135
7.1.2	Einfluß der Keilzinkenzugfestigkeit	138
7.1.3	Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart	139
7.1.3.1	Einfluß der Trägerlänge	139
7.1.3.2	Einfluß der Trägerhöhe	144
7.1.3.3	Einfluß der Belastungsart	147
7.1.4	Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften	152
7.2	Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen	154
7.2.1	Allgemeines	154
7.2.2	Einfluß der Holzeigenschaften	157
7.2.3	Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart	163
7.2.3.1	Einfluß der Trägerlänge	164
7.2.3.2	Einfluß der Trägerhöhe	165
7.2.3.3	Einfluß der Belastungsart	167
7.3	Zusammenstellung der Simulationsergebnisse	169
7.3.1	Träger mit Keilzinkenversagen	169
7.3.2	Träger mit Holzversagen	172
8	Überprüfung des theoretischen Modells mit Hilfe von Trägerversuchen	174
8.1	Darstellung der Versuche	174
8.2	Prognosen des theoretischen Modells	180
8.3	Vergleich zwischen Versuch und Rechnung	185
9	Bemessungsvorschlag	189
10	Zusammenfassung	196
11	Literatur	199

	Anhang	Seite
A1	Einfluß der Reststreuung der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes auf die Simulationsergebnisse	A - 1
A2	Einfluß der Holzfeuchte	A - 4
A3	Einfluß der Lage der Keilzinkenverbindungen	A - 8
A4	Einfluß der Anzahl der Decklamellen	A - 12

1 Einleitung

Konstruktionen aus Brettschichtholz sind inzwischen weit verbreitet und haben traditionelle Bauweisen aus Vollholz vielfach verdrängt. Grund hierfür ist, daß Brettschichtholz gegenüber dem Vollholz einige Vorteile besitzt, die in der Herstellungsweise von Brettschichtholzträgern begründet sind: Bretter werden mittels Keilzinkenverbindungen zu einer sogenannten Endloslamelle miteinander verbunden, von der dann die Lamellen mit der gewünschten Länge herausgeschnitten werden. Diese Lamellen werden übereinandergelegt und miteinander verleimt und ergeben so, nach dem abschließenden seitlichen Hobeln, den fertigen Brettschichtholzträger. Das Prinzip des Aufbaues eines Brettschichtholzträgers aus einer Endloslamelle ist in Bild 1.1 dargestellt.

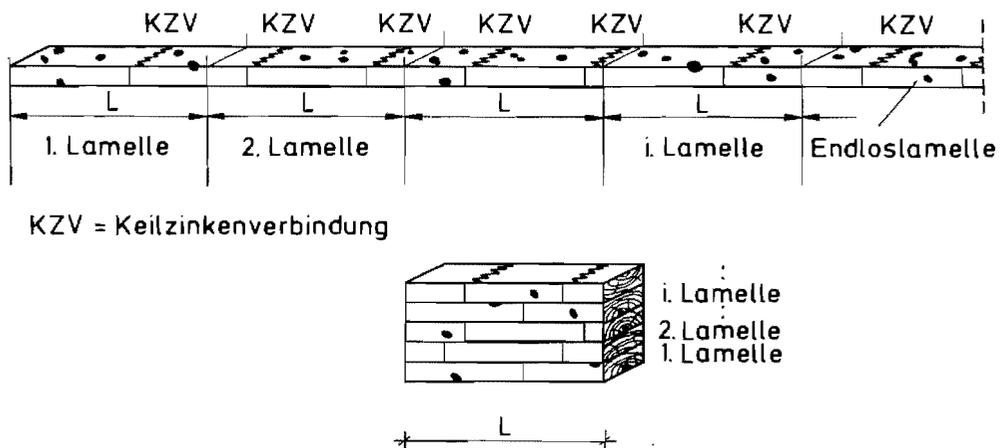


Bild 1.1: Prinzip des Aufbaues eines Brettschichtholzträgers aus einer Endloslamelle

Damit der Leim abbinden kann, darf die Holzfeuchte der Bretter 15% nicht überschreiten, das Holz muß also vorher getrocknet werden. Dies ist aufgrund der geringen Dicke der Bretter mit Hilfe der technischen Holz Trocknung relativ problemlos möglich, was bei den größeren Vollholzquerschnitten nicht der Fall ist.

Ein Brettschichtholzträger ist somit zum Zeitpunkt des Einbaues bereits trocken. Das Nachtrocknen im Bauwerk während der Nutzung und die damit verbundenen Schwindverformungen können durch

Steuerung der Holzfeuchte in der Trockenkammer auf ein Mindestmaß reduziert werden. Auch ist ein Brettschichtholzträger aufgrund des lamellenförmigen Aufbaues "homogener" als ein Vollholzbalken und daher schon von Haus aus weniger anfällig gegen Schwind- und Quellverformungen.

Eine geringe Holzfeuchte wirkt sich aber nicht nur günstig auf das Arbeitsverhalten eines Bauteiles aus Holz aus, sondern auch auf dessen Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften, die mit abnehmender Holzfeuchte zunehmen (siehe z.B. KOLLMANN [58]).

Ein weiterer Vorteil der Brettschichtholzbauweise liegt darin, daß man nicht mehr so stark an die Dimensionen des gewachsenen Holzes gebunden ist, d.h. es sind Trägerabmessungen und Trägerformen (z.B. gekrümmte Träger) möglich, die in Vollholzbauweise undenkbar sind.

Auch die Schwächung infolge der sogenannten Holzfehler ist in einem Brettschichtholzträger geringer als in einem Vollholzbalken. So sind, z.B. aufgrund des periodischen Wachstums der Bäume, die Äste in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen über die Länge verteilt. An diesen Stellen sind dann häufig mehrere Äste gleichzeitig vorhanden, so daß in einem Vollholzbalken infolge dieser Astansammlungen große Querschnittsschwächungen auftreten können, die die Tragfähigkeit in diesen Bereichen wesentlich beeinträchtigen. Bei Brettschichtholzträgern verteilen sich diese Äste durch das zufällige Übereinanderlegen der Lamellen über den gesamten Träger, so daß die Wahrscheinlichkeit, daß in einem Querschnitt mehrere Äste gleichzeitig auftreten, gering ist. In einem vielschichtigen Brettschichtholzträger verlieren somit einzelne Fehler an Bedeutung, was zu einer weiteren Homogenisierung des Trägers führt.

Mit Hilfe der Brettschichtholzbauweise wurde also eine Vergütung des Werkstoffes Holz erreicht, die ihren Niederschlag auch in der Bemessung gefunden hat: so sind z.B. in DIN 1052 [3] für Brettschichtholz in einigen Fällen höhere Materialkennwerte und zulässige Spannungen vorgesehen als für Vollholz vergleichbarer Güte.

Die Einteilung in die einzelnen Güteklassen erfolgt zur Zeit noch auf rein visuellem Wege nach DIN 4074 [4], und zwar hauptsächlich anhand der Größe der auftretenden Äste. Weitere festigkeitsrelevante Einflußgrößen, wie z.B. Rohdichte oder Elastizitätsmodul der Bretter, werden hierbei noch nicht berücksichtigt.

Zahlreiche Versuche haben jedoch bereits wiederholt gezeigt, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern deutlich gesteigert werden kann, wenn in den äußeren Trägerbereichen - insbesondere in der Zugzone - Lamellen mit hohem Elastizitätsmodul oder mit hoher Rohdichte angeordnet werden. Deshalb hat sich in Nordamerika, aber auch z.B. in Skandinavien oder in Großbritannien, die maschinelle Holzsortierung bereits durchgesetzt, während in der BRD erst in der neuen *DIN 4074* die Möglichkeit der maschinellen Holzsortierung vorgesehen ist.

In einigen Ländern gibt es im Gegensatz zu den Güteklassen auch sogenannte Festigkeitsklassen für maschinell sortiertes Brettschichtholz, die aufgrund einiger Versuche im Einzelfall festgelegt wurden. Der Gültigkeitsbereich solcher Versuche ist jedoch auf das bei diesen Versuchen verwendete Brettmaterial beschränkt. Will man Brettschichtholzträger aus Brettern herstellen, die nach anderen Sortierkriterien ausgewählt werden, so sind zur Festlegung etwaiger Bemessungswerte erneut Versuche erforderlich, weil es zur Zeit noch kein Bemessungsverfahren oder Rechenmodell gibt, das in der Lage ist, Änderungen des Ausgangsmaterials zu erfassen.

Wie aus *Bild 1.1* ersichtlich ist, besteht ein Brettschichtholzträger aus den folgenden drei "Materialien":

- den fehlerfreien Brettabschnitten, die aber für die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern von untergeordneter Bedeutung sind,
- den Brettabschnitten mit Ästen, die in der Regel geringere Festigkeiten besitzen als das fehlerfreie Holz, und
- den Keilzinkenverbindungen.

Während die Ästigkeit bei der Holzsortierung ein wichtiges Kriterium darstellt und somit bei der Bemessung - z.B. über die zulässigen Spannungen - auch berücksichtigt wird, hat die Qualität der Keilzinkenverbindungen noch keinen Eingang in die unterschiedlichen Bemessungskonzepte gefunden. Grund hierfür ist u.a., daß die Versuche zur Festlegung von Bemessungswerten häufig an kleinen Trägern durchgeführt wurden, bei denen keine Keilzinkenverbindungen im hochbeanspruchten Bereich auftraten. Erst später, als sich die Prüfung von Trägern in Bauteilgröße durchsetzte, wurde man auf das Problem der Keilzinkenverbindungen aufmerksam, weil diese oft für das Versagen der Brettschichtholzträger verantwortlich waren.

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen und den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen unter Berücksichtigung streuender Einflußgrößen.

Ein Überblick über die bisher durchgeführten Untersuchungen ist in *Kapitel 2* angegeben.

In *Kapitel 3* wird das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den beeinflussenden Größen, insbesondere der Holzeigenschaften der Bretter, beschrieben.

Das Tragverhalten von Brettabschnitten mit unterschiedlicher Steifigkeit in einem Brettschichtholzträger wird in *Kapitel 4* beschrieben. Hierbei werden neben der Vergütung, die durch das Verleimen der Lamellen erreicht wird (Laminierungseffekt), auch die in der äußeren Lamelle tatsächlich auftretenden Spannungen in Abhängigkeit vom Trägeraufbau, d.h. der Anordnung der Brettlamellen mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul über die Trägerhöhe, behandelt.

In *Kapitel 5* wird ein Rechenmodell auf der Basis der Methode der Finiten Elemente beschrieben, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern zu berechnen, und zwar unter Berücksichtigung sowohl der Holzeigenschaften der Bretter (Ästigkeit, Rohdichte, Elastizitätsmodul) als auch der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen. Dieses Rechenmodell ermöglicht unter Berücksichtigung der natürlichen Streuung dieser Einflußgrößen Traglastberechnungen nach Art der Monte - Carlo - Simulationen.

In *Kapitel 6* wird ein theoretisches Modell vorgestellt, in dem das Endprodukt "Brettschichtholz" in seine zwei festigkeitsbeeinflussenden Materialien "Keilzinkenverbindung" und "Holz" aufgeteilt wird. Ausgehend von den Festigkeitseigenschaften dieser beiden Materialien kann die erwartete Tragfähigkeit der zugehörigen Brettschichtholzträger mit Hilfe des beschriebenen statistischen "Mischverfahrens" bestimmt werden.

Das Tragverhalten der beiden Materialien "Keilzinkenverbindung" und "Holz" in Abhängigkeit von den jeweils beeinflussenden Größen wird in *Kapitel 7* beschrieben. Die Tragfähigkeiten der untersuchten Träger werden hierbei mit Hilfe des o.a. Rechenmodells berechnet.

Die Gültigkeit und die Anwendbarkeit des theoretischen Modelles wurden mit Hilfe von insgesamt 42 Trägerversuchen überprüft. Die Ergebnisse sind in *Kapitel 8* dargestellt.

Aufbauend auf den Ergebnissen der durchgeführten Simulationsrechnungen sowie der Trägerversuche wird in *Kapitel 9* ein Konzept zur Bemessung von Brettschichtholzträgern vorgeschlagen.

Besonders hinzuweisen ist noch auf den Anhang, in dem einige Randprobleme, wie z.B. der Einfluß des gegenseitigen Abstandes benachbarter Keilzinkenverbindungen oder der Anzahl der Decklamellen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern, behandelt werden.

2 Derzeitiger Kenntnisstand

2.1 Allgemeines

Die Brettschichtholzbauweise geht auf eine Erfindung des Weimarer Zimmermeisters Otto HETZER gegen Ende des vorigen Jahrhunderts zurück, der durch Verleimen einzelner Bohlen größere Balken herstellte. Diese Bauart wurde zunächst hauptsächlich von schweizer Betrieben aufgegriffen, setzte sich dann aber auch in Deutschland und später in Nordamerika durch, und ist heute in der ganzen Welt verbreitet.

Während anfänglich das Hauptaugenmerk wegen der damals verwendeten, nicht wetterbeständigen Kaseinleimen auf die Tragfähigkeit und die Haltbarkeit der Verleimung der Bretter miteinander gerichtet war, wurden schon bald die Vorteile dieser Bauweise in Bezug auf das Trag- und Verformungsverhalten der Brettschichtholzträger selbst deutlich. Zwar zeigten die Versuche von HÜBNER [47] mit "Holzbalken nach Bauweise Hetzer" im Jahre 1924, daß *"hinsichtlich Biegezugfestigkeit ein Unterschied zwischen Vollbalken ... und Hetzerbalken ... praktisch kaum besteht"*, es wurde allerdings deutlich darauf hingewiesen, daß bei den Brettschichtholzträgern eine geringere Streuung der Versuchswerte vorhanden war als bei Vollholzträgern. Die Größe der Streuung ist ein Maß für die Zuverlässigkeit und auch die Sicherheit einer Bauweise und spielt bei der Festlegung von charakteristischen Größen für die Bemessung eine wichtige Rolle. Die geringere Streuung im Fall der Brettschichtholzträger wurde auf die Vergütung zurückgeführt, die durch das Verleimen der einzelnen Bretter miteinander erreicht wurde: *"in diesen Zahlen liegt nun der deutliche Beweis, daß bei den vielteiligen Hetzerbalken einzelne Materialfehler an Bedeutung verlieren"*.

Da der Einfluß festigkeitsmindernder Faktoren bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlich mit Hilfe von Vollholzproben untersucht wurde, orientierte man sich bei der Bewertung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern zwangsläufig am Tragverhalten von Vollholzbalken. Zwar sind einige dieser ermittelten Abhängigkeiten qualitativ auch auf Brettschichtholzträger übertragbar, man erkannte jedoch bald, daß das Brettschichtholz ein eigenständiges "Material" darstellt, das nur z. T. den Gesetzen des Vollholzes unterliegt.

Die Amerikaner waren die ersten, die nach dem 2. Weltkrieg den neuen Werkstoff systematisch zu untersuchen begannen, während die Brettschichtholzbauweise in Deutschland etwas stiefmütterlich behandelt wurde. Obwohl bereits EGNER [26] 1941 deutlich auf die Vorteile und insbesondere auf die hohe Tragfähigkeit von "Schichtholzbalken" hingewiesen hatte, mußte STERR [86] noch 1963 bedauern, *"daß bei ausschließlicher Anwendung der Bemessungsvorschriften nach DIN 1052 die mechanisch vorteilhaften Eigenschaften der Schichtholzbalken nicht zur Geltung kommen können"*. Erst 1969 wurden höhere zulässige Spannungen für Brettschichtholz in die Bemessungsnorm aufgenommen, wie das in Amerika schon länger der Fall war.

Ziel der nun einsetzenden Untersuchungen war es aber nicht nur, die Tragfähigkeit von beliebig zusammengesetzten Brettschichtholzträgern zu untersuchen, sondern auch nach Wegen zu suchen, wie man Träger mit möglichst hoher Festigkeit herstellen kann. Dieses Bestreben führte zu einem schrittweisen Erkennen aller festigkeitsrelevanter Einflußfaktoren und ermöglichte so ein besseres Verständnis für das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den folgenden Abschnitten beschrieben. Die gemachten Aussagen werden hierbei z.T. zahlenmäßig mit Hilfe von Versuchsergebnissen unterlegt. Hierzu wurden bei der Durchsicht der internationalen Literatur alle verfügbaren Biegeversuche mit Brettschichtholzträgern gesammelt und in einer Datenbank zusammengefaßt.

Diese Datenbank umfaßt insgesamt 1767 Versuche¹ (Einzelwerte) und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. In diese Datenbank wurden, falls vorhanden, folgende Angaben aufgenommen:

- Holzart,
- Trägerabmessungen,
- Belastungsart (z.B. Abstand der Einzellasten),
- Biegefestigkeit (rechnerische Biegerandspannung $\sigma = M/W$ bei Erreichen der Höchstlast),
- Versagensart (Keilzinkenversagen, Holzversagen im Astbereich, Schubversagen),
- Güteklasse der Decklamelle (äußere Zuglamelle),

¹ aus [10], [12], [14], [15], [17], [24], [26], [30], [31], [34], [37], [40], [42], [47], [48], [49], [50], [51], [55], [59], [60], [61], [62], [64], [65], [67], [68], [70], [71], [72], [73], [75], [76], [78], [83], [84], [86], [88]

- Rohdichte der Decklamelle,
- Elastizitätsmodul der Decklamelle,
- Holzfeuchte der Decklamelle,
- größter in der Decklamelle vorhandener KAR - Wert²,
- größter auftretender I_K/I_G - Wert des Trägers³,
- ob Keilzinkenverbindungen in der Decklamelle vorhanden waren und, wenn ja, wo (im Bereich des maximalen Momentes oder außerhalb).

Eine Zusammenstellung der in der Literatur gemachten Angaben ist in Tabelle 2.1 angegeben. Die einzelnen Holzarten sind hierbei in beliebiger Reihenfolge angegeben. Auch wurde darauf verzichtet, verwandte Holzarten zusammenzufassen.

Bei diesen Versuchen wurden etwa 500 m^3 Brettschichtholz für Forschungszwecke zu Bruch gefahren, eine nicht unbeträchtliche Zahl, wenn man bedenkt, daß es noch immer kein befriedigendes Konzept zur Bemessung von Brettschichtholzträgern gibt.

2.2 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 (siehe hierzu auch *Kapitel 4*), 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 beeinträchtigt wird.

² KAR-Wert = Knot Area Ratio = Verhältnis der Fläche der in einem Brettquerschnitt auftretenden Äste zur Brutto - Querschnittsfläche (siehe auch *Abschnitt 5.1.4*).

³ I_K/I_G -Wert (siehe auch *Abschnitt 2.2*):

I_K = Flächenmoment 2. Grades aller in einem Querschnitt des Brettschichtholzträgers auftretenden Äste

I_G = Flächenmoment 2. Grades des Bruttoquerschnittes des Brettschichtholzträgers

Tabelle 2.1: Zusammenstellung über die Anzahl der in der Literatur gemachten Angaben über verschiedene Trägereigenschaften

Holzart	Anzahl der Versuche insges.	Versagensart	Lage der Keilzinkenverbindung	I_K/I_G -Wert	Eigenschaften der Decklamelle				
					größter KAR-Wert	Rohdichte	Elastizitätsmodul	ρ + max. KAR	E + max. KAR
					max.KAR	ρ	E		
1 Southern pine	228	228	223	23	128	198	223	128	123
2 Douglas fir	692	569	517	168	256	169	315	147	134
3 Eastern spruce	56	56	32	-	-	-	56	-	-
4 Eastern hemlock	22	22	-	-	-	-	22	-	-
5 Hem fir	46	46	25	-	30	30	46	30	30
6 Western woods	15	15	4	-	15	15	15	15	15
7 Fichte/Tanne	386	358	333	-	39	107	129	39	39
8 Larch	104	104	104	93	-	-	-	-	-
9 Scots pine	66	66	66	66	-	-	-	-	-
10 Sitka spruce	104	104	104	104	-	-	-	-	-
11 Western spruce	24	24	-	-	-	-	24	-	-
12 Western white pine	8	8	8	-	-	-	-	-	-
13 Western red cedar	8	8	8	-	-	-	-	-	-
14 White fir	8	8	8	-	-	-	-	-	-

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 [90] 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. Diese Untersuchungen besaßen jedoch zunächst nur theoretischen Wert, denn wer will und kann schon mit der Bemessung eines Trägers warten, bis dieser hergestellt ist und alle Äste genau vermessen sind, weil man ja erst dann die Tragfähigkeit abschätzen kann. Auch ist es, vom produktionstechnischen Standpunkt her gesehen, kaum durchführbar, daß die Lamellen so übereinandergelegt werden können, daß ein bestimmter I_K/I_G -Wert nicht überschritten wird.

Es wurde also ein Verfahren benötigt, mit dem es möglich ist, die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern abzuschätzen, die aus beliebigen Lamellen mit bekannter Güte aufgebaut sind. Die Notwendigkeit der Berechnung von zufällig aufgebauten Brettschichtholzträgern deutete darauf hin, daß es sich um ein statistisches Verfahren handeln würde.

1954 stellten FREAS/SELBO [41] ein solches Verfahren vor. Anhand von Untersuchungen an Brettern üblicher Güte ermittelten sie die Auftretenshäufigkeit von Ästen in einem 305 mm (1 foot) langen Brettabschnitt. Mit diesen statistischen Daten ist es möglich, die Ästigkeit eines Brettes zu simulieren und somit auch alle in einem simulierten Brettschichtholzträger auftretenden I_K/I_G -Werte zu berechnen. Simuliert man eine Vielzahl von Brettschichtholzträgern, so erhält man eine Verteilung für den größten in einem Brettschichtholzträger auftretenden I_K/I_G -Wert. Nach Festlegung eines

charakteristischen Wertes für die Bemessung, der je nach verwendeter Brettqualität unterschiedlich ist, kann dann die zulässige Biegespannung für den zugehörigen Brettschichtholzträger berechnet werden. Anhand von ASTM D 3737-87 [1] soll kurz aufgezeigt werden, wie dieser Rechengang aussieht.

Als Bezugsgröße dient die charakteristische Biegefestigkeit von kleinen, fehlerfreien aber nassen Proben (clear wood strength CWS). Dieser Festigkeitswert wird umgerechnet auf einen fehlerfreien Brettschichtholzträger mit einer Holzfeuchte von $u = 12\%$ ($\times 1,35$), mit einer Trägerhöhe von 300 mm unter konstanter Streckenlast und einem Verhältnis Spannweite/Trägerhöhe = 21 ($\times 0,743$). Die sich hieraus ergebende charakteristische Biegefestigkeit des Brettschichtholzträgers wird durch einen Wert von 2,1 geteilt, in dem ein pauschaler Sicherheitswert ($\approx 1,3$) und der Langzeiteffekt für eine insgesamt 10 Jahre einwirkende Bemessungslast ($\approx 1,6$) enthalten sind. Die zulässige Biegespannung (clear wood design stress CWDS) für einen fehlerfreien Brettschichtholzträger ergibt sich somit zu:

$$CWDS = CWS \cdot \frac{1,35 \cdot 0,743}{2,1} \quad (2.1)$$

Dieser Wert muß aber noch in Abhängigkeit von der Qualität der verwendeten Bretter und deren Anordnung im Brettschichtholzträger abgemindert werden. Diese Abminderung erfolgt mit dem Faktor

$$SR_b = (1 + 3 \cdot I_K/I_G) \cdot (1 - I_K/I_G)^3 \cdot (1 - 0,5 \cdot I_K/I_G) \quad (2.2)$$

Hierbei sind

$$SR_b = \text{strength ratio in bending, und}$$

$$I_K/I_G = \text{charakteristischer } I_K/I_G\text{-Wert in Abhängigkeit von der}$$

$$\text{Güte und Anordnung der Lamellen.}$$

Wird von den Voraussetzungen Trägergröße, Spannweite/Trägerhöhe, klimatische Verhältnisse, Lastgeschichte oder Belastungsart abgewichen, so sind weitere Modifikationen der zulässigen Spannung vorzunehmen.

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 [14] 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. [84] untersuchten Träger durchweg über den vorhergesagten Werten lagen. Versuche von MADSEN/LITTLEFORD [63] 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 [15] 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 [12] festgestellte Tendenz, daß der Einfluß der Decklamelle vom I_K/I_G -Konzept unterschätzt wird, d.h. daß geringe Änderungen der Ästigkeit der Decklamelle, die sich auf den I_K/I_G -Wert des Trägers kaum auswirken, größere Änderungen in der Tragfähigkeit zur Folge haben.

Diese Untersuchungen zeigten weiterhin, daß die Vorhersagen des I_K/I_G -Konzeptes am ehesten zutreffen, wenn bei den Brettschichtholzträgern eine hochwertige Decklamelle im Zugbereich angeordnet wird. Diese Feststellung veranlasste BOHANNAN/MOODY [16] dazu, die Versuche, die dem I_K/I_G -Konzept zugrunde lagen, nochmals auszuwerten. Bei diesen Nachuntersuchungen stellte sich heraus, daß die Träger mit einem I_K/I_G -Wert kleiner als 0,266 eine nahezu fehlerfreie äußere Zuglamelle besaßen. Da die I_K/I_G -Werte aller, bei den neueren Untersuchungen geprüften großen Brettschichtholzträger unter diesem Wert lagen, deutete dies darauf hin, daß eine hochwertige Decklamelle eigentlich eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit des I_K/I_G -Konzeptes darstellt. Daraufhin wurde das Konzept mit der Auflage beibehalten, daß die Decklamellen der Brettschichtholzträger einer bestimmten Mindestgüte entsprechen müssen.

Trotzdem waren noch nicht alle Zweifel an der Anwendbarkeit des I_K/I_G -Konzeptes beseitigt. Verstärkt wurden diese durch Untersuchungen, die 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 2.4*).

MOODY [72] 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. Diese unbefriedigende Übereinstimmung veranlasste MOODY [73] zu der Vermutung, daß die charakteristischen Biegefestigkeiten (CWS) kleiner fehlerfreier Proben nicht stimmen oder zumindest nicht auf Brettschichtholz anwendbar sind. Obwohl diese Festigkeitswerte aufgrund einer Vielzahl von Versuchen in Anlehnung an eine bestehende Prüfnorm statistisch abgesichert sind, wurde am modifizierten I_K/I_G -Konzept festgehalten und neue Bemessungswerte für fehlerfreies Brettschichtholz vorgeschlagen (vgl. ASTM D 3737-87 [1]).

In *Bild 2.1* sind die Versuchsergebnisse aus den Untersuchungen mit großen Trägern in Abhängigkeit vom jeweils größten I_K/I_G -Wert für Brettschichtholzträger aus Douglasienholz dargestellt. Ebenfalls in *Bild 2.1* angegeben ist die vom I_K/I_G -Konzept vorhergesagte charakteristische Biegefestigkeit, die sich unter Annahme der in *ASTM D 3737-87* vorgesehenen zulässigen Spannungen (CWDS) für fehlerfreie Brettschichtholzträger und der Abminderung dieses Wertes durch den Faktor SR_p nach *Gl (2.2)* ergibt.

Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzbiegeträgern wie erwartet mit wachsendem I_K/I_G -Wert abnimmt, und daß die Vorhersage nach dem I_K/I_G -Konzept dieser Tendenz zumindest näherungsweise folgt. Die Frage ist allerdings berechtigt, ob der Aufwand zur Bestimmung des charakteristischen I_K/I_G -Wertes in Abhängigkeit von Trägergröße, Trägeraufbau und Elastizitätsmodul der Lamellen und der anschließenden Berechnung des Faktors SR_p gerechtfertigt ist, oder ob dieses Verfahren durch den großen Rechenaufwand nur eine größere Genauigkeit vortäuscht, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden ist.

Die Versuche zeigten nämlich übereinstimmend, 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.

Diese Tatsache stellt aber m.E. das I_K/I_G -Konzept selbst in Frage, denn eine nahezu fehlerfreie Decklamelle liefert nur einen geringen Beitrag zum I_K/I_G -Wert, so daß nach dem I_K/I_G -Konzept die Tragfähigkeit dieser Träger von einem Wert abhängig ist, der sich ausschließlich aus der Ästigkeit von eigentlich "bedeutungslosen" Lamellen ergibt.

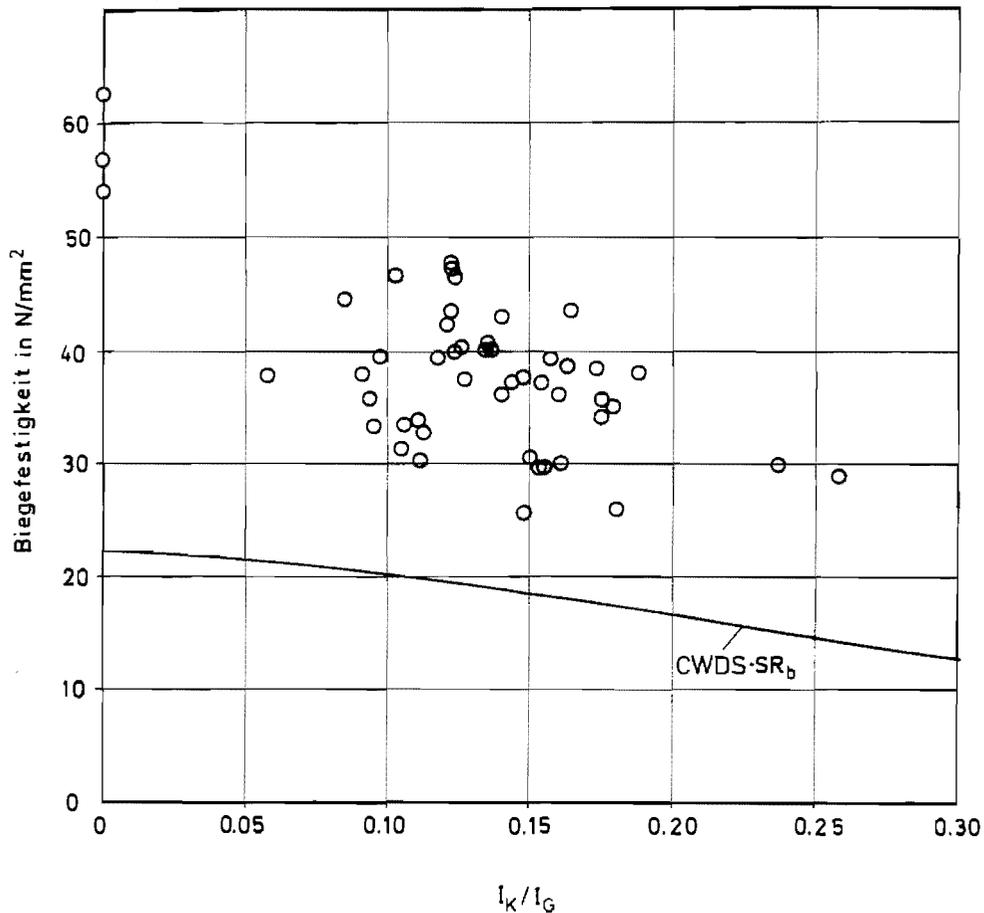


Bild 2.1: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit vom größten I_K/I_G -Wert; Douglas fir, Trägerhöhen 600-800 mm

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 2.4*). 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 Brett-schichtholzträgern 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 [65] für kleine Brett-schichtholzträger 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.

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 Brett-schichtholzträgern in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften der Brett-lamellen treffend zu beschreiben. Auch ist es mit diesem Konzept nicht möglich, den Einfluß der auftretenden Keilzinkenverbindungen auf die Tragfähigkeit von Brett-schichtholzträgern zu erfassen.

2.3 Einfluß der Versagensart

Wie im vorigen Abschnitt bereits angedeutet, wurden viele Untersuchungen mit Hilfe von kleinen Brett-schichtholzträgern 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 der beiden ersten, in *Kapitel 1* erwähnten "Materialien" - fehlerfreies Holz und Brettabschnitte mit Ästen - untersucht. Die Bedeutung der Keilzinkenverbindungen auf das Tragverhalten von Brett-schichtholzträgern wurde entweder nicht erkannt oder unterschätzt.

Erst als man dazu übergang, Brett-schichtholzträger in Bauteilgröße (structural sizes) 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 Brett-schichtholzträger mit "normalem" Holzversagen. Diese Beobachtungen veranlaßten u.a. APLIN [10], BOHANNAN/MOODY [15], FOX [40] und LITTLEFORD [62] 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 *Abschnitt 2.1* erwähnten Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung der Versagensart (Holzversagen im Astbereich bzw. Keilzinkenversagen) ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind getrennt für jede Holzart in *Bild 2.2* dargestellt.

Die Unterscheidung nach der Versagensart erweist sich als sehr effektiv: mit Ausnahme der Holzarten 4, 5 und 8 (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).

Wie aus *Bild 2.2* 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.

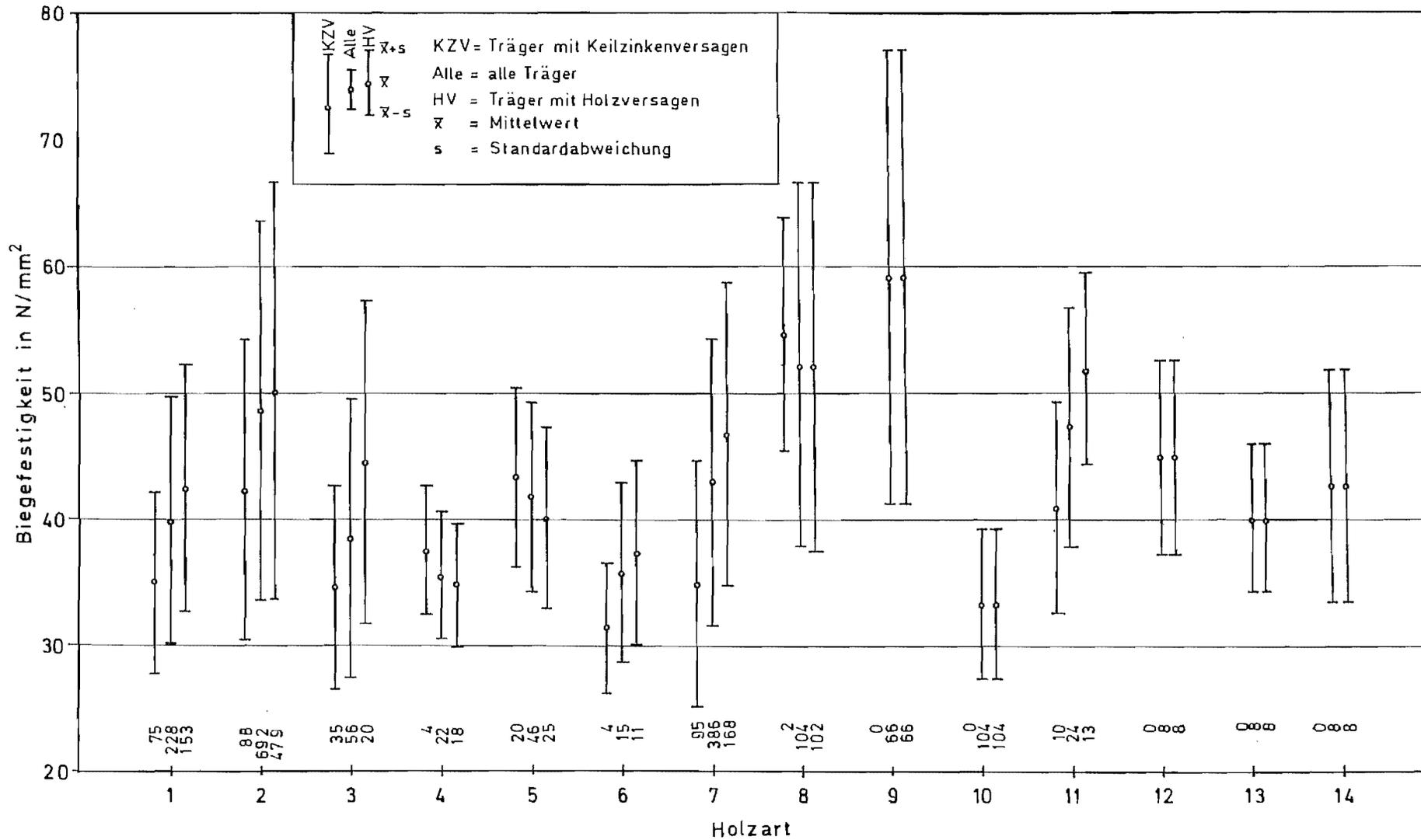


Bild 2.2: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern; Unterscheidung nach Holzart und Versagensart

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

In Anbetracht der Bedeutung, die den Keilzinkenverbindungen zukommt, wird das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den beeinflussenden Faktoren in *Kapitel 3* ausführlich beschrieben.

2.4 Einfluß der Holzeigenschaften der Decklamelle

Bereits 1941 schrieb EGNER [26], 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 2.2*). So zeigten z.B. Brettschichtholzträger, die im Innenbereich 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 [72]).

Weiterhin zeigten Versuche von BOHANNAN/MOODY [15] und MOODY [73], 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 [12], FILLER et al. [37] und MARX/MOODY [66], [67] 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 [10], FOX [40], LITTLEFORD [62] und MOODY/BOHANNAN [69]).

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 [63] 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 [56], 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.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die in *Abschnitt 2.1* erwähnten Versuche im Hinblick auf bestehende Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und den Holzeigenschaften der äußeren Zuglamelle, der sog. Decklamelle, ausgewertet. Hierbei wurde unterschieden, ob ein Träger infolge eines Holzversagens oder infolge eines Keilzinkenversagens zu Bruch ging.

Für die Träger mit Holzversagen sind die für die einzelnen Abhängigkeiten ermittelten Korrelationskoeffizienten in *Tabelle 2.2a* angegeben. Die hier angegebenen Zahlenwerte schwanken von Holzart zu Holzart und weichen z.T. erheblich voneinander ab. Dies kann aber u.a. mit den unterschiedlich großen Probenzahlen und den unterschiedlichen Streubreiten der Holzeigenschaften erklärt werden. So schwankte z.B. bei Holzart 6 der Elastizitätsmodul der Decklamellen nur zwischen 11000 und 14000 N/mm², so daß es aufgrund der Streuung der Festigkeitswerte kaum möglich ist, eine Beziehung zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und dem Elastizitätsmodul der Decklamelle rechnerisch nachzuweisen, noch dazu bei nur 11 zur Verfügung stehenden Versuchswerten. Die Bewertung dieser Zahlenwerte kann daher nur von qualitativer Art sein.

Aus *Tabelle 2.2a* sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- der Elastizitätsmodul der Decklamelle ist enger mit der Biegefestigkeit korreliert als die Rohdichte. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß der festigkeitsmindernde Einfluß der Äste im Elastizitätsmodul bereits teilweise enthalten ist, in der Rohdichte jedoch nicht;
- betrachtet man den Absolutwert der Korrelationskoeffizienten, so besteht zwischen der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern und dem größten KAR-Wert der Decklamelle eine Beziehung, die vergleichbar ist mit der des Elastizitätsmoduls;
- die engste Abhängigkeit besteht, wenn neben dem Elastizitätsmodul der Decklamelle noch deren größter KAR-Wert berücksichtigt wird.

Tabelle 2.2a: Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und den Eigenschaften der Decklamelle; Träger mit Holzversagen

Holzart	Eigenschaften der Decklamelle									
	N ^I	max. KAR	N ^I	Rohdichte ρ	N ^I	Elastizitätsmodul E	N ^I	ρ + max. KAR	N ^I	E + max. KAR
1 Southern pine	76	-0,40	123	0,27	150	0,28	76	0,50	73	0,57
2 Douglas fir	209	-0,54	114	0,08	185	0,47	100	0,40	91	0,46
3 Eastern spruce	0	-	0	-	20	0,41	0	-	0	-
4 East. hemlock	0	-	0	-	18	-0,10	0	-	0	-
5 Hem fir	21	-0,43	21	0,64	25	0,73	21	0,67	21	0,71
6 Western woods	11	-0,16	11	0,07	11	0,13	11	0,17	11	0,17
7 Fichte/Tanne	33	-0,58	44	0,43	44	0,56	33	0,68	33	0,68
8 Larch	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
9 Scots pine	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
10 Sitka spruce	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
11 West. spruce	0	-	0	-	13	-0,09	0	-	0	-
12 W. white pine	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
13 W. red cedar	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
14 White fir	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-

^I Anzahl der Träger mit bekannten Eigenschaften

Somit ist zu erwarten, daß die Zuverlässigkeit, mit der unter Angabe von bestimmten Holzeigenschaften auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern geschlossen werden kann, bei einer kombinierten maschinell/visuellen Holzsortierung am größten ist.

Für die Holzart Fichte/Tanne sind die in *Tabelle 2.2a* angegebenen Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit der Brettschichtholzträger und dem größten KAR-Wert bzw. dem Elastizitätsmodul der Decklamelle in *Bild 2.3 bzw. 2.4* graphisch dargestellt.

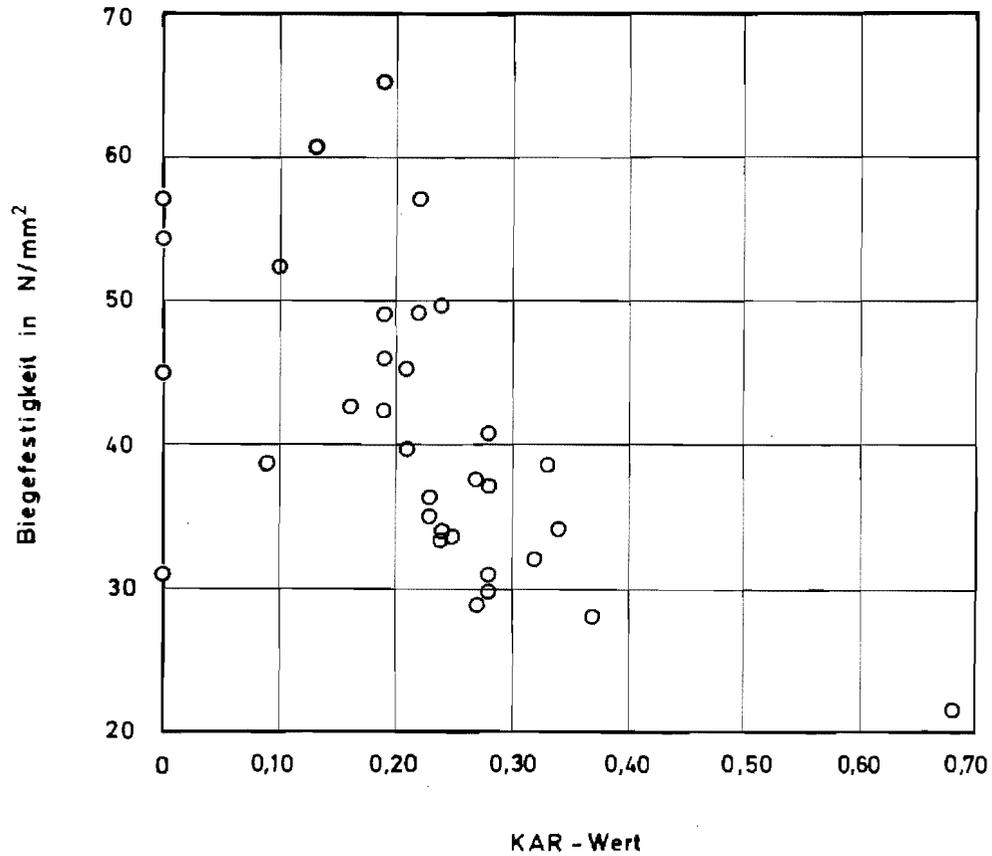


Bild 2.3: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert der Decklamelle; Fichte/Tanne

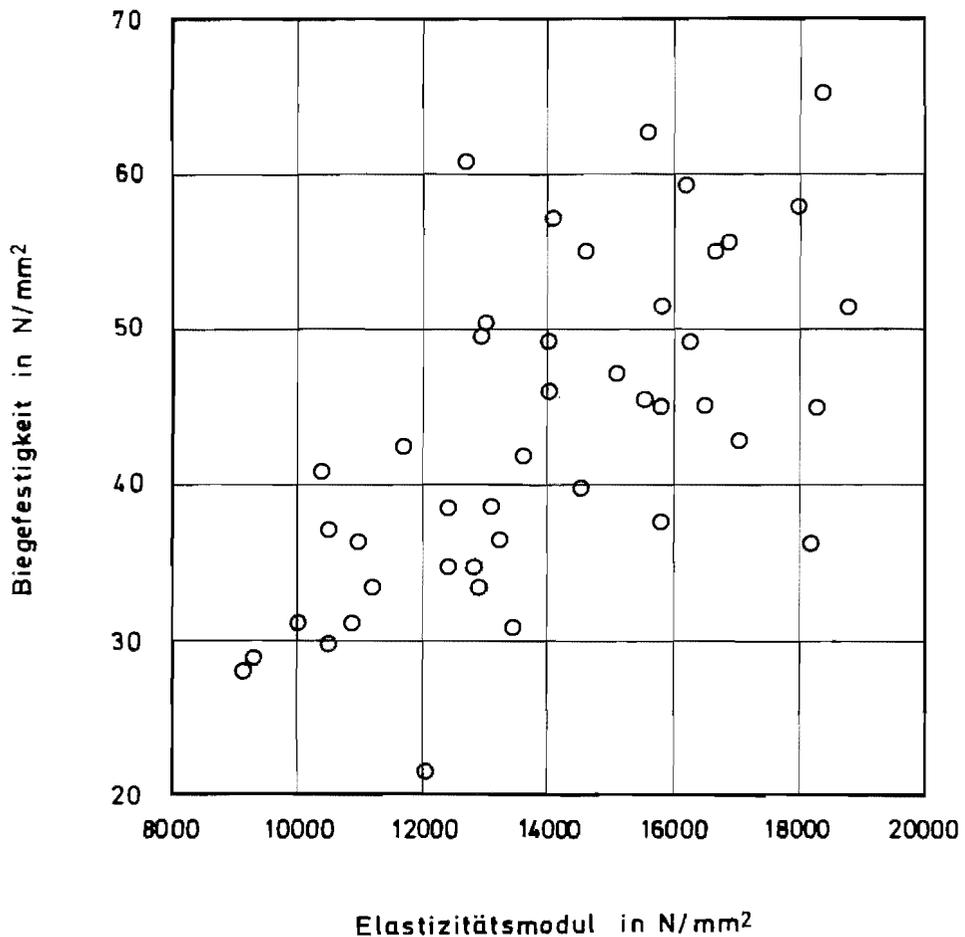


Bild 2.4: Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul der Decklamelle; Fichte/Tanne

Bei den Trägern mit Keilzinkenversagen wurde darauf geachtet, daß bei der Sammlung der Versuchsdaten die kleinere Rohdichte bzw. der kleinere Elastizitätsmodul der beiden keilgezinkten Bretter aufgenommen wurden. Grund hierfür waren die bei zahlreichen Versuchen mit Keilzinkenverbindungen gemachten Beobachtungen, die zeigten, daß das Versagen in vielen Fällen von dem Brett mit der geringeren Rohdichte ausging (siehe hierzu auch *Kapitel 3*).

Aus Tabelle 2.2b ist jedoch nur schwer eine Abhängigkeit zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Keilzinkenversagen und den Holzeigenschaften der Decklamellen erkennbar.

Tabelle 2.2b: Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und den Eigenschaften der Decklamelle; Träger mit Keilzinkenversagen

Holzart	Eigenschaften der Decklamelle			
	N ¹	Rohdichte min ρ ²	N ¹	Elastizitätsmodul min E ³
1 Southern pine	75	-0,14	73	-0,07
2 Douglas fir	54	-0,24	62	0,07
3 Eastern spruce	0	-	35	0,30
4 Eastern hemlock	0	-	4	0,17
5 Hem fir	9	0,34	20	0,48
6 Western woods	4	-0,04	4	0,93
7 Fichte/Tanne	63	0,28	85	0,28
8 Larch	0	-	0	-
9 Scots pine	0	-	0	-
10 Sitka spruce	0	-	0	-
11 Western spruce	0	-	10	0,15
12 Western white pine	0	-	0	-
13 Western red cedar	0	-	0	-
14 White fir	0	-	0	-

- ¹ Anzahl der Träger mit bekannten Eigenschaften
² kleinere Rohdichte der beiden miteinander verbundenen Bretter
³ kleinerer Elastizitätsmodul der beiden miteinander verbundenen Bretter

Grund für diese geringe Abhängigkeit ist, daß die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung nur zu einem gewissen Teil von den Holzeigenschaften bestimmt wird, und daß eine Vielzahl von produktionsabhängigen Faktoren, die rechnerisch kaum zu erfassen sind, eine wichtige Rolle spielen.

Ein vorzeitiges Keilzinkenversagen verschlechtert somit auch die Abhängigkeit, die zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und den Holzeigenschaften der Decklamellen besteht, so daß die Vorhersage der Tragfähigkeit dieser Träger unter alleiniger Vorgabe (Kenntnis) der Holzeigenschaften unzuverlässiger wird.

Aus den bisherigen Untersuchungen sind somit folgende Tendenzen erkennbar:

- die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern wird maßgeblich von den Holzeigenschaften einer einzigen Lamelle - der äußeren Zuglamelle - bestimmt;
- mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung ist es möglich, hochwertige Bretter für diese Decklamellen zu erkennen;
- hohe Tragfähigkeiten von Brettschichtholzträgern sind nur mit Keilzinkenverbindungen hoher Festigkeit zu erreichen;
- der Erfolg bzw. Nutzen einer Holzsortierung hängt von der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen ab.

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.

2.5 Einfluß der 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

$$\beta_B = \beta_B^0 \cdot K \quad (2.3)$$

beschrieben werden.

Hierbei sind

- β_B = Biegefestigkeit eines beliebigen Trägers,
- β_B^0 = Biegefestigkeit eines Bezugsträgers,
- K = Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Trägergröße.

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

Im Jahre 1924 untersuchten NEWLIN/TRAYER [74] das Tragverhalten von fehlerfreien Vollholzbalken mit bis zu 300 mm Höhe. Anhand dieser Versuche ermittelten sie folgende Gleichung für den o.a. Korrekturfaktor K :

$$K = 1,07 - 0,7 \cdot \sqrt{H/50} \quad (2.4)$$

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

$$K = 1,111 \cdot \frac{1 + 0,016 \cdot H}{1 + 0,020 \cdot H} \quad (2.5)$$

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

$$K = 1,217 \cdot \frac{1 + 0,003 \cdot H}{1 + 0,008 \cdot H} \quad (2.6)$$

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 [41] veröffentlicht wurde:

$$K = 0,625 \cdot \frac{H^2 + 92300}{H^2 + 56800} \quad (2.7)$$

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 [13] eine solche Theorie vor. Auf der Grundlage einer statistischen Sprödbrechtheorie von WEIBULL [89] entwickelte Bohannan ein Konzept, das die Beschreibung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Trägergröße ermöglicht. Diese Sprödbrechtheorie 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:

$$K = \left(\frac{H}{50} \right)^{-1/9} \quad (2.8)$$

Als Bezugsträger diene wiederum ein Träger der Höhe $H_0 = 50$ mm. Diese Gleichung löste die Beziehung von *Freas/Selbo* (Gl. (2.7)) in der amerikanischen Norm ab und darf auch bei Brettschichtholzträgern angewandt werden.

Mit Ausnahme von Gl.(2.6) 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 [6]).

1983 veröffentlichten FEWELL/CURRY [36] 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:

$$K = \left(\frac{H}{200}\right)^{-0,4} \quad , \quad (2.9)$$

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

Diese Beziehung stimmte gut mit den ebenfalls in [36] angegebenen Ergebnissen von umfangreichen kanadischen Untersuchungen überein.

In Bild 2.5 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 2.5* ist ersichtlich, daß die einzelnen Gleichungen den Höheneffekt z.T. sehr unterschiedlich bewerten, und daß eine Extrapolation dieser Kurven über den eigentlichen Gültigkeitsbereich hinaus diese Unterschiede noch verstärkt.

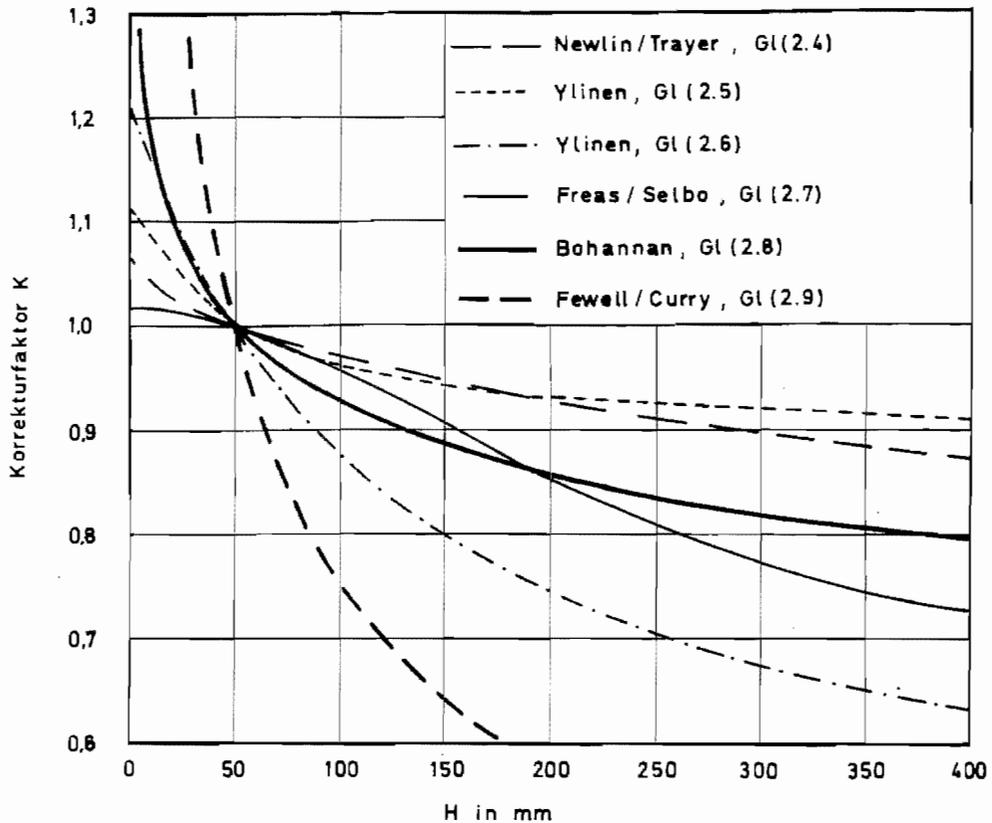


Bild 2.5: Korrekturfaktor K zur Berücksichtigung des Höheneffektes

Weiterhin geht aus *Bild 2.5* hervor, daß die an fehlerbehafteten Proben ermittelten Abhängigkeiten - *Gl(2.6)* und *Gl(2.9)* - eine stärkere Abnahme der Biegefestigkeit mit wachsender Trägerhöhe beschreiben als die an fehlerfreien Proben ermittelten Beziehungen.

Alle bisher besprochenen Gleichungen für den Korrekturfaktor K stellen 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 Sprödbbruchtheorie ermöglicht es, diesen Volumeneinfluß rechnerisch zu erfassen. Die Aufteilung des gesamten Volumeneffektes nach Trägergröße, Spannungsverteilung über den Querschnitt und Belastungsart wurde von COLLING [19] in allgemeiner Form dargestellt.

MADSEN/BUCHANAN [64] 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 $GI(2.8)$ 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. [14]). Daraufhin wurde Bohannans Gleichung auch in die amerikanische Bemessungsnorm für Brettschichtholz aufgenommen.

Im Jahre 1972 führte APLIN [10] Versuche mit Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Größe durch. Wie in *Abschnitt 2.3* 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 [57] 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.

Ziel eines von EHLBECK/COLLING [32] durchgeführten Forschungsvorhabens war u.a. die Untersuchung des Einflusses der Trägergröße auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern.

Zu diesem Zweck wurden zwei Versuchsserien durchgeführt:

- bei der ersten Versuchsserie wurde bei konstantem Abstand der beiden Einzellasten (2000 mm) die Trägerhöhe variiert (zwischen 167 und 1250 mm). Diese Versuchsserie diente zur Untersuchung des Höheneffektes;
- bei der zweiten Versuchsserie wurde bei konstanter Trägerhöhe (330 mm) der Abstand der beiden Einzellasten variiert (zwischen 0 und 3500 mm). Diese Versuchsserie diente zur Untersuchung des Längeneffektes.

Bei diesen Versuchsträgern wurde darauf geachtet, daß in den beiden äußeren Zuglamellen keine Keilzinkenverbindungen im Bereich der maximalen Momentenbeanspruchung vorhanden waren. Lediglich bei zwei vergleichenden Versuchsreihen wurden planmäßig Keilzinkenverbindungen in den Bereich zwischen den Einzellasten angeordnet.

Bei den Trägern mit Holzversagen nahm die rechnerische Biegefestigkeit mit wachsender Trägerhöhe ab. Ab einer Höhe von 500 mm jedoch war kein weiterer nennenswerter Festigkeitsabfall mehr zu erkennen (vgl. Versuche von *Kolb/Frech*).

Bei den Trägern mit Keilzinkenversagen konnte keine Abhängigkeit von der Trägerhöhe festgestellt werden. Hier lagen die Tragfähigkeiten der 330 mm hohen Träger in der gleichen Größenordnung wie bei den 1000 mm hohen Trägern. Diese Versuche deuten somit darauf hin, daß ein beim Holz vorhandener Höheneinfluß durch das Auftreten der "Fehlstelle" Keilzinkenverbindung verwischt werden kann.

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsserie zeigten einen deutlichen Abfall der Biegefestigkeit mit zunehmendem Lastabstand. Bei einem Abstand der Einzellasten von 3500 mm (=Länge der Einzelbretter) häufte sich jedoch das Auftreten eines Keilzinkenversagens als Bruchursache, auch wenn diese Keilzinkenverbindungen außerhalb des hochbeanspruchten Bereiches lagen.

Diese Versuche wiesen erneut auf das bereits häufiger erwähnte hohe Bruchrisiko einer Keilzinkenverbindung hin. Bei großen Brettschicht-holzträgern mit mehreren Keilzinkenverbindungen in den hochbeanspruchten Zonen ist die Wahrscheinlichkeit eines Keilzinkenversagens größer als bei kleinen Trägern, so daß das Problem der Trägergröße bei Brettschicht-holzträgern auch eine Frage der Auftretenshäufigkeit von Keilzinkenverbindungen ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nun untersucht, ob anhand der bisher vorliegenden Versuchswerte ein Einfluß der Trägergröße auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern bestätigt werden kann.

In Tabelle 2.3a sind die Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Holzversagen und den Trägerabmessungen angegeben.

Tabelle 2.3a: Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und den Trägerabmessungen; Träger mit Holzversagen

Holzart	Breite	Höhe	Länge	Volumen
	B	H	L	V = BHL
1 Southern pine	0,04	-0,29	-0,29	-0,24
2 Douglas fir	-0,36	-0,31	-0,34	-0,24
3 Eastern spruce	0,48	-0,03	- 1	0,03
4 Eastern hemlock	- 1	-0,41	- 1	-0,41
5 Hem fir	0,31	0,31	0,31	0,31
6 Western woods	- 1	- 1	- 1	- 1
7 Fichte/Tanne	-0,19	-0,49	-0,31	-0,40
8 Larch	0,02	0,04	0,02	0,03
9 Scots pine	- 1	- 1	- 1	- 1
10 Sitka spruce	- 1	- 1	- 1	- 1
11 Western spruce	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25
12 Western white pine	- 1	-0,69	- 1	-0,69
13 Western red cedar	- 1	0,04	- 1	0,04
14 White fir	- 1	-0,93	- 1	-0,93

¹ Berechnung eines Korrelationskoeffizienten nicht möglich, weil die Versuchsträger alle die gleichen Abmessungen besaßen

Diese Werte schwanken z.T. sehr stark und zeigen sogar gegenläufige Tendenzen, so daß es schwer fällt, diese Ergebnisse zu bewerten.

Insgesamt gesehen jedoch ist eine Abhängigkeit zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und den Trägerabmessungen zu erkennen. Diese Beziehung ist jedoch nicht so eng, wie dies z.B. bei kleinen fehlerfreien Vollholzproben der Fall ist.

Für die Träger mit Keilzinkenversagen (s. Tabelle 2.3b) ist das Bild noch verwirrender: hier ist überhaupt keine klare Tendenz zu erkennen.

Tabelle 2.3b: Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern und den Trägerabmessungen; Träger mit Keilzinkenversagen

Holzart	Breite	Höhe	Länge	Volumen
	B	H	L	V = BHL
1 Southern pine	-0,43	-0,16	-0,17	-0,25
2 Douglas fir	-0,18	-0,47	-0,43	-0,31
3 Eastern spruce	0,44	- 1	0,07	0,08
4 Eastern hemlock	- 1	-0,67	- 1	-0,67
5 Hem fir	0,67	0,67	0,67	0,67
6 Western woods	- 1	- 1	- 1	- 1
7 Fichte/Tanne	0,13	0,32	0,34	0,37
8 Larch	- 1	- 1	- 1	- 1
9 Scots pine	- 1	- 1	- 1	- 1
10 Sitka spruce	- 1	- 1	- 1	- 1
11 Western spruce	0,10	0,10	0,10	0,10
12 Western white pine	- 1	- 1	- 1	- 1
13 Western red cedar	- 1	- 1	- 1	- 1
14 White fir	- 1	- 1	- 1	- 1

¹ Berechnung eines Korrelationskoeffizienten nicht möglich, weil die Versuchsträger alle die gleichen Abmessungen besaßen oder keine Versuchswerte vorlagen

Die in *Tabelle 2.3a und 2.3b* angegebenen Zahlenwerte sind jedoch nicht überzubewerten, weil die Streubreite der Trägerabmessungen bei der überwiegenden Zahl der Träger gering⁴ war. Die wenigen Großversuche werden daher überbewertet und können so zu falschen Ergebnissen führen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß es mit Hilfe bisheriger 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 somit unbedingt erforderlich, die Randbedingungen - Güte der Lamellen, Trägersaufbau, 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 in *Kapitel 5* beschriebenen Rechenmodells untersucht, mit dem es möglich ist, die o.a. Forderungen zu erfüllen. Diese Untersuchungen sind in den *Abschnitten 7.1.3 und 7.2.3* beschrieben.

2.6 Mögliche Verstärkungsmaßnahmen

Das Bestreben, Brettschichtholzträger mit möglichst hoher Tragfähigkeit herzustellen, führte nicht nur zu einem schrittweisen Erkennen aller festigkeitsrelevanter Einflußfaktoren, sondern es führte auch zu Überlegungen, wie man die Biegefestigkeit "künstlich" steigern kann. Gesucht wurde also nach Verstärkungsmöglichkeiten, die eine höhere Tragfähigkeit gewährleisten sollten, als dies mit einer "normalen" Holzsortierung möglich ist.

So führte z.B. BOHANNAN [12] Versuche mit vorgespannten Brettschichtholzträgern durch. Die Spannglieder wurden hierbei lose in Aussparungen gelegt, die vor dem Verleimen der Lamellen in die

⁴ Etwa 80% aller Träger hatte kleinere Abmessungen als $B/H/L = 130/400/5500$ mm.

Bretter gefräst wurden, so daß kein Verbund zwischen Spannstaahl und Holz vorhanden war. Die Vorspannung wurde an den Hirnholzenden der Träger über hydraulische Pressen aufgebracht.

Diese Versuche ergaben deutlich höhere Biegefestigkeiten als bei nicht vorgespannten Vergleichsträgern bei gleichzeitig geringeren Streuungen. Bohannan selbst schränkte die Gültigkeit und die Nutzbarkeit dieser Ergebnisse jedoch ein, indem er darauf verwies, daß bei seinen Versuchen lediglich das Kurzzeitverhalten untersucht wurde (die Träger wurden unmittelbar nach Aufbringung der Vorspannung geprüft). Gerade das Langzeitverhalten des Holzes aber ist der Grund dafür, warum das Vorspannen des Holzes bisher noch nicht zum Erfolg geführt hat. Das starke Kriechen des Holzes, d.h. das Bestreben, sich der Belastung zu entziehen, das bei der Herstellung von gekrümmten Brettschichtholzträgern genutzt wird, bewirkt einen allmählichen Abbau der Vorspannung, so daß ein ständiges Nachspannen erforderlich wäre. Die hohen Herstellungs- und Unterhaltungskosten machen somit den Vorteil von höheren Tragfähigkeiten wieder zunichte.

EHLBECK/COLLING [33] untersuchten die Tragfähigkeit von mit Glasfaser - Verbund - Profilen verstärkten Brettschichtholzträgern. Der Kern diese Glasfaser - Verbund - Profiles (GVP) bestand aus nebeneinanderliegenden, kreisrunden Vollstäben, die aus unidirektional geordneten, in Polyester dicht gepackten Glasfasern zusammengesetzt waren. Die Packungsdichte der endlosen Glasfasern betrug mehr als 65 Vol.-%. Die Rundstäbe wurden ebenfalls unter Verwendung von Polyester mit Deckschichten aus Kiefer - Messerfurnieren zu einem Sandwichelement verbunden. Hierdurch wurde die Verleimung mit den für die Brettschichtholzherstellung zugelassenen Holzleimen ermöglicht. Bei einem mittleren Durchmesser der Glasfaserstäbe von 2,8 mm und einer Furnierdicke von im Mittel 0,7 mm ergab sich eine mittlere Dicke der GVP-Lamelle von etwa 4,2 mm.

Bei den 600 mm hohen Brettschichtholzträgern wurde eine GVP-Lamelle als Decklamelle im Zugbereich angeordnet. Diese Untersuchungen waren darauf ausgerichtet, die Verstärkung im Bereich von Keilzinkenverbindungen zu untersuchen, so daß im hochbeanspruchten Bereich der Träger planmäßig Keilzinkenverbindungen vorhanden waren.

Aus den Versuchen ergaben sich deutliche Tragfähigkeitssteigerungen, allerdings nur für die Träger mit Holzversagen, während die Träger, die

aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gingen, nicht mehr trugen, als dies nach der Theorie der Verbundquerschnitte zu erwarten war. Dies kann mit dem unterschiedlichen Tragverhalten der "weichen" Brettabschnitte mit Ästen bzw. der "steifen" Keilzinkenverbindungen im Brettschichtholzträger erklärt werden (Laminierungseffekt). Dieses Tragverhalten ist in *Kapitel 4* näher erläutert.

In Anbetracht des verhältnismäßig niedrigen Elastizitätsmoduls der GVP-Lamellen ($\approx 30000 \text{ N/mm}^2$) und deren geringen Dicke waren die zu erwartenden Tragfähigkeitssteigerungen im Bereich der Keilzinkenverbindungen nicht sehr hoch, so daß diese Verstärkungsmöglichkeit nicht weiter verfolgt wurde.

Eine andere Verstärkungsmöglichkeit wurde von BRAUN/MOODY [17] und RADOVIC [79] untersucht: die Anordnung einer oder mehrerer Decklamellen aus Furnierschichtholz. Furnierschichtholz besteht aus mehreren Furnierlagen, die faserparallel miteinander verleimt werden. Im Gegensatz zu den Bau-Furnier-Sperrholzplatten, bei denen durch die kreuzweise Verleimung der Furniere ein Sperreffekt erzielt wird, soll hier durch die parallele Anordnung der Lagen eine vergütete Lamelle mit ausgeprägter Lastabtragungsrichtung hergestellt werden.

Neben einer weiteren Vergütung des Werkstoffes Holz (Brettschichtholz in Miniatur) liegt der große Vorteil des Furnierschichtholzes darin, daß durchgehende Lamellen in großer Länge herstellbar sind. Das Auftreten von Keilzinkenverbindungen kann bei großen Brettschichtholzträgern zwar nicht ganz ausgeschlossen werden, die Anordnung dieser Keilzinkenverbindungen könnte jedoch vor der Herstellung so geplant werden, daß sie nicht in den Bereichen der größten Momentenbeanspruchung auftreten.

Bei den bisher durchgeführten Untersuchungen wurden Schichtholzlamellen verwendet, deren Dicken denen der übrigen "normalen" Brettlamellen entsprach. Bei den Versuchen von *Braun/Moody* mit kleinen Brettschichtholzträgern und einer Decklamelle aus Furnierschichtholz ergaben sich im Vergleich zu normalen Trägern zwar keine höheren Tragfähigkeiten, die deutlich geringere Streuung der Versuchswerte deutete jedoch darauf hin, daß die Vorteile dieser Schichtholzlamellen bei der Festlegung von charakteristischen Bemessungswerten zum Tragen kommen.

Bei diesen Versuchen wurden zwei unterschiedliche Güten von Schichtholzlamellen verwendet, und es zeigte sich, daß auch hier die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern von der Qualität dieser Decklamellen abhängig ist.

Radovic stellte bei seinen Versuchen mit größeren Brettschichtholzträgern fest, daß ein Verstärkungseffekt erst bei Anordnung von mindestens zwei Decklamellen aus Schichtholz erkennbar wird was darauf hindeutet, daß bei größeren Trägern die Tragfähigkeit nicht mehr ausschließlich von der äußeren Zuglamelle bestimmt wird. Dies kann damit erklärt werden, daß bei hohen Trägern ein größerer Bereich der Trägerhöhe einer hohen Beanspruchung ausgesetzt ist als dies bei kleinen Trägern der Fall ist.

Die Verstärkung von Brettschichtholzträgern mit Hilfe von Furnierschichtholzlamellen hat sich bisher noch nicht durchsetzen können, was aber zum großen Teil darauf zurückzuführen ist, daß noch nicht genügend Versuchswerte vorliegen, die eine zuverlässige Bewertung dieser Bauweise ermöglichen könnten.

Ein weiterer Grund hierfür ist aber, daß Verstärkungsmaßnahmen mit Hilfe von "fremden" Materialien von den Leimbaubetrieben ohnehin nur sehr zögernd akzeptiert werden. Die Anschaffung solcher Sonderlamellen, die zusätzlichen Lagerhaltungskosten und die Eingriffe in den Produktionsablauf wiegen den Vorteil von höheren zulässigen Spannungen oft nicht auf. Diese ablehnende Haltung kommt im folgenden Ausspruch eines führenden deutschen Holzleimbauers deutlich zum Ausdruck: *"da leg ich doch noch eine oder zwei normale Lamellen drauf, dann bin ich genauso weit und es kommt mich billiger."*

Eine andere Verstärkungsmaßnahme, die von den Leimbaubetrieben eher akzeptiert werden dürfte, ist die Anordnung von sogenannten "Stäbchenlamellen" in der Zugzone. Diese Stäbchenlamellen können im Leimbaubetrieb hergestellt werden und stellen somit kein "fremdes" Material dar.

Das Herstellungsprinzip einer Stäbchenlamelle ist in Bild 2.6 dargestellt: werden Stäbchenlamellen für einen Brettschichtholzträger der Breite B benötigt, so wird vorher ein Brettschichtholzträger der Höhe B hergestellt. Von diesem Träger werden dann die Stäbchenlamellen mit der gewünschten Dicke herausgeschnitten.

Mit einer solchen Stäbchenlamelle wollte man den Einfluß einzelner Schwachstellen weiter reduzieren. So ist der von einem Ast in einem Querschnitt einer Stäbchenlamelle eingenommene Anteil gering und auch eine Keilzinkenverbindung tritt nicht mehr über die gesamte Lamellenbreite auf.

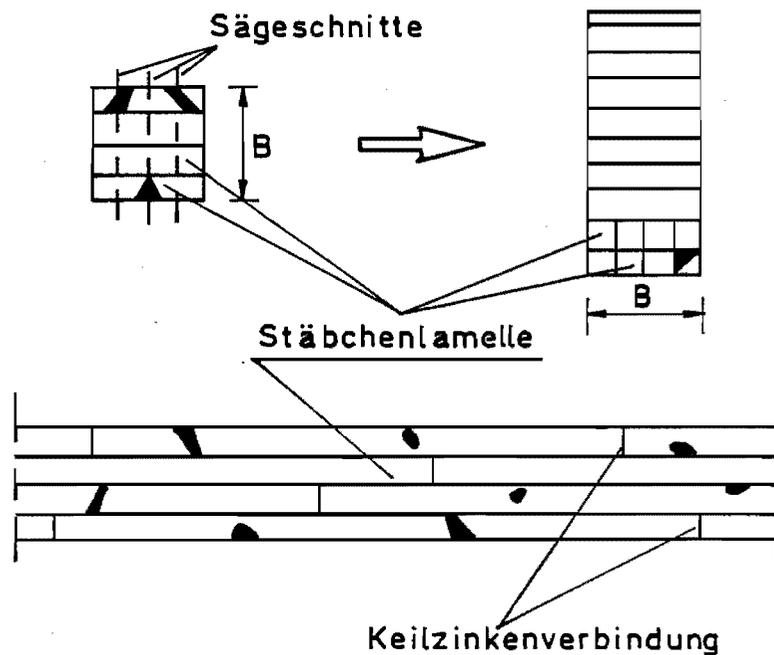


Bild 2.6: Herstellungsprinzip einer Stäbchenlamelle

Diese Möglichkeit der Verstärkung von Brettschichtholzträgern wurde in Schweden systematisch untersucht (vgl. CARDESJOE/DAHLBERG [18] und JOHANSSON [48], [49], [50], [51], [54]). Hierbei wurde die Güte der Stäbchenlamellen variiert.

Im Falle von Stäbchenlamellen, die aus Brettern durchschnittlicher Qualität hergestellt wurden, konnten höhere Tragfähigkeiten erzielt werden als bei Vergleichsträgern ohne Sonderlamelle. Mit steigender Güte der Bretter jedoch, aus denen diese Stäbchenlamellen hergestellt wurden, nahm der Verstärkungseffekt im Vergleich zu unverstärkten Trägern vergleichbarer Güte immer mehr ab.

Hieraus ist zu erkennen, daß die Vergütung des Holzes, die aufgrund der Herstellungsweise dieser Stäbchenlamellen erzielt wird, nur im Bereich von Ästen wirksam ist: bei guten Lamellen mit wenig Ästen gibt es nicht mehr viel zu vergüten, so daß hier auch kaum ein Verstärkungseffekt auftreten kann.

Dies deutet darauf hin, daß mit Hilfe einer Stäbchenlamelle keine höheren Tragfähigkeiten erzielt werden können, als dies mit hochwertigen "normalen" Decklamellen möglich ist.

Auch das Problem der Keilzinkenverbindungen ist mit einer Stäbchenlamelle noch nicht gelöst, denn die Versuche zeigten, daß der Bruch in einer solchen Stäbchenlamelle von einer Teilkeilzinkung ausgeht und sich über die Breite der Lamelle zickzackartig von Keilzinkenverbindung zu Keilzinkenverbindung fortpflanzt. Im Vergleich zu einer normalen Lamelle sind somit in einer Stäbchenlamelle sogar mehr potentielle Keilzinkenverbindungen vorhanden, von denen das Versagen ausgehen kann.

Die bisher untersuchten Verstärkungsmöglichkeiten haben sich somit nicht bewährt bzw. noch nicht durchgesetzt, und es hat sich bereits wiederholt gezeigt, daß auch mit Hilfe von "normalen" hochwertigen Decklamellen hohe Tragfähigkeiten erzielt werden können. Voraussetzung hierfür sind jedoch sowohl eine einwandfreie Keilzinkenproduktion als auch eine verfeinerte Holzsortierung, die es ermöglicht, die hochwertigen Bretter zu erkennen und auszuwählen. In diesen Bereichen wäre ein Mehraufwand, den man sonst für künstliche Verstärkungsmaßnahmen aufbringen müßte, sicherlich sinnvoller eingesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb nicht weiter auf mögliche Verstärkungsmaßnahmen eingegangen, sondern es wird gezeigt, welche Tragfähigkeiten von "normalen" Brettschichtholzträgern möglich sind, wenn bestimmte Randbedingungen bzgl. der Qualität der Decklamellen und der Keilzinkenfestigkeiten eingehalten werden.

3 Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen

3.1 Derzeitiger Kenntnisstand

Der Einsatz von Keilzinkenverbindungen als Längsverbinding im Holzleimbau stellt eine vergleichsweise junge Entwicklung dar, die sich erst zu Beginn der 60-er Jahre hat durchsetzen können. In früheren Jahren wurden die Längsstöße von Einzelbrettern mittels Schäftung (vgl. *Bild 3.1*) ausgeführt.

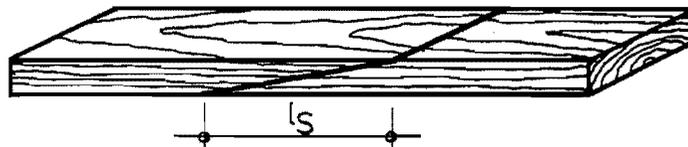
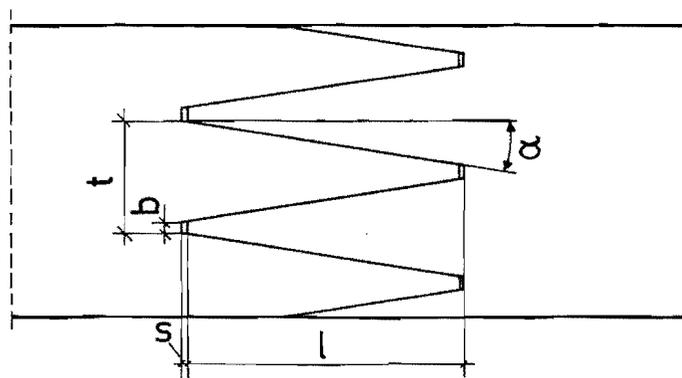


Bild 3.1 : Schäftung

Das Arbeiten mit dieser Stoßausbildung war jedoch u.a. mit folgenden Problemen verbunden:

- mit wachsenden Abmessungen (Breite und Dicke) der Bretter nahm die Paßgenauigkeit der Schäftung ab, weil es immer schwieriger war, mit der Bandsäge einen geraden Schnitt zu führen;
- die Herstellung eines Brettschichtholzträgers war recht aufwendig, weil die Bretter einzeln aneinandergereiht werden mußten, wobei sorgfältig darauf zu achten war, daß sie nicht verrutschten, damit der erforderliche Preßdruck aufgebracht werden konnte;
- weiterhin ging bei der Herstellung einer Schäftung von jedem Brett ein Stück der Länge l_S verloren. Bei einem Neigungswinkel der Schäftung von 1:10 beträgt dieser Holzverlust bei einem Brett mit einer Dicke von 40 mm und einer Länge von 4 m immerhin 10%!
- die Forderung, daß im Bereich der Stoßausbildung keine Äste auftreten dürfen, vergrößerte diesen Holzverlust noch, weil die Schäftung somit nur an einer Stelle ausgeführt werden durfte, an der über einen größeren Bereich keine Äste auftraten.

Aufgrund dieser Nachteile war man bestrebt, nach einer "besseren" Stoßausbildung zu suchen. Als Alternative bot sich die Keilzinkenverbindung als "gefaltete Schäftung" an, die alle Anforderungen bzgl. Paßgenauigkeit, einfacher Handhabung bei der Herstellung von Brettschichtholzträgern und geringem Holzverlust erfüllte. In *Bild 3.2* ist eine Keilzinkenverbindung dargestellt, die Bezeichnungen wurden hierbei aus DIN 68140 [5] übernommen.



- l = Zinkenlänge
- t = Zinkenteilung
- b = Breite des Zinkengrundes
- s = Zinkenspiel
- α = Flankenwinkel

Bild 3.2: Keilzinkenverbindung

Es gab aber zwei Gründe, die verhinderten, daß sich die Keilzinkenverbindung auf Anrieb durchsetzen konnte:

- zum einen stellte man wiederholt fest, daß die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen geringer ist als die von Schäftungen (siehe z.B. MADSEN/LITTLEFORD [63]). Versuche von EBY [25] zeigten jedoch, daß diese Feststellung nur für kleine Schäftungen und Keilzinkenverbindungen zutrifft, die in den Versuchslabors hergestellt wurden. Seine Untersuchungen zeigten, daß bei den Proben, die aus der laufenden Produktion entnommen wurden, die Festigkeitsunterschiede bei weitem nicht so groß waren, wie dies bei den Laborprüfkörpern der Fall war. Auch wird die höhere mittlere Festigkeit der Schäftungen durch die größeren Streuungen wieder zunichte gemacht. Bezüglich der Tragfähigkeit stand somit einer Anwendung der Keilzinkenverbindung als tragende Längsverbindung im Holzleimbau nichts mehr im Wege;

- der andere Grund war der, daß die Herstellung einer Keilzinkenverbindung ebenfalls nicht ganz einfach war: die Zinken wurden mittels einer Schablone mit der Bandsäge in die Brettenden geschnitten. Bald übernahmen jedoch Fräsen die Arbeit der Bandsägen, so daß eine schnellere Produktion und eine höhere Paßgenauigkeit möglich waren.

Somit war der Weg frei für die Keilzinkenverbindung, und heute gibt es meines Wissens keinen Leimbaubetrieb mehr, der die Schäftung als Stoßverbindung einsetzt.

Die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den beeinflussenden Faktoren wurde erst mit Beginn der 60-er Jahre systematisch untersucht. Hierbei beschränkte man sich zunächst auf den Einfluß der Keilzinkengeometrie.

1963 stellte SELBO [82] bei seinen Untersuchungen folgende Abhängigkeiten fest:

- mit flacher werdendem Flankenwinkel α nahm die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen zu. Ab einer Neigung von 1:12 war jedoch keine weitere Festigkeitszunahme mehr zu beobachten;
- wurden der Flankenwinkel α und die Zinkengrundbreite b konstant gehalten, so nahm die Zugfestigkeit mit wachsender Zinkenlänge l zu;
- die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung wuchs mit steigendem Verhältnis $2l/t$. Dieser Verhältniswert ist ein Maß für die Leimfläche, die pro Breitereinheit zur Kraftübertragung zur Verfügung steht. Bei der Holzart Sitka Spruce zeigten diese Versuche jedoch, daß ab einem Verhältnis von $2l/t \approx 8$ keine weitere Tragfähigkeitssteigerung mehr zu erwarten ist;
- die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung nahm mit abnehmender Zinkengrundbreite b zu.

Bei diesen Untersuchungen wurden die Keilzinkenverbindungen alle mit der Bandsäge im Labor hergestellt, so daß die Frage gerechtfertigt erscheint, ob die Versuchsergebnisse uneingeschränkt auf die heute üblichen gefrästen Keilzinkenverbindungen übertragbar sind.

1980 stellte STRICKLER [88] bei seinen Untersuchungen mit gefrästen Keilzinkenverbindungen folgende Tendenzen fest:

- weder die Zinkenbreite t noch die Zinkenlänge l üben einen Einfluß auf die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen aus;
- ab einer Flankenneigung von 1:8 ist keine merkliche Festigkeitssteigerung mehr zu erwarten;
- die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen wird maßgeblich von der Breite b des Zinkengrundes bestimmt.

Weiterhin wies *Strickler* auf die produktionsabhängigen Faktoren hin, deren Einfluß bei den bisherigen Untersuchungen nicht berücksichtigt wurde. So hält er z.B. ein regelmäßiges Schärfen der Fräsen für unbedingt erforderlich, um eine hohe Keilzinkenqualität gewährleisten zu können.

1986 untersuchten RADOVIC/ROHLFING [78] das Tragverhalten von vier verschiedenen Keilzinkenprofilen. Die Prüfkörper aus Furnierschichtholz wurden mit Hilfe von frisch geschärften Fräsen hergestellt. Die Versuche ergaben, daß die mittleren Zugfestigkeiten von drei Keilzinkenprofilen nahezu identisch waren. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich weder die Zinkenbreite b noch das Verhältnis $2l/t$ stark voneinander unterschieden ($b = 0,42-0,6$ mm und $2l/t = 7,7-9,4$). Das vierte Profil hingegen hatte sowohl die größte Zinkengrundbreite b ($=1$ mm) als auch den kleinsten Verhältniswert $2l/t$ ($=6,3$), worauf die geringere Tragfähigkeit zurückgeführt wurde.

Alle o.a. Untersuchungen deuten somit auf den dominanten Einfluß der Zinkengrundbreite b hin, der damit zu erklären ist, daß durch das Zinkenspiel s keine Verbindung zwischen der Zinkenspitze der einen Stoßhälfte und dem Zinkengrund der anderen Stoßhälfte besteht, und somit keine Kräfte übertragen werden können. Die Kräfte müssen im Bereich des Zinkengrundes umgelenkt werden, so daß hier Zusatzspannungen auftreten, die umso größer sind, je größer die Zinkengrundbreite ist.

Am Beispiel des Keilzinkenprofils I-20 nach DIN 68140 wurden im Rahmen dieser Arbeit Finite Elemente Berechnungen durchgeführt. Hierbei zeigte sich, daß im Bereich des Zinkengrundes Spannungsspitzen auftreten können, die bis zu 80% höher sind als die Spannungen, die im nicht keilgezinkten Bereich vorhanden sind. Daher ist es nicht verwunderlich, daß die meisten Verbesserungsvorschläge für Keilzinkenprofile im wesentlichen darauf hinzielten, diese

Spannungsspitzen im Zinkengrund zu reduzieren (vgl. z.B. AICHER/LÖBER [9], RICHARDS [80], STRICKLER [88]).

Die Keilzinkengeometrie hat jedoch in den letzten Jahren an Bedeutung verloren, weil sich nur eine begrenzte Zahl von Keilzinkenprofilen durchgesetzt hat. So ist das Profil $l/t = 20/6,2$ mm in Europa stark verbreitet, während sich in den letzten Jahren das Profil $15/3,8$ mm verhältnismäßig stark durchgesetzt hat. In Skandinavien hingegen, insbesondere in Schweden, ist das Profil $30/6,2$ mm häufig anzutreffen. Die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen mit diesen Profilen liegen alle in der gleichen Größenordnung, und etwaige Festigkeitsunterschiede sind nicht immer auf die unterschiedliche Keilzinkengeometrie zurückzuführen.

Bei einigen der o.a. Untersuchungen stellte man fest, daß die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen nicht allein von der Geometrie des Keilzinkenprofils bestimmt wird, sondern daß auch die Holzeigenschaften der miteinander verbundenen Bretter von großer Bedeutung sind. So stellten bereits 1962 EGNER/DORN [27] fest, daß mit höherer Rohdichte der Bretter auch die Festigkeit der Keilzinkenverbindungen zunimmt. Es können infolge von streuenden Holzeigenschaften also die Abhängigkeiten zwischen der Keilzinkenfestigkeit und der Keilzinkengeometrie verwischt werden. Aus diesem Grunde wurden die Untersuchungen von *Radovic/Rohlfing* mit Hilfe von Furnierschichtholzproben durchgeführt, deren Holzeigenschaften Rohdichte und Elastizitätsmodul deutlich geringeren Schwankungen unterworfen sind, als dies beim "normalen" Schnittholz der Fall ist.

Während in den ersten Jahren die Geometrie des Keilzinkenprofils von vorrangigem Interesse war, beschäftigten sich bald immer mehr Untersuchungen mit dem Einfluß der Holzeigenschaften auf das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen. So stellten EBY [25], EHLBECK et al. [29], JOHANSSON [52], [53], LARSEN [60], MADSEN/LITTLEFORD [63] und MOODY [70] übereinstimmend fest, daß die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen mit steigender Rohdichte und/oder steigendem Elastizitätsmodul der Bretter zunimmt. Dies kann damit erklärt werden, daß bei beiden auftretenden Versagensarten - Zugbruch im Zinkengrund und Scherbruch entlang der Flanken - der Bruch im Holz verläuft (eine ordnungsgemäße Verleimung vorausgesetzt), so daß mit steigender Holzqualität auch höhere Keilzinkenfestigkeiten verbunden sein müssen.

Die ermittelten Abhängigkeiten zwischen der Keilzinkenfestigkeit und den Holzeigenschaften waren jedoch nie sehr eng korreliert (Korrelationskoeffizienten unter 0,50), was darauf hindeutet, daß die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen auch von produktionsabhängigen Faktoren bestimmt wird, die jedoch zahlenmäßig nicht oder nur schwer zu erfassen sind. Einflußparameter, die die Festigkeit negativ beeinflussen können, sind z.B. ungleich geschärfte oder abgestumpfte Fräser, unzureichende Leimangabe, nicht ordnungsgemäßer Ansatz der Leimflotte, ungenügender Längspressdruck, zu hohe oder zu unterschiedliche Holzfeuchte der Stoßhälften, unsachgemäßes Abstapeln der frisch geleimten Zinkenstöße usw.. Diese "unberechenbaren" Produktionseinflüsse verhindern somit eine engere Beziehung zwischen der Keilzinkenfestigkeit und den Holzeigenschaften der keilgezinkten Bretter.

Weiterhin ist es von größter Bedeutung, daß im Stoßbereich keine fehler- oder schadhafte Stellen wie z.B. Äste oder Schrägfaserigkeit vorhanden sind, weil diese die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen deutlich herabsetzen (siehe PELLICANE et al. [77]).

Auch stellte MOODY [70] bei seinen Untersuchungen fest, daß die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen, die aus Brettern mit markhaltigem oder marknahem Holz zusammengesetzt sind, geringer ist als die von Keilzinkenverbindungen ohne Markanteil. Weiterhin zeigte sich, daß Keilzinkenverbindungen, bei denen nur eine Stoßhälfte markhaltiges Holz enthielt, keine höhere Tragfähigkeit besaßen als Keilzinkenverbindungen, bei denen beide Stoßhälften aus markhaltigen Brettern bestanden. Dies deutet darauf hin, daß die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen von den Eigenschaften der schwächeren Hälfte bestimmt wird.

Diese Tendenz wird von den Zugversuchen von EHLBECK et al. [29] bestätigt, bei denen das Versagen in den meisten Fällen in der Stoßhälfte mit der geringeren Rohdichte eintrat. Auch SAMSON [81], der die Tragfähigkeit von keilgezinkten Brettern mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul untersuchte, wies darauf hin, daß die Festigkeit der guten Bretter (mit hoher Steifigkeit) nicht ausgenutzt werden kann, wenn diese mit schlechteren Brettern (mit geringerer Steifigkeit) verbunden werden.

Die Tatsache, daß die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen von den Holzeigenschaften der Bretter bestimmt wird, deutet darauf hin, daß sich die Art der Holzsortierung auch auf das Tragverhalten der Keilzinkenverbindungen auswirkt. Letztlich ist es nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung möglich, die guten Bretter (mit hoher Rohdichte und/oder Elastizitätsmodul) zu erkennen und zu gewährleisten, daß Bretter mit vergleichbaren Holzeigenschaften miteinander verbunden werden. Eine rein visuelle Holzsortierung hingegen ermöglicht bzgl. der Keilzinkenfestigkeit keine effektive Holzausnutzung.

Samson stellte weiterhin fest, daß die Steifigkeit von keilgezinkten Lamellen durch das Auftreten von Keilzinkenverbindungen nicht beeinträchtigt wird. Diese Beobachtung wird von zahlreichen anderen Untersuchungen bestätigt, die ergaben, daß der Elastizitätsmodul einer Keilzinkenverbindung hoch ist und mit dem des fehlerfreien Holzes vergleichbar ist (siehe z.B. EHLBECK et al. [29], FISETTE/RICE [38], HEIMESHOF/GLOS [46], LARSEN [60]).

Die Zugfestigkeit hingegen ist im Vergleich zu der des fehlerfreien Holzes deutlich geringer. Untersuchungen von *Pellicane* und *Ehlbeck et al.* zeigten, daß die mittlere Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung der mittleren Zugfestigkeit eines Brettabschnittes entspricht, bei dem die Äste einen Anteil von etwa 25 - 30% des Querschnittes einnehmen.

Diese vergleichsweise geringe Zugfestigkeit bei gleichzeitig vorhandenem hohem Elastizitätsmodul wirkt sich nachteilig auf das Tragverhalten einer Keilzinkenverbindung im Brettschichtholzträger aus. So ist der bei Brettabschnitten mit Ästen vorhandene Laminierungseffekt, d.h. die Entlastung von Brettabschnitten mit geringem Elastizitätsmodul durch einen steiferen Nachbarn, im Falle einer Keilzinkenverbindung nicht wirksam. Eine Keilzinkenverbindung zieht aufgrund ihrer hohen Dehnsteifigkeit Kräfte an und versagt somit früher als ein astbehafteter Brettabschnitt mit gleicher Festigkeit (das Tragverhalten von Brettabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit in einem Brettschichtholzträger wird in *Kapitel 4* näher beschrieben).

Dies verdeutlicht die Bedeutung der Keilzinkenverbindung auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern und die Notwendigkeit, die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den beeinflussenden Parametern zu kennen, um Ansatzpunkte für eine Steigerung der Festigkeiten zu finden.

3.2 Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von festigkeitsrelevanten Einflußgrößen

3.2.1 Allgemeines

Wie in *Abschnitt 2.3 und 2.4* bereits beschrieben, üben die Keilzinkenverbindungen einen entscheidenden Einfluß auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern aus. Da die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in erster Linie von den Keilzinkenverbindungen in den äußeren Zuglamellen bestimmt wird, ist weniger die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen als vielmehr deren Zugfestigkeit von Interesse.

Wie in *Abschnitt 3.1* beschrieben, zeigten die Untersuchungen von EHLBECK et al. [29], daß die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen mit steigender Rohdichte und/oder Elastizitätsmodul der Bretter zunahm, und daß das Versagen in den meisten Fällen von der Stoßhälfte mit der geringeren Rohdichte ausging. Weitergehende Aussagen konnten jedoch nicht gemacht werden, weil die Abhängigkeiten zwischen der Keilzinkenzugfestigkeit und anderen festigkeitsrelevanten Einflußgrößen, wie z.B. Elastizitätsmodul der beiden Stoßhälften, Jahrringbreite, markhaltigem Holz, Keilzinkenprofil, Leimart usw. nicht Gegenstand dieser Untersuchungen waren.

Im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens von EHLBECK et al. [35] ergab sich jedoch die Möglichkeit, den Einfluß aller o.a. Faktoren auf die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen zu untersuchen. Da die meisten der festgestellten Abhängigkeiten bzw. Tendenzen, zumindest qualitativ, auch auf die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen übertragbar erscheinen, werden die wichtigsten Untersuchungsergebnisse im folgenden dargestellt.

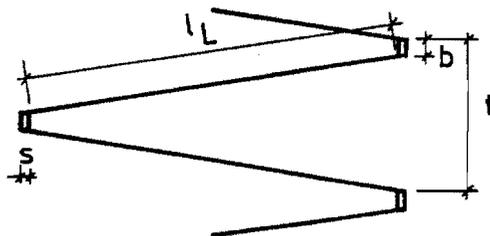
Insgesamt standen 900 keilgezinkte Lamellenstücke mit einer Länge von etwa 1 m zur Verfügung. Diese Proben stammten aus insgesamt 30 Holzleimbaubetrieben, bei denen die Probenentnahme an zwei unterschiedlichen Terminen im Rahmen der Güteüberwachung erfolgte.

Im ursprünglichen Arbeitsplan dieses Forschungsvorhabens war vorgesehen, die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von folgenden Parametern zu untersuchen:

- mittlere Rohdichte der Keilzinkenverbindung,
- mittlerer dynamischer Elastizitätsmodul der Keilzinkenverbindung, ermittelt mit Hilfe eines Schwingungs-Meßgerätes (siehe GÖRLACHER [44]),
- Versagensart (Biegebruch im Zinkengrund, Scherbruch entlang der Flanken oder Mischbruch),
- Leimart,
- Keilzinkenprofil (Nennmaße).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden folgende Einflußparameter zusätzlich in die Auswertung mit aufgenommen:

- Rohdichte jeder Stoßhälfte,
- dynamischer Elastizitätsmodul jeder Stoßhälfte,
- mittlere Jahrringbreite jeder Stoßhälfte,
- größte Jahrringbreite jeder Stoßhälfte,
- mittlerer Frühholzanteil jeder Stoßhälfte,
- größter Frühholzanteil jeder Stoßhälfte,
- markhaltiges Holz (ja/nein),
- Ort des Versagens (linke oder rechte Stoßhälfte),
- tatsächliche Keilzinkenabmessungen:



Hierbei waren neben der Zinkengrundbreite b noch das Verhältnis $\varphi = 2 l_L / t$ von Interesse, das ein Maß für die zur Kraftübertragung zur Verfügung stehende Leimfläche pro Breitereinheit darstellt,

- Anzahl der gefrästen Lamellen zum Zeitpunkt der Probenentnahme,
- Fräserleistung in % zum Zeitpunkt der Probenentnahme.

Die Ermittlung der Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen erfolgte mit Hilfe des in Bild 3.3 dargestellten Versuchsaufbaues.

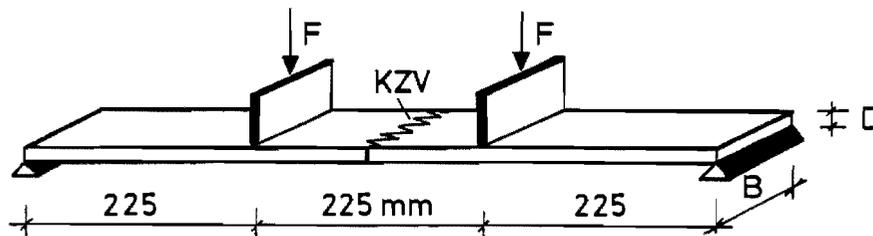


Bild 3.3: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen

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

$$f_B = 1350 \cdot \frac{F_{\max}}{B D^2} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (3.1)$$

mit

$$\begin{aligned} F_{\max} &= \text{aufnehmbare Last in N,} \\ B &= \text{Brettbreite in mm,} \\ D &= \text{Brettdicke in mm.} \end{aligned}$$

3.2.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Unter Berücksichtigung aller 900 Versuchswerte ergab sich eine mittlere Keilzinkenbiegefestigkeit von $50,0 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $8,9 \text{ N/mm}^2$ (Variationskoeffizient = 18%). Unter Annahme einer Normalverteilung ergibt sich eine zugehörige 5%-Fraktile von $35,4 \text{ N/mm}^2$.

Nach jedem Versuch wurde das Bruchbild des Prüfkörpers aufgenommen, d.h. für jede Stoßhälfte wurde untersucht, wieviel % der Bruchfläche (im Verhältnis zur Brettbreite) im Holz bzw. entlang der

Zinkenflanken verlief. Hierbei zeigte sich jedoch, daß das Bruchbild nicht in allen Fällen über die gesamte Brettstärke gleich war. So trat beim Prüfkörper in *Bild 3.4* auf der Oberseite (Druckzone) ein 100%-iges Holzversagen außerhalb des Keilzinkenbereiches auf, während auf der Unterseite (Zugzone) ein überwiegendes Keilzinkenversagen zu beobachten war. Da im Falle einer Biegebeanspruchung der Bruch in der Regel durch ein Versagen im Zugbereich ausgelöst wird, wurde die Bestimmung der Versagensart auf der Biegezugseite der Prüfkörper durchgeführt.

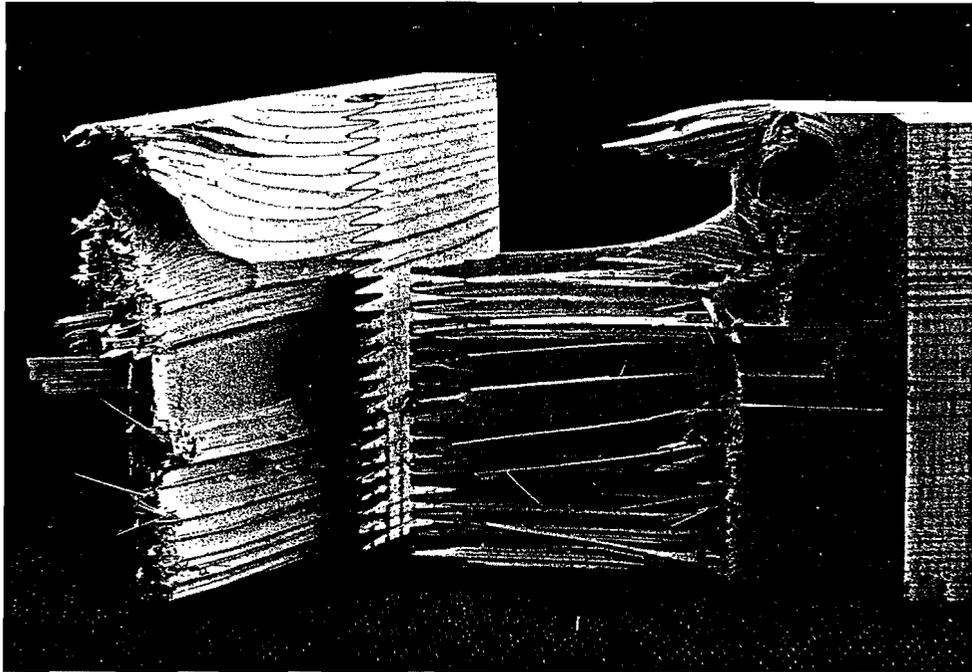


Bild 3.4: Prüfkörper mit unterschiedlichem Bruchbild auf der Zug- und Druckseite

3.2.2.1 Proben, die bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt wurden

Bei insgesamt 229 Proben war ein 100%-iges Keilzinkenversagen zu beobachten, d.h. die Finger der Keilzinkenverbindung wurden gänzlich unbeschädigt (vom Holzfaserbelag auf der Leimfläche abgesehen) auseinandergesogen.

In 15 Fällen konnte dieses Versagen auf eine schlechte Verleimung zurückgeführt werden. Bei diesen Prüfkörpern war kein Holzbelag auf der Leimfuge zu erkennen (siehe Bild 3.5).

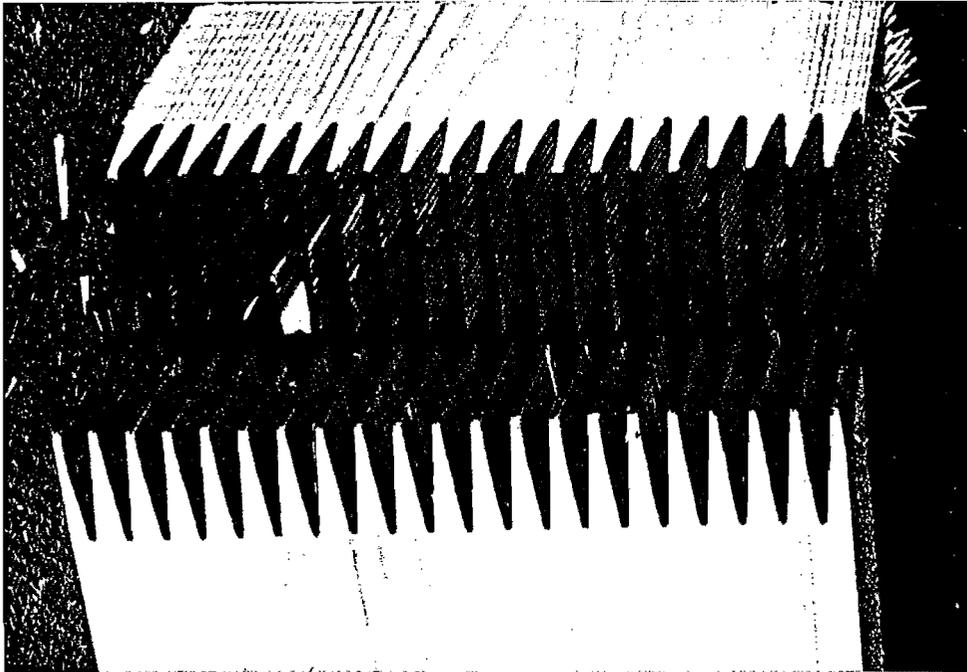


Bild 3.5: Keilzinkenverbindung mit schlechter Verleimung

Die mittlere Biegefestigkeit dieser Proben lag mit $42,6 \text{ N/mm}^2$ deutlich unter dem gesamten Mittelwert von $50,0 \text{ N/mm}^2$. Bei der weiteren Versuchsauswertung wurden diese Ergebnisse nicht mit einbezogen.

In weiteren 13 Fällen konnte das Versagen auf eine schlecht ausgeführte Keilzinkenverbindung zurückgeführt werden. Hierzu gehören besonders Keilzinkenverbindungen mit ungenügender Zinkenlänge (siehe Bild 3.6 a) und schlechtem Ineinandergreifen der Zinken (siehe Bild 3.6 b).

Die mittlere Biegefestigkeit dieser Keilzinkenverbindungen lag mit $37,1 \text{ N/mm}^2$ ebenfalls deutlich unter dem gesamten Mittelwert. Bei der weiteren Auswertung blieben die zugehörigen Ergebnisse unberücksichtigt.

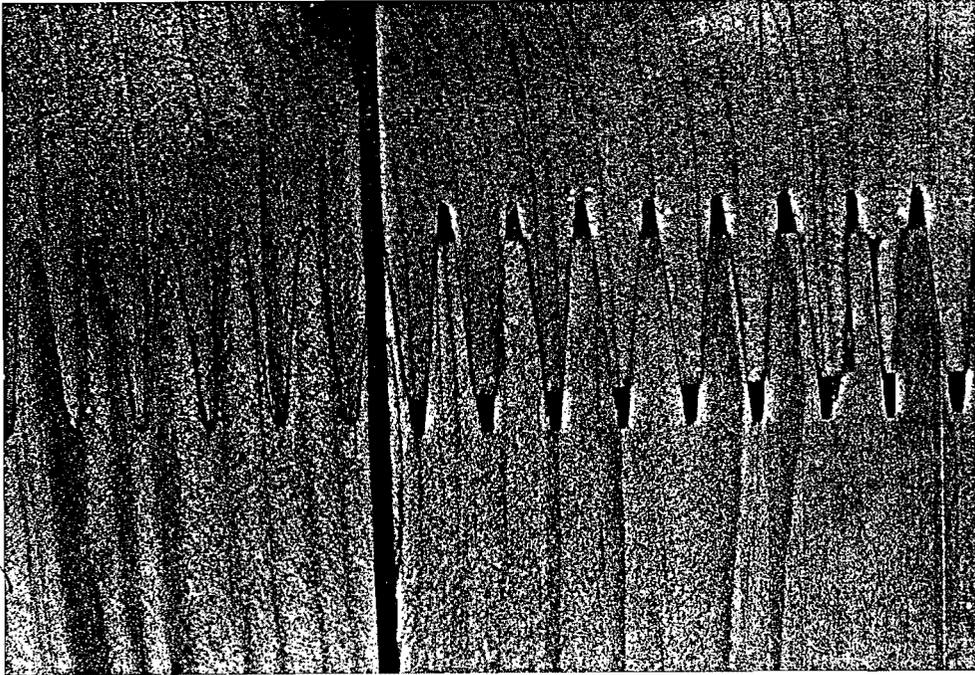


Bild 3.6a: Schlecht ausgeführte Keilzinkenverbindung; ungenügende Zinkenlänge (rechts)

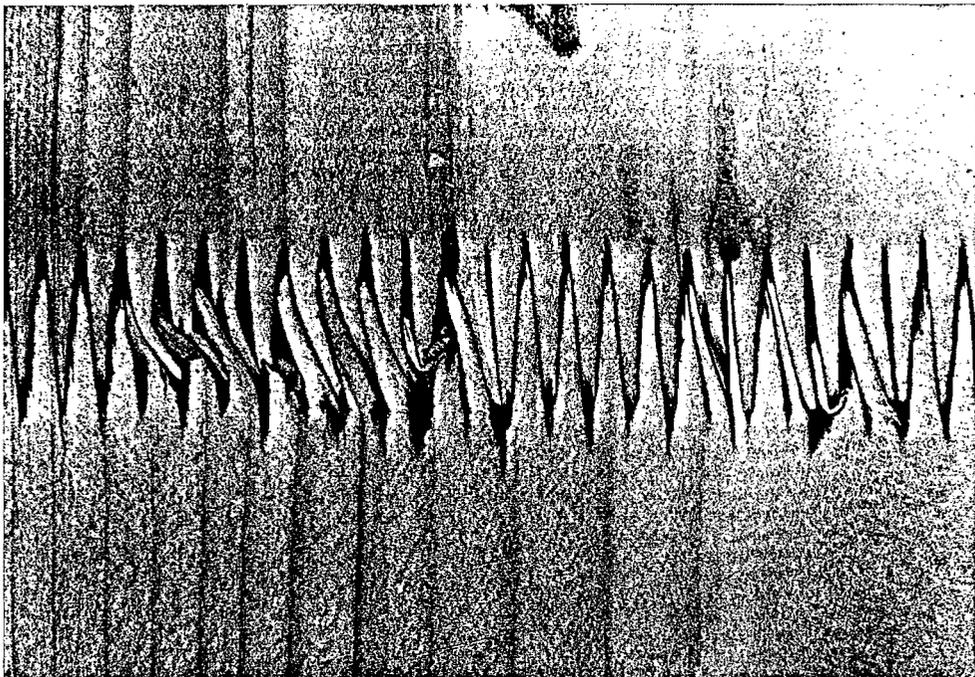


Bild 3.6b: Schlecht ausgeführte Keilzinkenverbindung; schlechtes Ineinandergreifen der Zinken

In 12 Fällen war das Versagen auf einen im unmittelbaren Keilzinkenbereich vorhandenen Ast zurückzuführen (siehe *Bild 3.7*). Auch diese Versuchsergebnisse wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen (mittlere Biegefestigkeit = $42,1 \text{ N/mm}^2$).

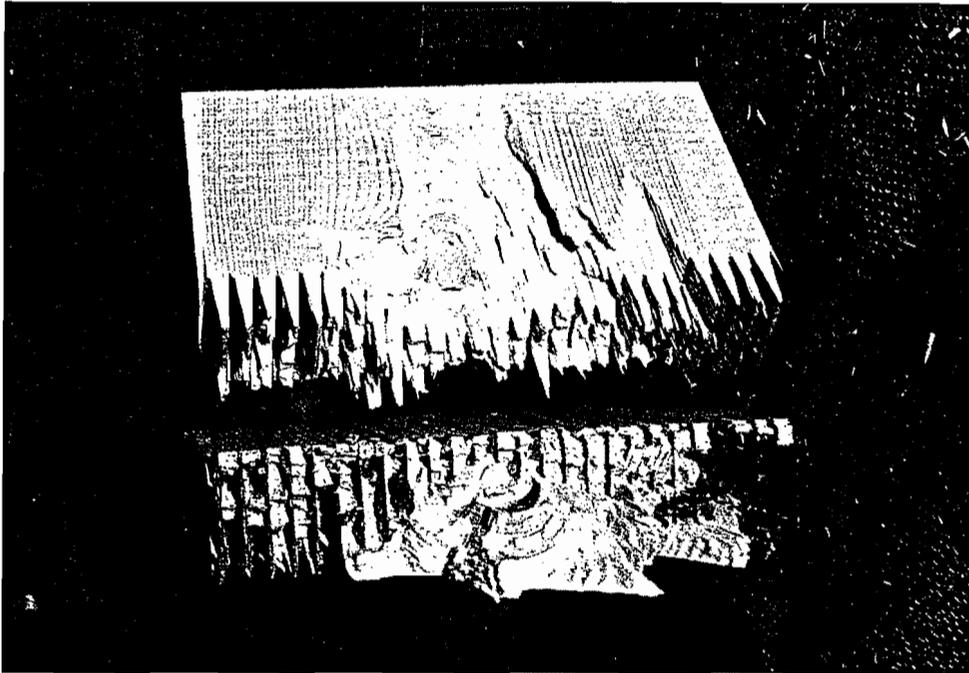


Bild 3.7: Ast im unmittelbaren Keilzinkenbereich

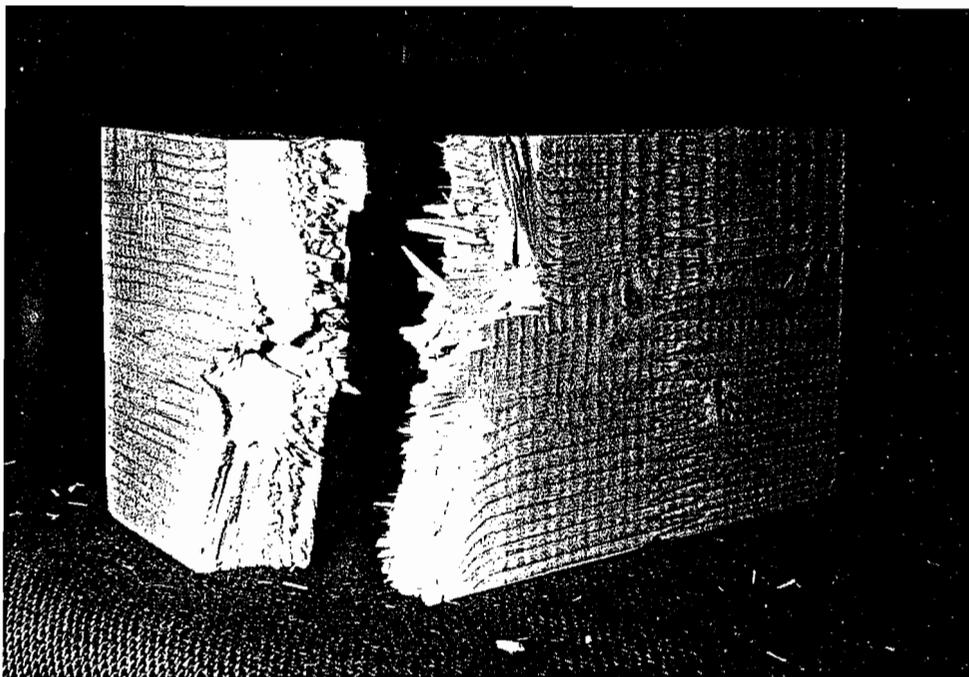


Bild 3.8: Holzversagen außerhalb des Keilzinkenbereiches

In weiteren 15 Fällen trat das Versagen aufgrund von Ästen zu 100% außerhalb des Keilzinkenbereiches auf (siehe *Bild 3.8*). Da bei diesen Proben die Biegefestigkeit des Brettes bei gegebener Ästigkeit und nicht die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung ermittelt wurde, wurden die zugehörigen Versuchsergebnisse nicht in die weitere Auswertung mit aufgenommen. Auch lag die mittlere Biegefestigkeit dieser Proben mit $41,1 \text{ N/mm}^2$ deutlich unter dem gesamten Mittel.

3.2.2.2 Einfluß der Versagensart

Unter Berücksichtigung der noch verbleibenden 845 Proben ergab sich eine mittlere Biegefestigkeit von $50,6 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $8,7 \text{ N/mm}^2$ (Variationskoeffizient = 17% und 5%-Fraktile = $36,3 \text{ N/mm}^2$). Diese Proben werden im weiteren Verlauf als "alle Proben" bezeichnet.

3.2.2.2.1 Proben mit überwiegendem Keilzinkenversagen

Bei insgesamt 821 Proben verlief der Bruch zumindest teilweise entlang der Zinkenflanken.

Da aber bei Proben, bei denen die Bruchfläche nur zu einem geringen Teil entlang der Zinkenflanken verläuft, nicht von einem eindeutigen Keilzinkenversagen ausgegangen werden kann, wurden bei der weiteren Auswertung in die Gruppe der Keilzinkenverbindungen mit Keilzinkenbruch nur die Proben aufgenommen, die einen Anteil von mindestens 80% Keilzinkenversagen aufwiesen. Die mittlere Biegefestigkeit dieser noch verbleibenden 258 Proben lag mit $53,0 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $9,5 \text{ N/mm}^2$ über dem Mittelwert aller Proben.

In *Bild 3.9* ist eine ordnungsgemäß hergestellte Keilzinkenverbindung mit 100%-igem Keilzinkenbruch dargestellt.

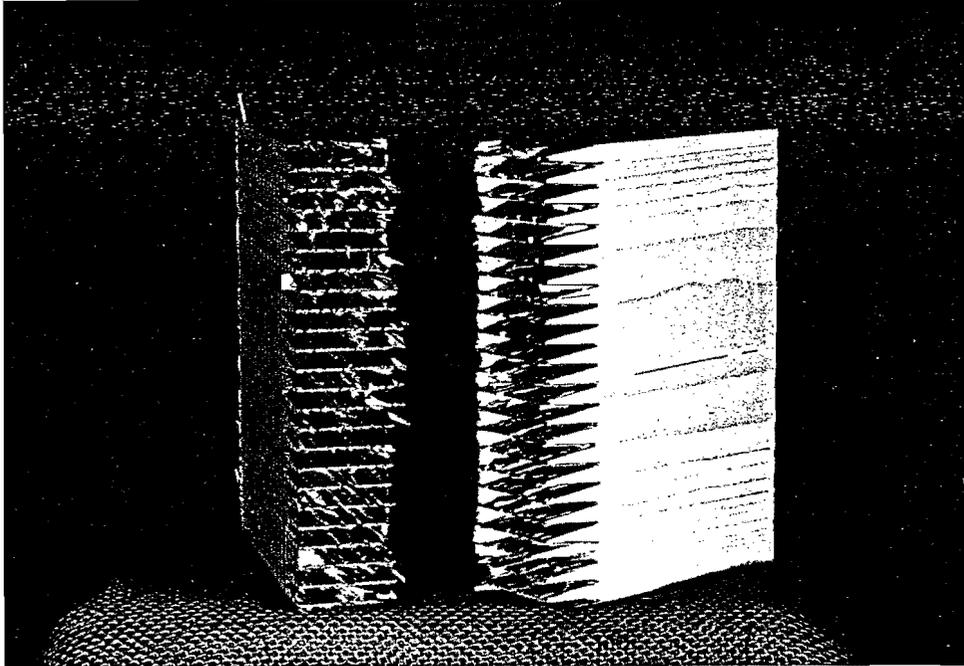


Bild 3.9: Ordnungsgemäße Keilzinkenverbindung mit 100%-igem Keilzinkenversagen

3.2.2.2.2 Proben mit überwiegendem Holzversagen

Bei insgesamt 679 Proben verlief die Bruchfläche zumindest teilweise im Holz, d.h. nicht entlang der Zinkenflanken.

In den Fällen, in denen das Versagen sowohl im Astbereich als auch entlang der Keilzinkenflanken auftrat (siehe Bild 3.10) war es nicht möglich, die Bruchursache (Ast oder Keilzinkenverbindung) eindeutig zu definieren. Daher war es auch nicht möglich, diese Versuchswerte von der weiteren Auswertung auszuschließen, weil ja die Keilzinkenverbindung zumindest teilweise beteiligt war.

Wie bei den Proben mit Keilzinkenversagen wurden in die Gruppe der Proben mit Holzversagen nur diejenigen Prüfkörper aufgenommen, bei denen die Bruchfläche mindestens zu 80% im Holz verlief (siehe z.B. Bild 3.11). Die mittlere Biegefestigkeit dieser 185 Proben lag bei $46,9 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $7,6 \text{ N/mm}^2$.

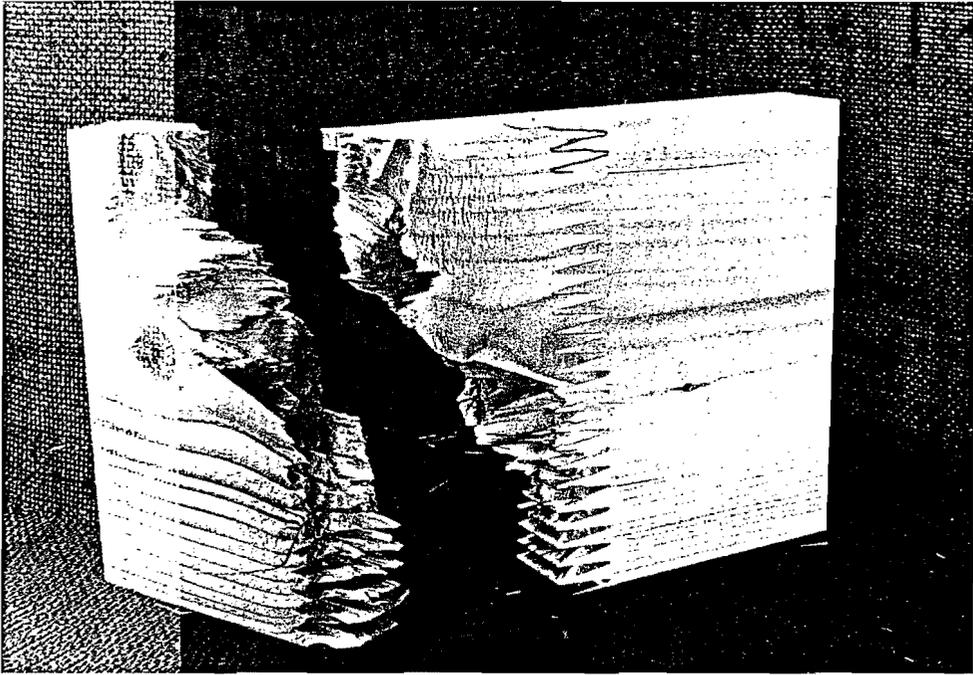


Bild 3.10: Gleichzeitiges Versagen im Ast- und Keilzinkenbereich

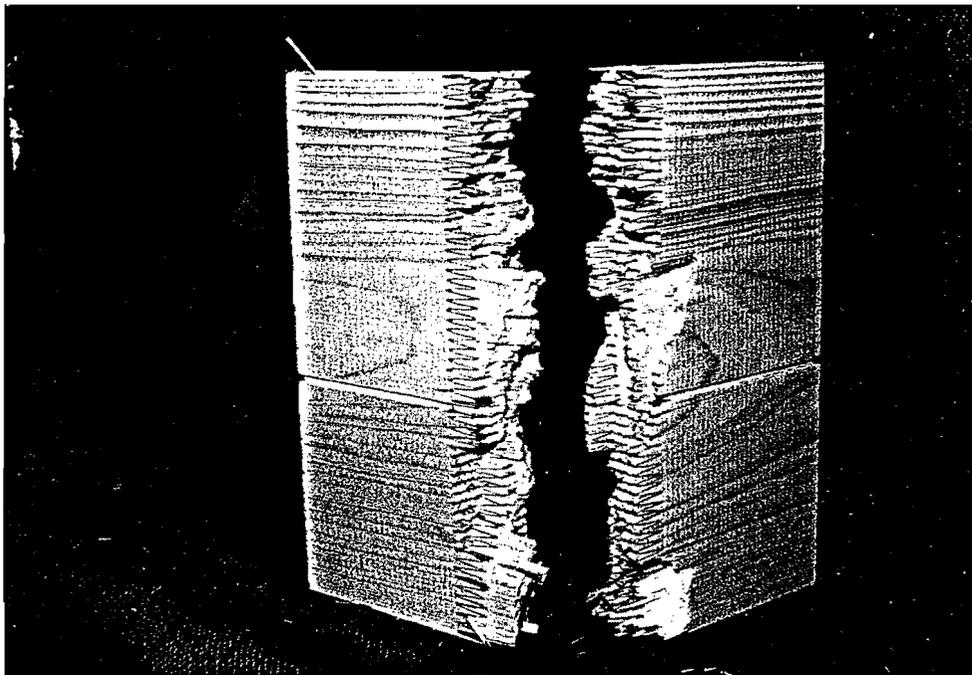


Bild 3.11: Keilzinkenverbindung mit überwiegendem Holzversagen

3.2.2.2.3 Proben mit Mischbruch

In diese Gruppe wurden alle Proben aufgenommen, bei denen weder ein überwiegendes Keilzinkenversagen noch ein überwiegendes Holzversagen festgestellt werden konnte (siehe *Bild 3.12*). Für diese insgesamt 402 Proben ergab sich die Biegefestigkeit im Mittel zu $50,9 \text{ N/mm}^2$ bei einer Standardabweichung von $8,0 \text{ N/mm}^2$.

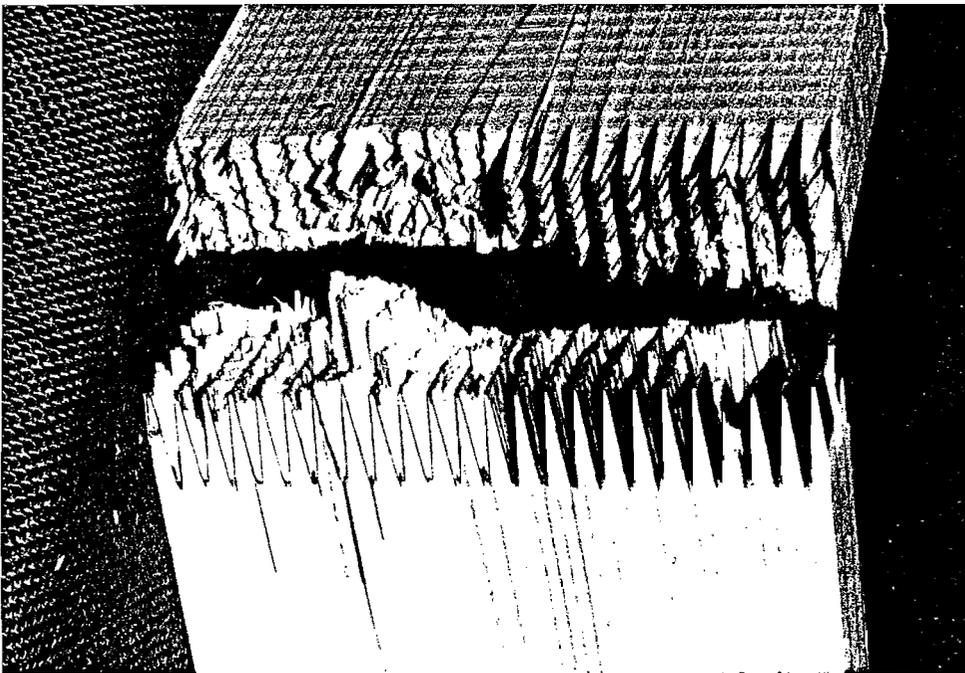


Bild 3.12: Keilzinkenverbindung mit Mischbruch

3.2.2.3 Einfluß der Holzeigenschaften

Bei den Proben mit Holzversagen trat das Versagen in 2 von 3 Fällen in der Stoßhälfte mit dem geringeren Elastizitätsmodul auf. In den Fällen, in denen das Versagen im "besseren" Brett eintrat, war die Differenz der beiden Elastizitätsmoduln nur gering, so daß die Möglichkeit eines Versagens im Brett mit dem höheren Elastizitätsmodul infolge der natürlichen Streuung der Festigkeitseigenschaften gegeben war. Bei diesen Untersuchungen bestätigte sich also die in *Abschnitt 3.1* bereits beschriebene Beobachtung, daß die Tragfähigkeit von Keilzinken-

verbindungen vom Brett mit den "schlechteren" Holzeigenschaften bestimmt wird. Daher wurden bei den hier beschriebenen Auswertungen der jeweils kleinere Wert des Elastizitätsmoduls und der Rohdichte sowie der jeweils größere Wert der Jahringbreite und des Frühholzanteiles verwendet.

3.2.2.3.1 Einfluß des Elastizitätsmoduls, der Rohdichte, der Jahringbreite und des Frühholzanteiles

In Tabelle 3.1 sind die Biegefestigkeiten und die jeweils ungünstigsten Holzeigenschaften einer Keilzinkenverbindung für jede der in Abschnitt 3.2.2.2 beschriebenen Gruppen angegeben.

Tabelle 3.1: Versuchsergebnisse (Mittelwerte); Unterscheidung nach Versagensart

	f_B	E_{\min}	ρ_{\min}	Jrb	max Jrb	Fh	max Fh
	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	mm	mm	%	%
Alle	50,6	12340	444	2,91	4,33	76	84
80% KzB	53,0	13470	455	2,50	3,79	74	83
80% HB	46,9	11130	433	3,28	4,93	76	85
MB	50,9	12140	442	3,00	4,40	76	85

Hierin bedeuten

- f_B = Biegefestigkeit,
- E_{\min} = kleinerer Elastizitätsmodul der beiden Stoßhälften,
- ρ_{\min} = kleinere Rohdichte der beiden Stoßhälften,
- Jrb = größte mittlere Jahringbreite der beiden Stoßhälften,
- max Jrb = größte maximale Jahringbreite der beiden Stoßhälften,
- Fh = größter mittlerer Frühholzanteil der beiden Stoßhälften,
- max Fh = größter maximaler Frühholzanteil der beiden Stoßhälften,
- KzB = Keilzinkenbruch,
- HB = Holzbruch,
- MB = Mischbruch.

Diese Werte gelten für eine Holzfeuchte von etwa 12%, die sich bis zum Prüfungszeitpunkt eingestellt hatte.

Aus dieser Tabelle geht hervor, daß entgegen der bisher weitverbreiteten Meinung ein überwiegendes Keilzinkenversagen nicht gleichbedeutend sein muß mit einer schlecht ausgeführten Keilzinkenverbindung. Die Tatsache, daß ein Keilzinkenversagen auftritt, läßt nur den Schluß zu, daß die Biegefestigkeit des Holzes so hoch war, daß ein Scherversagen entlang der Keilzinkenflanken erzwungen wurde.

Dies erklärt auch, daß bei den in *Abschnitt 3.1* beschriebenen Versuchen von *Radovic/Rohlfing* mit Keilzinkenverbindungen aus Furnierschichtholz das Versagen in allen Fällen entlang der Zinkenflanken eintrat. Die durch die Vergütung des Holzes bzgl. Ästigkeit, Elastizitätsmodul, Rohdichte und Jahrringbreite erreichte höhere Holzfestigkeit des Furnierschichtholzes bewirkte somit ein reines Keilzinkenversagen.

Um den Einfluß der Holzeigenschaften auf die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen näher zu untersuchen, wurde für jede der o.a. Gruppen eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. In *Tabelle 3.2* sind die ermittelten Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Keilzinkenbiegefestigkeit und den verschiedenen Holzeigenschaften angegeben.

Tabelle 3.2: Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen und den zugehörigen Holzeigenschaften

	E_{\min}	ρ_{\min}	Jrb	max Jrb	Fh	max Fh
Alle	0,509	0,499	-0,421	-0,424	-0,266	-0,253
80% KzB	0,497	0,437	-0,474	-0,448	-0,200	-0,150
80% HB	0,494	0,546	-0,515	-0,503	-0,392	-0,374
MB	0,422	0,477	-0,272	-0,282	-0,226	-0,226

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß in allen Gruppen mit besseren Holzeigenschaften auch höhere Biegefestigkeiten zu erwarten sind. Weiterhin ist zu erkennen, daß für die Gruppe der Keilzinkenverbindungen mit überwiegendem Holzversagen die engsten

Beziehungen zwischen Biegefestigkeit und den Holzeigenschaften bestehen, während die Gruppe mit Keilzinkenversagen etwas geringere Korrelationskoeffizienten aufweist.

Aufgrund der ermittelten Abhängigkeiten erscheint es daher möglich, bei einer maschinellen Holzsortierung nach dem Elastizitätsmodul oder der Rohdichte Keilzinkenverbindungen mit hoher Tragfähigkeit herzustellen und auch zu gewährleisten. Im Falle einer visuellen Holzsortierung erscheint dies nur möglich, wenn z.B. die maximale Jahrringbreite als Sortierparameter herangezogen wird.

Diese Abhängigkeit kann aber nur dann sinnvoll genutzt werden, wenn die Größe der maximalen Jahrringbreite zuverlässig bestimmt werden kann. Da aber eine visuelle Holzsortierung in der Praxis weitgehend auf der persönlichen Einschätzung des Sortierenden basiert, ist es bei dem hohen Arbeitstempo während der visuellen Holzsortierung nicht möglich, eine auch nur annähernd so zuverlässige Bestimmung des Sortierparameters zu gewährleisten, wie dies bei einer maschinellen Holzsortierung der Fall ist.

In Table 3.3 sind neben den einfachen auch die multiplen Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen und den wichtigsten Holzeigenschaften angegeben.

Table 3.3: Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen und den wichtigsten Holzeigenschaften

Alle	80% KzB	80% HB	MB	E_{\min}	ρ_{\min}	max Jrb	max Fh
0,509	0,497	0,494	0,422	x	x	x	x
0,499	0,437	0,546	0,477				
-0,424	-0,448	-0,503	-0,282	x	x	x	x
-0,253	-0,150	-0,374	-0,226				
0,554	0,508	0,577	0,513	x	x		
0,578	0,553	0,635	0,519	x	x	x	
0,578	0,558	0,643	0,519	x	x	x	x

Die Korrelationskoeffizienten, die im Rahmen einer maschinellen Holzsortierung genutzt werden könnten, sind hierbei fett eingerahmt. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß eine zusätzliche Ermittlung der maximalen Jahrringbreite eine weitere Steigerung des Korrelationskoeffizienten ermöglicht. In Anbetracht der o.a. vergleichsweise unzuverlässigen Bestimmbarkeit der maximalen Jahrringbreite erscheint jedoch der Aufwand für diese Art der kombinierten maschinellen/visuellen Holzsortierung nicht gerechtfertigt. Der maximale Frühholzanteil übt offensichtlich keinen bedeutungsvollen zusätzlichen Einfluß auf die Keilzinkenbiegefestigkeit aus.

In *Bild 3.13* und *Bild 3.14* ist die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit vom jeweils kleineren Wert des Elastizitätsmoduls E_{\min} und der Rohdichte ρ_{\min} der beiden Stoßhälften für alle Proben dargestellt.

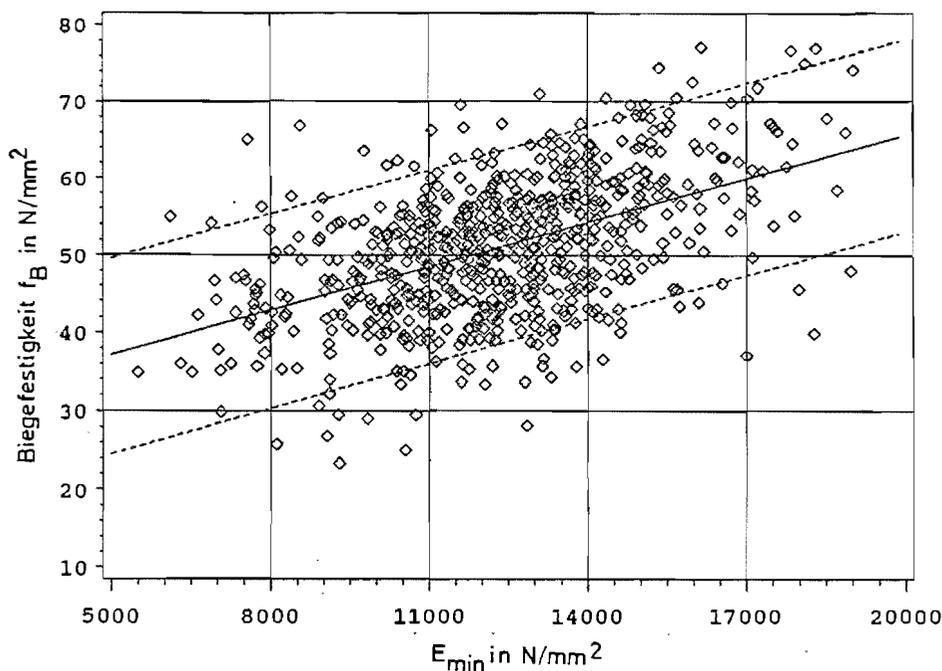


Bild 3.13: Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit vom kleineren Elastizitätsmodul E_{\min} der beiden Stoßhälften; 845 Proben

Die in diesen Bildern dargestellten gestrichelten Linien geben den Verlauf der 5%- bzw. der 95%-Fraktile in Abhängigkeit vom jeweils untersuchten Parameter an. Im Bereich zwischen diesen beiden Linien liegen somit 90% aller Werte.

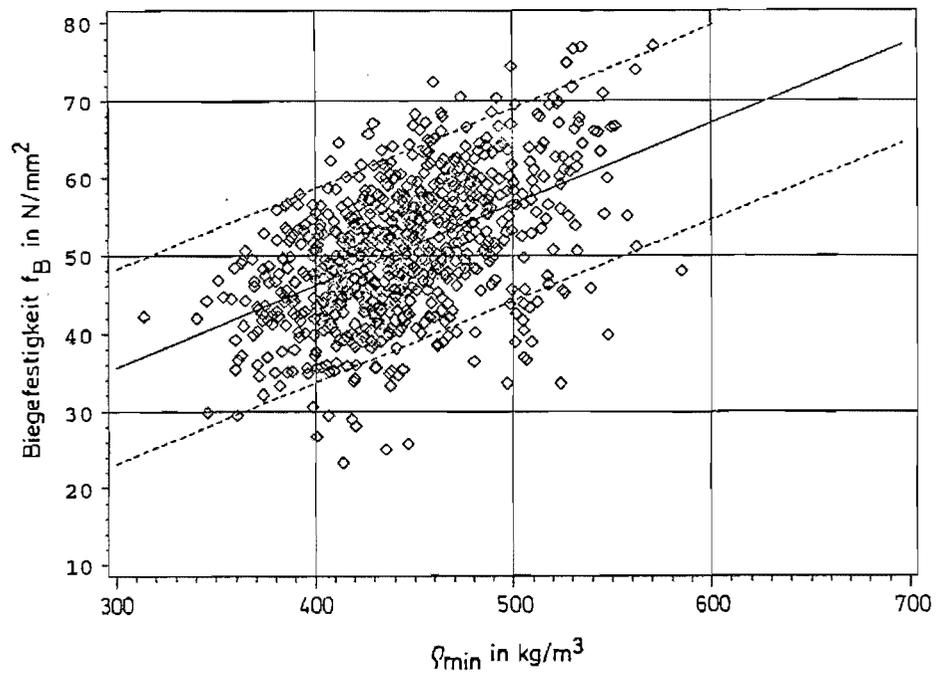


Bild 3.14: Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von der kleineren Rohdichte ρ_{\min} der beiden Stoßhälften; 845 Proben

3.2.2.3.2 Einfluß der Markröhre

Wie in *Abschnitt 3.1* beschrieben, stellte *Moody* bei seinen Untersuchungen bereits fest, daß Keilzinkenverbindungen mit markhaltigem oder marknahem Holz eine geringere Tragfähigkeit aufweisen als Keilzinkenverbindungen ohne Markanteil. Daher wurde bei den hier beschriebenen Untersuchungen geprüft, ob in einer Stoßhälfte die Markröhre enthalten war oder nicht. Hierbei stellte sich heraus, daß in etwa 1/6 aller Fälle die Markröhre in mindestens einer Stoßhälfte auftrat. In *Tabelle 3.4* sind die Versuchsergebnisse sowohl für die Proben mit als auch ohne Markröhre angegeben.

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß Keilzinkenverbindungen mit Markröhre in allen Gruppen im Mittel sowohl eine geringere Biegefestigkeit als auch "schlechtere" Holzeigenschaften aufweisen als die Keilzinkenverbindungen ohne Markröhre. Dies kann damit erklärt werden, daß die überdurchschnittlich großen ersten Jahrringe eines Baumes die Rohdichte und den Elastizitätsmodul im Bereich der Markröhre abmindern und folglich die Tragfähigkeit der betreffenden Keilzinkenverbindungen beeinträchtigen.

Diese Aussage beschränkt sich jedoch nicht nur auf Proben, bei denen die Markröhre direkt enthalten war, sondern sie gilt auch für Proben mit marknahem Holz. Da aber bei einer Vielzahl von Proben die Markröhre nur knapp außerhalb des Brettquerschnittes lag, ist zu vermuten, daß auch die Tragfähigkeit dieser Keilzinkenverbindungen vom marknahen Holz (juvenile wood) mit geringeren Festigkeitseigenschaften zumindest teilweise beeinflußt wird. Die Versuchsergebnisse zeigen aber, daß allein das Vorhandensein der Markröhre ausreicht, die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen zu beeinträchtigen

Tabelle 3.4: Versuchsergebnisse (Mittelwerte); Unterscheidung nach Proben mit und ohne Markröhre

		f_B	E_{\min}	ρ_{\min}	max Jrb	max Fh
		N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	mm	%
Proben ohne Mark- röhre	Alle	51,2	12560	445	4,25	84
	80% KzB	53,2	13600	456	3,76	83
	80% HB	47,4	11240	435	4,83	85
	MB	51,7	12380	442	4,32	84
Proben mit Mark- röhre	Alle	47,8	11290	437	4,72	87
	80% KzB	51,4	12270	449	3,96	85
	80% HB	44,8	10630	422	5,36	88
	MB	47,8	11240	439	4,73	87

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte der Einfluß des marknahen Holzes zahlenmäßig nur sehr grob abgeschätzt werden, was letztlich auch darauf zurückzuführen ist, daß es keine eindeutige Definition dieses Bereiches gibt (Angabe in mm oder Anzahl der Jahrringe). Die Frage ist allerdings berechtigt, ob eine genauere rechnerische Abschätzung dieses Einflusses überhaupt erforderlich ist, weil der Großteil der Bretter aufgrund der Einschneidepraxis der Sägewerke sowieso aus dem unmittelbaren Bereich der Markröhre stammen.

Bei einer maschinellen Holzsortierung erscheint eine Vorsortierung auch bzgl. der Markröhre möglich. Aufgrund der Abhängigkeit, die zwischen der Jahrringbreite und der Rohdichte bzw. dem Elastizitätsmodul besteht, ist die Wahrscheinlichkeit gering, daß ein Brett mit Markröhre die an hochwertige Decklamellen gestellten Anforderungen bzgl. der Rohdichte oder des Elastizitätsmoduls erfüllt.

3.2.2.4 Einfluß der Keilzinkengeometrie

Von den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Keilzinkenverbindungen besaßen insgesamt 640 eine Zinken - Nennlänge von 20 mm und 205 eine Länge von 15 mm. Für jedes dieser beiden Keilzinkenprofile sind die Versuchsergebnisse in Tabelle 3.5 angegeben.

Tabelle 3.5: Versuchsergebnisse (Mittelwerte); Unterscheidung nach Keilzinkenprofil

		f_B	E_{\min}	ρ_{\min}	max Jrb	max Fh
		N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	mm	%
15 mm- Profil	Alle	53,6	12420	446	4,28	84
	80% KzB	59,7	14580	466	3,40	82
	80% HB	48,2	10640	431	5,10	85
	MB	53,7	12080	442	4,25	84
20 mm- Profil	Alle	49,7	12320	443	4,34	85
	80% KzB	51,1	13170	452	3,89	84
	80% HB	46,3	11330	433	4,84	85
	MB	50,2	12160	441	4,44	85

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß das 15 mm - Profil in allen Gruppen im Mittel höhere Biegefestigkeiten aufweist als das 20 mm - Profil. Ein Vergleich der Holzeigenschaften zeigt, daß lediglich die Gruppe der Proben mit überwiegendem Keilzinkenversagen unterschiedliche Materialeigenschaften aufwiesen, womit der in dieser Gruppe festgestellte deutliche Tragfähigkeitsunterschied zu einem gewissen Teil erklärt werden kann. Dennoch deuten die Versuchsergebnisse darauf hin, daß mit dem 15 mm - Profil im Mittel höhere Festigkeiten zu erreichen sind, als mit dem 20 mm - Profil.

Um den Einfluß der Keilzinkengeometrie genauer zu untersuchen, wurden von jeder geprüften Keilzinkenverbindung die tatsächlich vorhandenen Abmessungen aufgenommen und in die spätere Auswertung mit einbezogen. In Tabelle 3.6 sind diese gemessenen Keilzinkenabmessungen für jedes Profil angegeben.

Tabelle 3.6: Gemessene Keilzinkenabmessungen

		Kleinstwert	Mittelwert	Größtwert
15 mm- Profil	l [mm]	12,2	13,3	14,2
	t [mm]	3,5	3,8	4,0
	b [mm]	0,5	0,7	1,0
	l_L [mm]	12,3	13,3	14,3
	φ [-]	6,2	7,1	7,8
20 mm- Profil	l [mm]	14,5	18,8	21,5
	t [mm]	5,7	6,3	7,2
	b [mm]	1,0	1,1	1,8
	l_L [mm]	14,6	18,9	21,6
	φ [-]	4,7	6,0	6,8

Daraus geht hervor, daß die Abmessungen der Keilzinkenprofile z.T. beträchtlichen Schwankungen unterworfen sind, und daß beim 15 mm - Profil die Zinkengrundbreite b kleiner und das Verhältnis $\varphi = 2 l_L/t$ größer ist als beim 20 mm - Profil.

Diese beiden Faktoren, auf deren Bedeutung für die Festigkeitseigenschaften einer Keilzinkenverbindung bereits in *Abschnitt 3.1* hingewiesen wurde, erklären einen Teil der festgestellten Festigkeitsunterschiede.

Deshalb wurde mit Hilfe einer Regressionsanalyse die Abhängigkeit zwischen der Keilzinkenbiegefestigkeit und diesen beiden festigkeitsrelevanten Einflußgrößen untersucht. In *Tabelle 3.7* sind die zugehörigen Korrelationskoeffizienten angegeben.

Aus dieser Tabelle ist allerdings zu erkennen, daß diese beiden Einflußgrößen lediglich bei den Proben mit überwiegenderem Keilzinkenversagen einen signifikanten Einfluß ausüben. Dies deutet wiederum darauf hin, daß die günstigeren Profileigenschaften des 15 mm - Profiles erst dann richtig zum Tragen kommen, wenn mit Hilfe einer geeigneten Holzsortierung gewährleistet werden kann, daß kein Holzversagen mehr eintritt. Diese Tendenz deutete sich bereits bei den Versuchsergebnissen in *Tabelle 3.5* an, bei denen in der Gruppe mit überwiegenderem Keilzinkenversagen die größten Festigkeitsunterschiede zu verzeichnen waren.

Tabelle 3.7: Korrelationskoeffizienten für die Abhängigkeiten zwischen der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen und der Zinkengrundbreite b sowie dem Verhältnis $\varphi = 2 l_L/t$

	b	φ
Alle	-0,147	0,235
80% KzB	-0,275	0,308
80% HB	-0,094	0,249
MB	-0,153	0,268

Insgesamt gesehen jedoch ist die Bedeutung der Keilzinkenabmessungen geringer als die der Holzeigenschaften, denn auch mit Hilfe einer veränderten Keilzinkengeometrie ist es nicht möglich, eine schlechte Holzqualität auszugleichen, während es unabhängig vom Keilzinkenprofil möglich ist, mit gutem Holz hohe Tragfähigkeiten zu erzielen.

3.2.2.5 Einfluß von produktionsabhängigen Faktoren

In einer Umfrage wurden alle Firmen, bei denen Keilzinkenproben entnommen wurden, darum gebeten, Angaben über ihre Keilzinkenproduktion zu machen. Hierbei waren besonders Angaben über die verwendeten Leime und die Arbeitsleistung der Fräser von Interesse. Leider antwortete nur etwa die Hälfte aller Firmen auf dieses Schreiben und dies z.T. auch nur unvollständig.

Bekannt von allen Proben war lediglich die verwendete Leimart (Harnstoff- oder Resorcinharzleim), da diese mit dem bloßen Auge zu unterscheiden ist. Hierbei war die überwiegende Anzahl der Keilzinkenverbindungen mit Resorcinharz verleimt (645 von 845 Proben). Für beide Leimarten sind die Versuchsergebnisse in Tabelle 3.8 angegeben.

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindungen für beide Leimarten vergleichbar sind, und daß etwaige Festigkeitsunterschiede über die Holzeigenschaften erklärt werden können.

Tabelle 3.8: Versuchsergebnisse (Mittelwerte); Unterscheidung nach Leimart

		f_B	E_{\min}	ρ_{\min}	max Jrb	max Fh
		N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	mm	%
Resorcin	Alle	50,6	12270	445	4,32	84
	80% KzB	52,4	13410	454	3,79	83
	80% HB	47,4	10940	434	4,95	85
	MB	50,9	12060	443	4,39	85
Harnstoff	Alle	50,7	12580	441	4,36	86
	80% KzB	55,3	13720	463	3,75	86
	80% HB	45,8	11620	428	4,87	87
	MB	50,9	12460	435	4,41	86

Wichtige Informationen erwartete man sich bzgl. der Fräserleistungen, um deren Einfluß auf die Keilzinkenbiegefestigkeit untersuchen zu können. Hierbei machten die meisten der antwortenden Firmen zwar Angaben über die mittleren Arbeitsleistungen ihrer Fräser, diese Angaben bezogen sich jedoch auf unterschiedliche Größen:

- am eindeutigsten war die Angabe der Zahl der Fräsvorgänge, die, multipliziert mit der Anzahl der Bretter pro Paket, die Anzahl der gefrästen Keilzinkungen ergab. Laut diesen Angaben schwankt die mittlere Arbeitsleistung eines Fräsersatzes zwischen 2400 und 100000 gefrästen Keilzinkungen;
- andere Betriebe gaben die mittlere Fräserleistung in laufenden Lamellenmetern an, so daß die Anzahl der gefrästen Keilzinkenverbindungen über eine gewählte mittlere Brettlänge abgeschätzt werden mußte;
- wieder andere Firmen gaben die Arbeitsleistung im m³ Brett-schichtholz an, so daß hier zusätzlich eine mittlere Brettbreite gewählt werden mußte, um einen groben Schätzwert für die Anzahl der insgesamt gefrästen Keilzinkenverbindungen zu erhalten.

Auch die Angaben über die Zeiträume, die zwischen zwei Fräserwechseln liegen, wichen z.T. erheblich voneinander ab. Während in einigen wenigen Betrieben wöchentlich ein Fräserwechsel vorgenommen wird, vergingen bei einer Firma über 4 Monate bis zum nächsten Fräserwechsel.

Neben den mittleren Fräserleistungen waren aber auch Angaben über die Fräserwechsel vor und nach der Probenentnahme erforderlich, um eine Aussage über die Fräserleistung zu diesem Zeitpunkt machen zu können. Hierbei zeigte sich jedoch, daß nur 13 Firmen angeben konnten, wann die Fräser gewechselt worden waren, wobei die gemachten Angaben nicht immer sehr genau waren. Somit konnte auch die Anzahl der bis zum Zeitpunkt der Probenentnahme gefrästen Keilzinkenverbindungen oft nur sehr grob abgeschätzt werden. Somit ist es nicht verwunderlich, daß bei der durchgeführten Regressionsanalyse kein Einfluß der Anzahl der gefrästen Keilzinkenverbindungen oder der prozentualen Fräserauslastung nachgewiesen werden konnte (Korrelationskoeffizienten unter 0,25). Hierzu sind weitere gezielte Untersuchungen erforderlich.

Andere produktionsabhängige Faktoren, wie z.B. Holzfeuchte jeder Stoßhälfte zum Zeitpunkt der Verleimung, ordnungsgemäßer Ansatz der Leimflotte, Standzeit des Leimes und ungenügender oder zu hoher Längspreßdruck waren im Nachhinein nicht mehr festzustellen, so daß deren Einfluß auf die Keilzinkenfestigkeit im Rahmen dieser Arbeit zahlenmäßig nicht abgeschätzt werden konnte.

3.2.3 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von festigkeitsrelevanten Einflußgrößen untersucht. Hierbei ergaben sich folgende Tendenzen:

- Voraussetzung für hohe Tragfähigkeiten ist eine ordnungsgemäß, d.h. den Produktionsanforderungen entsprechend hergestellte Keilzinkenverbindung;
- die Tragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung wird von der "schlechteren" Stoßhälfte bestimmt, d.h. das Versagen tritt i.d.R. in dem Brett mit den schlechteren Holzeigenschaften auf. Dies bedeutet, daß bei der Verbindung von Brettern mit stark unterschiedlichen Holzeigenschaften die höheren Festigkeitseigenschaften des besseren Brettes nicht genutzt werden können;
- die Keilzinkenbiegefestigkeit wächst mit steigender Rohdichte, steigendem Elastizitätsmodul und abnehmender Jahrringbreite; ein Einfluß des Frühholzanteiles konnte nicht nachgewiesen werden;

- die Proben mit überwiegendem Keilzinkenversagen wiesen im Mittel sowohl bessere Holzeigenschaften als auch höhere Festigkeitswerte auf als die Proben mit überwiegendem Holzversagen. Ein überwiegendes Keilzinkenversagen ist also nicht gleichbedeutend mit einer schlecht ausgeführten Keilzinkenverbindung;
- mit besser werdenden Holzeigenschaften wächst die Wahrscheinlichkeit eines Keilzinkenversagens, d.h. eines Scherbruches entlang der Zinkenflanken;
- die Keilzinkenverbindungen, bei denen in mindestens einer Stoßhälfte eine Markröhre auftrat, wiesen im Mittel eine geringere Biegefestigkeit auf als die Keilzinkenverbindungen ohne Markröhre;
- die Keilzinkenverbindungen mit einem 15 mm - Profil wiesen im Mittel höhere Biegefestigkeiten auf als die Proben mit einem 20 mm - Profil, was auf die günstigeren Profileigenschaften Zinkengrundbreite b und Verhältnis $\varphi = 2 l_L/t$ zurückgeführt werden kann;
- zwischen den Keilzinkenverbindungen mit Harnstoff- und Resorcinharzleimen konnte kein Unterschied in der Tragfähigkeit festgestellt werden;
- die Einflüsse von produktionsabhängigen Faktoren konnten wegen nicht ausreichender Kenntnisse über die Keilzinkenherstellung in den Betrieben rechnerisch nicht erfaßt werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse ermöglichen es, Keilzinkenverbindungen mit hoher Tragfähigkeit herzustellen und zu gewährleisten. In Anbetracht der Bedeutung, die der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen hinsichtlich der Tragfähigkeit von Brett-schichtholzträgern zukommt, stellen diese Untersuchungen auch eine wichtige Grundlage für die Herstellung von Brettschichtholzträgern mit hoher Festigkeit dar.

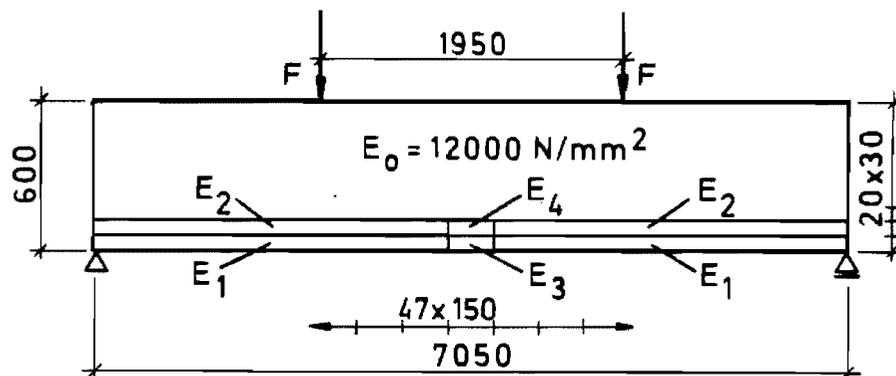
4 Tragverhalten von Brettabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit in einem Brettschichtholzträger

4.1 Allgemeines

Betrachtet man einen Träger, der infolge einer Querbelastung einer bestimmten Momentenbeanspruchung ausgesetzt ist, so ergibt sich für den Fall eines homogenen Trägers eine dreieckförmige Normalspannungsverteilung über die Trägerhöhe.

Ein Brettschichtholzträger jedoch ist aus lauter verschiedenen Lamellen aufgebaut, die ihrerseits wiederum aus mehreren Brettern mit unterschiedlichem Elastizitätsmodul zusammengesetzt sind. Aber auch innerhalb eines Brettes ist der Elastizitätsmodul nicht konstant, sondern hier liegen Bereiche mit hoher Steifigkeit (fehlerfreie Brettabschnitte) und Bereiche mit geringer Steifigkeit (z.B. Brettabschnitte mit Ästen) nebeneinander.

Um das Tragverhalten von Lamellen und Brettabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit und die Auswirkungen auf die Nachbarlamellen bzw. -elemente zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit Berechnungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente durchgeführt. Diesen Berechnungen wurde der in Bild 4.1 dargestellte Träger mit $47 \times 20 = 940$ Elementen zugrundegelegt.



Maße in mm

Bild 4.1: Bei den Finite Elemente Berechnungen zugrundegelegter Träger

Während der Elastizitätsmodul der 18 oberen Lamellen konstant gehalten wurde ($E_0 = 12\,000 \text{ N/mm}^2$), wurden die Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 der beiden äußeren Zuglamellen variiert (zwischen $8\,000$ und $16\,000 \text{ N/mm}^2$). Weiterhin wurden die Elastizitätsmoduln der Elemente 3 (mit E_3) und 4 (mit E_4) variiert, die jeweils in Lamellenmitte lagen. Die Werte dieser Elastizitätsmoduln schwankten zwischen 0 (= ausgefallenes Element) und $18\,000 \text{ N/mm}^2$.

4.2 Träger mit konstanten Lamellen-Elastizitätsmoduln

Zunächst wurden die Spannungen in den Elementen 3 und 4 für die Fälle untersucht, in denen der Elastizitätsmodul dieser Elemente dem Elastizitätsmodul der zugehörigen Lamelle entsprach, d.h. für $E_3 = E_1$ und $E_4 = E_2$.

In diesen Fällen hat man es mit "quasi-homogenen" Trägern zu tun, deren Spannungsverteilung über die Trägerhöhe in Anlehnung an die Theorie der Verbundquerschnitte rechnerisch einfach zu bestimmen ist. Die effektive Biegesteifigkeit $ef EI$ ergibt sich unter Berücksichtigung der Elastizitätsmoduln der einzelnen Lamellen zu:

$$ef EI = \sum E_i I_i + \sum E_i A_i a_i^2 \quad (4.1)$$

mit

$$\begin{aligned} \sum E_i I_i &= \text{Summe der Biegesteifigkeiten der Einzellamellen,} \\ \sum E_i A_i a_i^2 &= \text{Summe der Steiner-Anteile der Einzellamellen, und} \\ E_i &= \text{Lamellen - Elastizitätsmodul der } i\text{-ten Lamelle.} \end{aligned}$$

Die Spannung $ef \sigma_i$ in einem Punkt mit dem Abstand y_i vom elastischen Schwerpunkt (d.h. von der Spannungsnulllinie) ergibt sich dann zu :

$$ef \sigma_i = \frac{M}{ef EI} \cdot E_i y_i \quad (4.2)$$

wobei E_i wiederum dem zugehörigen Lamellen - Elastizitätsmodul entspricht.

Die Spannung $ef \sigma_i$ entspricht der in einer Lamelle tatsächlich auftretenden Spannung, unter der Voraussetzung, daß der Elastizitätsmodul jeder Lamelle über die gesamte Länge konstant ist.

Die rechnerische Spannung σ_i in einem Punkt ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Lamellen-Elastizitätsmoduln ergibt sich zu:

$$\sigma_i^0 = \frac{M}{I_0} \cdot y_i^0 \quad (4.3)$$

mit

$$I_0 = B H_{\text{ges}}^3 / 12,$$

$$y_i^0 = \text{Abstand des betrachteten Punktes vom geometrischen Schwerpunkt } (= H_{\text{ges}}/2).$$

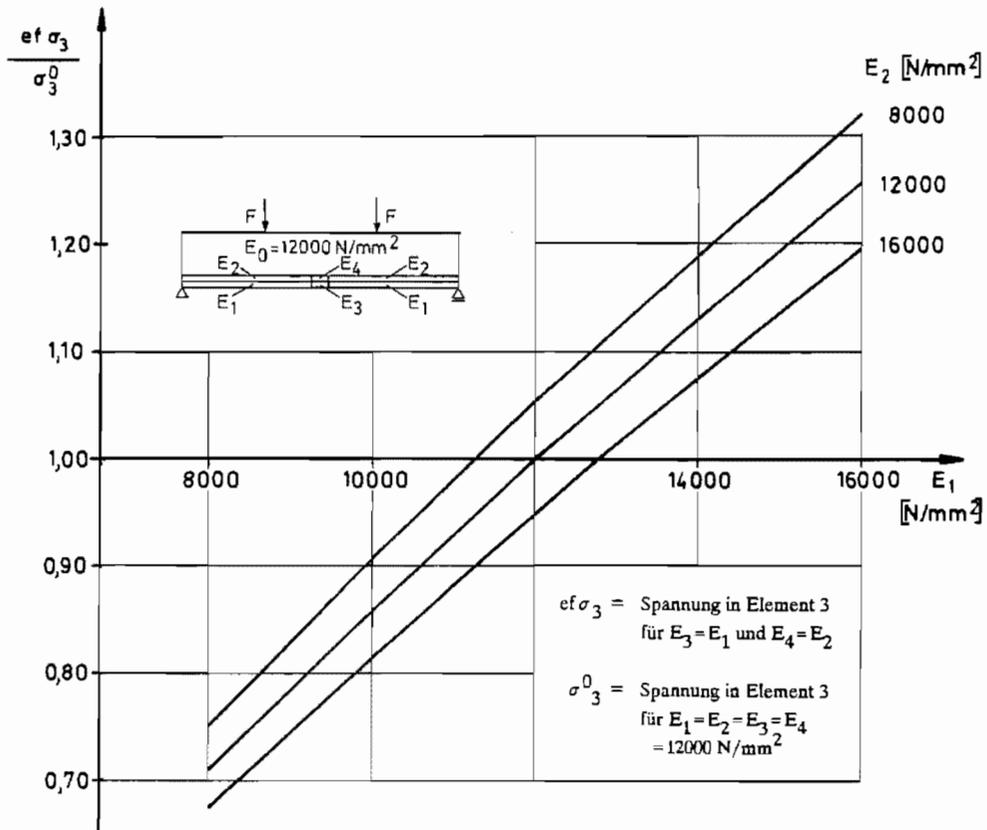


Bild 4.2: Spannung $ef \sigma_3$ (bezogen auf die Spannung σ_3^0) in Element 3 in Abhängigkeit von den Lamellen-Elastizitätsmoduln E_1 und E_2

In Bild 4.2 und 4.3 sind für die Elemente 3 und 4 die Verhältnisse zwischen tatsächlich vorhandener Spannung $ef \sigma_i$ (nach Gl(4.2)) und der nach Gl(4.3) näherungsweise berechneten Spannung σ_i^0 dargestellt. Hierbei wurden alle Spannungen in Elementmitte berechnet, um einen Vergleich mit den Finite Elemente Berechnungen zu ermöglichen.

Das Verhältnis $ef \sigma_4 / \sigma_4^0$ gibt an, in welchem Maß sich die Spannungen in den beiden unteren Lamellen verändern, wenn von dem Fall abgewichen wird, bei dem alle Lamellen den gleichen Elastizitätsmodul besitzen (hier = 12 000 N/mm²).

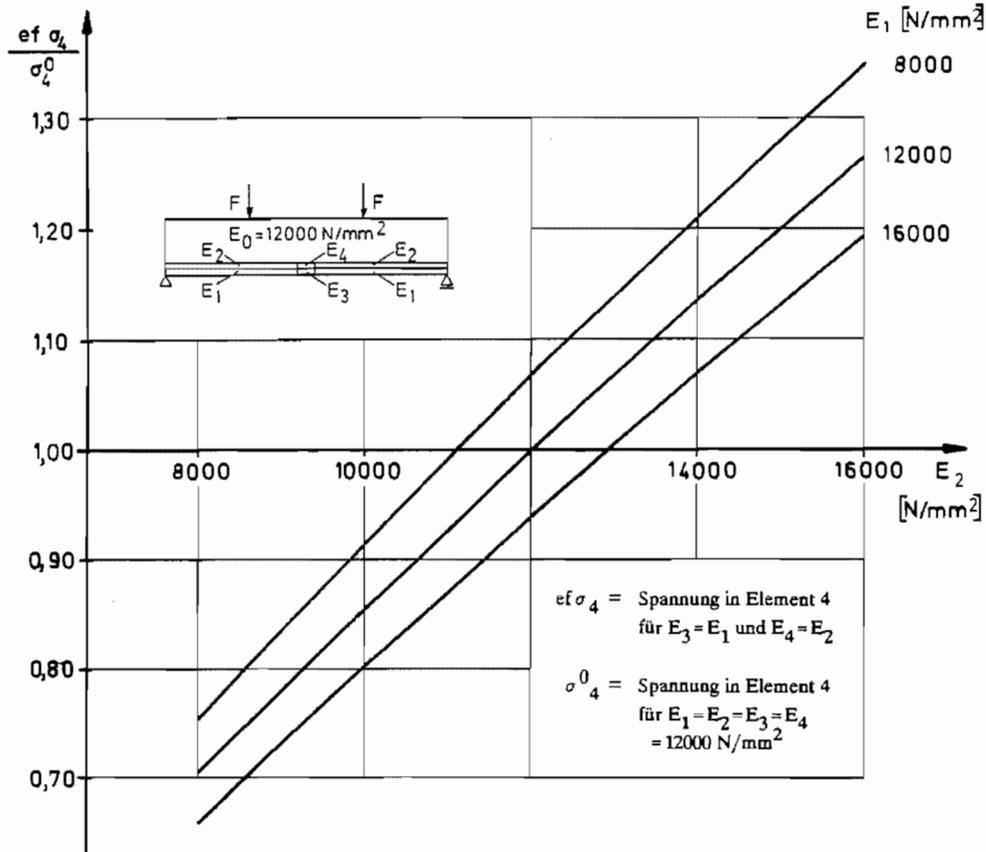


Bild 4.3: Spannung $ef \sigma_4$ (bezogen auf die Spannung σ_4^0) in Element 4 in Abhängigkeit von den Lamellen-Elastizitätsmoduln E_1 und E_2

Aus Bild 4.2 und 4.3 geht deutlich hervor, daß die in einer Lamelle auftretende Spannung mit wachsendem Lamellen - Elastizitätsmodul zunimmt. So ist z.B. aus Bild 4.2 ersichtlich, daß für den Fall $E_1 = E_2 = 16000$ N/mm² die in Element 3 tatsächlich auftretende Spannung etwa 20% höher ist, als dies nach Gl(4.3), d.h. ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Lamellen - Elastizitätsmoduln, erwartet wird.

Weiterhin ist zu erkennen, daß die Spannung in einer Lamelle umso höher ist, je geringer der Elastizitätsmodul der Nachbarlamelle ist. So

ist für den Fall $E_1=16\,000\text{ N/mm}^2$ und $E_2=8\,000\text{ N/mm}^2$ die in Element 3 tatsächlich auftretende Spannung bereits etwa 32% höher als dies nach $Gl(4.3)$ erwartet wird.

Dies zeigt, daß im Falle eines Brettschichtholzträgers, der planmäßig aus Lamellen unterschiedlicher Steifigkeit aufgebaut ist, die Annahme eines homogenen Trägers nicht mehr zutrifft und zu falschen Ergebnissen führen kann.

In vielen Ländern erfolgt die Bemessung von Brettschichtholzträgern jedoch noch mit Hilfe von $Gl(4.3)$, d.h. ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Lamellen - Elastizitätsmoduln. Dies ist aber auch nicht anders möglich, weil der Elastizitätsmodul der Lamellen aufgrund der z.Zt. praktizierten, rein visuellen Holzsortierung nicht bekannt ist.

Im Falle einer maschinellen Holzsortierung, bei der z.B. Bretter mit einem festgelegten Mindest-Elastizitätsmodul zur Verfügung stehen, ist es jedoch unbedingt erforderlich, die auftretenden Spannungen mit Hilfe von $Gl(4.2)$ zu berechnen, wie dies bei Verbundbauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen bereits der Fall ist. Ein willkommener Nebeneffekt wäre hierbei, daß z.B. die Anordnung von Lamellen mit hohem Elastizitätsmodul im Trägeraußenbereich zu einer höheren Biegesteifigkeit führt, die dann auch rechnerisch beim Verformungsnachweis berücksichtigt werden kann.

Ein Vergleich der nach $Gl(4.2)$ und $Gl(4.3)$ berechneten Spannungen mit den Ergebnissen der Finite Elemente Berechnungen ergab Abweichungen, die deutlich unter 1% lagen. Dies bestätigt die in früheren Untersuchungen bereits wiederholt gemachte Feststellung, daß die mit Hilfe von $Gl(4.1)$ berechneten effektiven Biegesteifigkeiten sehr gut mit den in Versuchen ermittelten Biegesteifigkeiten übereinstimmen (siehe z.B. LARSEN [61]), LITTLEFORD [62], MOODY/BOHANNAN [69]).

Somit sind folgende Tendenzen festzuhalten:

- die in einer Lamelle auftretenden Spannungen nehmen mit steigendem Lamellen-Elastizitätsmodul zu (eine steife Lamelle zieht Spannungen an);
- die in einer Lamelle auftretenden Spannungen sind umso höher, je geringer der Elastizitätsmodul der Nachbarlamelle ist (die "schwache" Lamelle gibt Spannungen an den "stärkeren" Nachbarn ab);

- die Berechnung der effektiven Biegesteifigkeit eines Brettschicht-holzträgers kann mit ausreichender Genauigkeit mit Hilfe von $Gl(4.1)$ erfolgen;
- bei Brettschichtholzträgern, die planmäßig aus Lamellen unterschiedlicher Steifigkeit aufgebaut sind, ist eine Berechnung der auftretenden Spannungen in Anlehnung an die Verbundtheorie erforderlich.

4.3 Träger mit nicht konstanten Lamellen-Elastizitätsmoduln

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, wie die Spannungen in den Zellen 3 und 4 von den Elastizitätsmoduln der beiden äußeren Zuglamellen beeinflusst werden. Hierbei wurde davon ausgegangen, daß alle Zellen dieser Lamellen den gleichen Elastizitätsmodul besitzen. In diesem Abschnitt soll nun untersucht werden, inwieweit sich die Spannungen in den Elementen 3 und 4 verändern, wenn deren Elastizitätsmodul von den Elastizitätsmoduln der übrigen Zellen der zugehörigen Lamellen abweicht, d.h. wenn $E_3 \neq E_1$ und $E_4 \neq E_2$.

In diesen Fällen können die Spannungen in den Elementen 3 und 4 nicht mehr so einfach mit Hilfe der elementaren Biegelehre berechnet werden, weil sich die Spannungen in diesem Bereich z.T. auch über Scheibenwirkung verteilen. Die in diesem Abschnitt besprochenen Abhängigkeiten wurden deshalb ausschließlich mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente ermittelt.

In Bild 4.4 und Bild 4.5 sind die in den Elementen 3 und 4 auftretenden Spannungen σ_3 und σ_4 in Abhängigkeit von den Verhältnissen E_3/E_1 und E_4/E_2 der Elastizitätsmoduln dargestellt. Hierbei wurden diese Spannungen auf die nach $Gl(4.2)$ berechneten effektiven Spannungen $ef \sigma_3$ und $ef \sigma_4$ bezogen. Die Verhältniswerte $\sigma_3/ef \sigma_3$ und $\sigma_4/ef \sigma_4$ geben hierbei an, in welchem Maß sich die Spannungen in den Elementen 3 und 4 verändern, wenn der Elastizitätsmodul dieser Zellen vom Elastizitätsmodul der übrigen Zellen der Lamelle abweicht.

Aus Bild 4.4 und 4.5 geht hervor, daß die in einer Zelle auftretende Spannung umso höher ist, je steifer diese Zelle ist. So ist z.B. aus Bild 4.4 ersichtlich, daß die Spannung in Element 3 bei konstantem E_4/E_2 mit steigendem E_3/E_1 zunimmt.

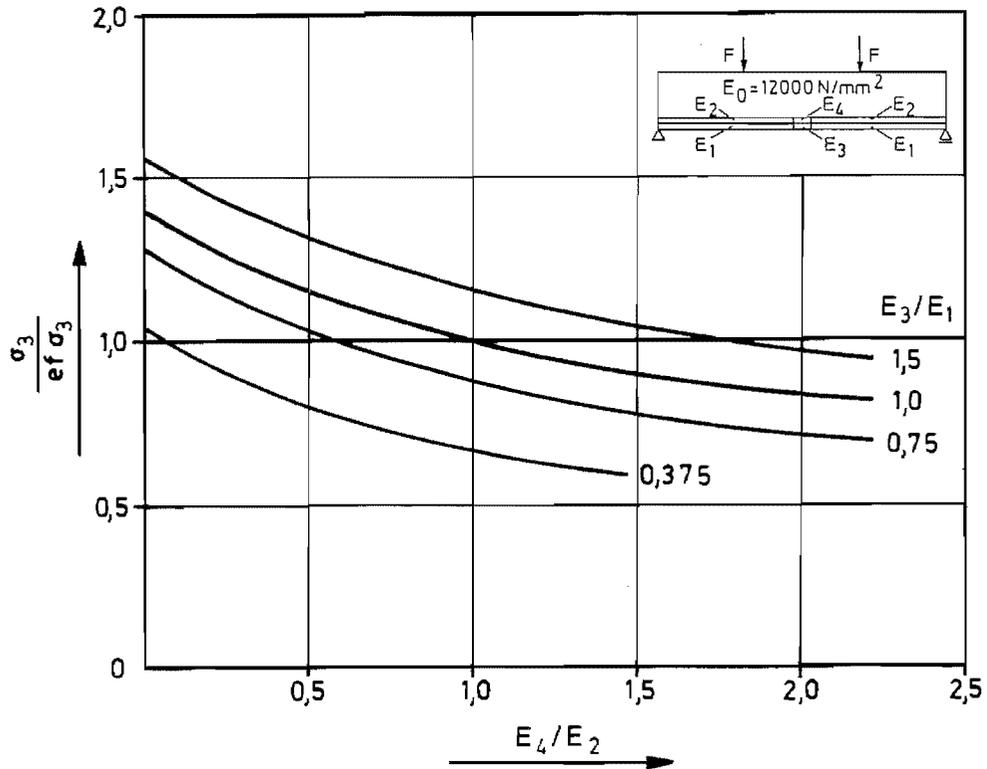


Bild 4.4: Spannung σ_3 in Element 3 (bezogen auf die Spannung $ef \sigma_3$ nach Bild 4.2) in Abhängigkeit von den Verhältnissen E_3/E_1 und E_4/E_2 der Elastizitätsmoduln

Umgekehrt gilt natürlich auch, daß die Spannung in einem Element mit niedrigem Elastizitätsmodul (z.B. Brettabschnitt mit Ast) geringer ist als in einem Element mit hohem Elastizitätsmodul: ein "schwaches" Element gibt Spannungen an die Nachbarelemente ab. Dies ist auf die behinderte Längsdehnung dieses Elementes zurückzuführen. Eine Zelle mit geringer Dehnsteifigkeit will sich stärker verformen als eine Nachbarzelle mit höherer Steifigkeit. Da aber beide miteinander verleimt, d.h. starr miteinander verbunden sind, müssen beide Zellen, zumindest an ihrer Berührungsfuge, die gleichen Dehnungen machen. Die steifere Nachbarzelle wird somit stärker belastet, während die "schwache" Zelle entlastet wird. Das Ganze ist vergleichbar mit zwei parallel geschalteten Federn, bei denen auf die steifere Feder auch der größere Teil der Last entfällt. Diese Entlastung von "weichen" Brettabschnitten infolge der Verleimung der Lamellen wird als sogenannter "Laminierungseffekt" bezeichnet.

Zur Veranschaulichung dieses Laminierungseffektes soll das Beispiel eines Brettabschnittes mit Ast (in der ersten Lamelle) dienen, dessen Elastizitätsmodul infolge der vorhandenen Querschnittsschwächung und der schrägverlaufenden Holzfasern im Vergleich zum Lamellen-Elastizitätsmodul um 25% abgemindert wird, d.h. $E_3/E_1 = 0,75$. Liegt über diesem Element eine Zelle, deren Elastizitätsmodul dem der zweiten Lamelle entspricht ($E_4/E_2 = 1$), so ergibt sich aus *Bild 4.4*, daß die Spannung σ_3 in Element 3 nur etwa 88% der Spannung $e\sigma_3$ entspricht, die sich nach *Gl(4.2)* für $E_3/E_1 = 1$ ergibt. Die Zelle 3 wird somit zu 12% entlastet.

Berechnet man also die Spannung in dieser Zelle mit Hilfe von *Gl(4.2)*, so weist man dieser Zelle eine höhere Spannung zu, als dies tatsächlich der Fall ist. Bei einer rechnerischen effektiven Spannung, die der Zugfestigkeit dieses Elementes entspricht, ist diese in Wirklichkeit noch nicht erreicht. Die Last kann noch weiter gesteigert werden, so daß sich im Vergleich zur Zugfestigkeit dieses Elementes eine um 12% höhere Biegefestigkeit des Brettschichtholzträgers ergibt.

Dieser Laminierungseffekt, d.h. die rechnerische Tragfähigkeitssteigerung infolge der Verleimung der Lamellen ist umso ausgeprägter, je geringer der Elastizitätsmodul der betrachteten Zelle ist. Dies bedeutet, daß bei einem hochwertigem Brett, bei dem keine oder nur kleine Äste vorhanden sind, kaum mit einem Laminierungseffekt zu rechnen ist, weil in diesem Fall der Elastizitätsmodul der Brettabschnitte aufgrund der auftretenden Äste nur geringfügig abgemindert wird, d.h. $E_3/E_1 = 1$. Dies bedeutet aber auch, daß im Falle von Keilzinkenverbindungen ebenfalls kein Laminierungseffekt vorhanden ist, weil, wie in *Abschnitt 3.1* bereits beschrieben, der Elastizitätsmodul einer Keilzinkenverbindung mit dem des fehlerfreien Holzes vergleichbar ist.

Bei Brettschichtholzträgern, die aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen, dürfte somit die Biegefestigkeit dieser Träger in etwa der Zugfestigkeit der versagenden Keilzinkenverbindung entsprechen¹. Diese Tendenz wurde auch von den Versuchen und den Simulationsrechnungen von EHLBECK/COLLING [32] bestätigt.

¹ Diese Aussage trifft jedoch nur zu, wenn die Zugfestigkeit unter Aufbringung eines ebenen Verformungszustandes ermittelt wurde (siehe hierzu auch *Abschnitt 5.1.5.1 und 5.1.6.1*).

Die Entlastung eines Elementes ist aber unweigerlich mit einer zusätzlichen Belastung des Nachbarelementes verbunden. So ergibt sich für den o.a. Fall ($E_3/E_1 = 0,75$ und $E_4/E_2 = 1$) aus *Bild 4.5*, daß die Spannung in Element 4 infolge des "weicheren" Nachbarelementes um etwa 8% ansteigt. Handelt es sich bei Zelle 4 um einen fehlerfreien Brettabschnitt, so kann diese zusätzliche Belastung ohne weiteres aufgenommen werden. Handelt es sich jedoch um eine Keilzinkenverbindung mit hoher Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Festigkeit, so kann jede Mehrbelastung dieser Zelle eine Abnahme des Tragvermögens des Brettschichtholzträgers bedeuten.

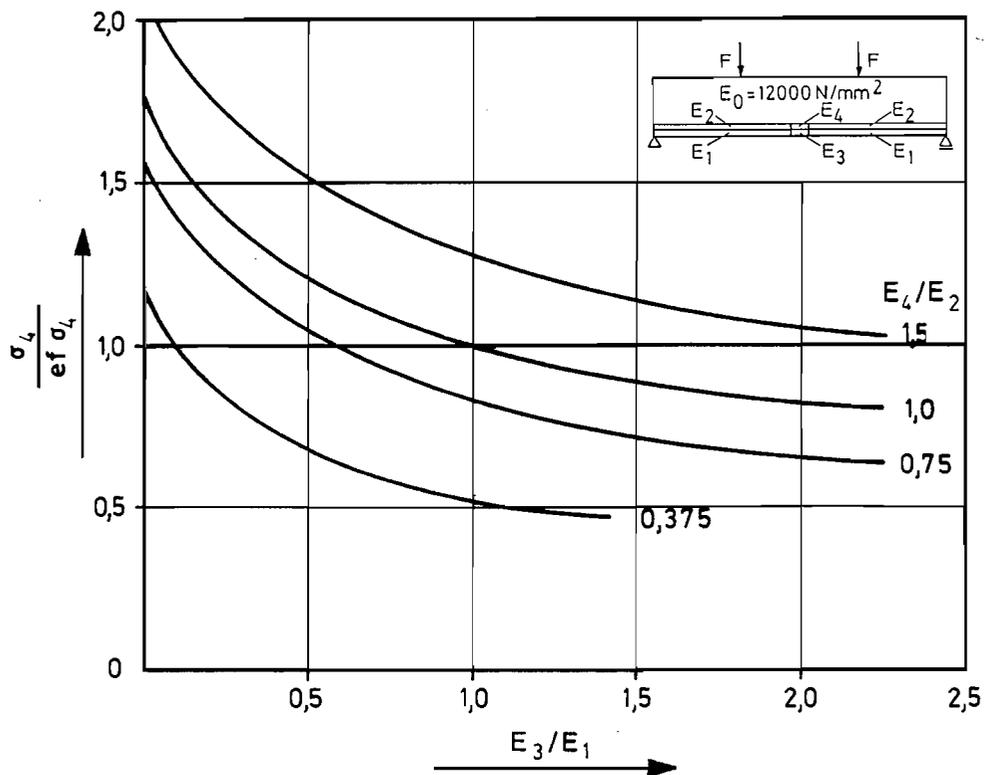


Bild 4.5: Spannung σ_4 in Element 4 (bezogen auf die Spannung $ef \sigma_4$ nach *Bild 4.3*) in Abhängigkeit von den Verhältnissen E_3/E_1 und E_4/E_2 der Elastizitätsmoduln

Der Fall einer Keilzinkenverbindung mit einem unmittelbar darüber- oder darunterliegenden Ast ist somit "gefährlicher" als zwei übereinanderliegende Keilzinkenverbindungen, bei denen keine der beiden Keilzinkenverbindungen eine Mehrbelastung erfährt (siehe hierzu auch *Anhang A3*).

Bei dem in *Kapitel 5* beschriebenen Rechenmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern ist das zugrunde gelegte Bruchkriterium von großer Bedeutung. Dieses Bruchkriterium soll bestimmen, wann das endgültige Versagen des Brettschichtholzträgers erreicht ist. Bei den bisherigen Simulationsrechnungen wurde hierbei wiederholt festgestellt, daß nach Ausfall eines Elementes in der Zugzone² das Nachbarelement die daraus resultierende Mehrbelastung nicht aufnehmen kann und bei der gleichen Laststufe ebenfalls versagt. Der Grund hierfür ist ebenfalls aus *Bild 4.4 und 4.5* ersichtlich.

So ergibt sich z.B. aus *Bild 4.4*, daß die Spannung in der ersten Lamelle (bei $E_3/E_1 = 1$) um etwa 40% ansteigt, wenn in der zweiten Lamelle ein Element ausfällt ($E_4/E_2 = 0$). Fällt hingegen in der ersten Lamelle eine Zelle aus ($E_3/E_1 = 0$), so steigt die Spannung im darüberliegenden Element um etwa 80% (bei $E_4/E_2 = 1$)! Eine so hohe zusätzliche Belastung kann nur von einer Zelle mit sehr hoher Festigkeit aufgenommen werden, also z.B. von einem fehlerfreien Brettabschnitt.

In diesem Abschnitt wurde untersucht, inwieweit sich die Spannungen in den Elementen 3 und 4 verändern, wenn sich deren Elastizitätsmodul von dem der übrigen Zellen der zugehörigen Lamelle unterscheidet. Hierbei wurden folgende Tendenzen festgestellt, die im wesentlichen mit denen des vorherigen Abschnittes übereinstimmen :

- ein steifes Element zieht Spannungen an;
- ein "weiches" Element gibt Spannungen an die Nachbarelemente ab (Laminierungseffekt);
- im Falle einer Keilzinkenverbindung ist aufgrund ihrer hohen Steifigkeit kein Laminierungseffekt vorhanden;
- nach Ausfall eines Elementes entstehen im Nachbarelement sehr hohe Zusatzspannungen, die nur von Zellen mit hoher Festigkeit aufgenommen werden können.

Ziel der hier gemachten Ausführungen war es, das Tragverhalten von Brettabschnitten in einem Brettschichtholzträger zu veranschaulichen und die qualitativen Aussagen (Tendenzen) mit Hilfe eines vorgegebenen Trägers zahlenmäßig zu unterlegen. Hierbei ist zu

² Der Ausfall eines Elementes bedeutet, daß dieses Element zur Kraftübertragung nicht mehr zur Verfügung steht. In einem Finite Elemente Programm kann dies berücksichtigt werden, in dem z.B. der Elastizitätsmodul dieser Zelle zu Null gesetzt wird (siehe hierzu auch *Abschnitt 5.2.1 und 5.2.2*).

berücksichtigen, daß die zahlenmäßige Darstellung der hier beschriebenen Finite Elemente Berechnungen (*Bild 4.2 bis 4.5*) nur für den in *Bild 4.1* dargestellten Träger gültig ist.

Trotz dieser Einschränkung konnten einige wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die nicht nur dazu beitragen, das Tragverhalten von Brettabschnitten in einem Brettschichtholzträger besser zu verstehen, sondern die auch ein besseres Verständnis für das Tragverhalten des Brettschichtholzträgers selbst ermöglichen.

5 Das Rechenmodell

Im Jahre 1980 stellten FOSCHI/BARRETT [39] ein Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern vor. In diesem Modell wird jede Lamelle in Brettabschnitte - nachfolgend als "Zelle" bezeichnet - mit einer Länge von 150 mm unterteilt. Jeder dieser Zellen wurde nach zufälligen Gesichtspunkten Holzeigenschaften (Rohdichte, Ästigkeit, Elastizitätsmodul und Festigkeit) zugewiesen. Die Berücksichtigung von streuenden Holzeigenschaften ermöglichte Berechnungen nach Art der Monte Carlo Simulationen. Die Berechnung der Tragfähigkeit dieser Träger erfolgte dann mit Hilfe eines Finite Elemente Programmes.

Das Modell von *Foschi/Barrett* ging hierbei u.a. von folgenden Vereinfachungen aus:

- linear-elastische Arbeitslinie des Holzes bis zum Bruch, d.h. das nicht-lineare Tragverhalten unter Druckbeanspruchung wurde nicht berücksichtigt;
- die Tragfähigkeit eines Brettschichtholzträgers war dann erreicht, wenn die Festigkeit der schwächsten Zelle überschritten wurde (weakest link failure). Mit diesem Spröbruchkriterium konnten somit keine möglichen Laststeigerungen nach Ausfall einer Zelle berücksichtigt werden;
- die zufällige Zuordnung der Holzeigenschaften erfolgte ohne Berücksichtigung der durch das Wachstum eines Baumes bedingten Regelmäßigkeiten (Autokorrelation der Rohdichte oder der Ästigkeitsverteilung innerhalb eines Brettes);
- die Zuweisung der Festigkeitseigenschaften jeder Zelle erfolgte auf der Grundlage von Versuchen mit Brettabschnitten, deren Länge deutlich über der gewählten Zellenlänge von 150 mm lag;
- aufgrund fehlender Versuchsdaten konnten die Keilzinkenverbindungen nicht berücksichtigt werden!

Das Modell von *Foschi/Barrett* gab den Anstoß zur Entwicklung eines Rechenmodells auf der Grundlage der Finiten Elemente, bei dem auf die o.a. Vereinfachungen verzichtet werden konnte. Die Grundversion dieses Rechenmodells wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens (EHLBECK et al. [28]) entwickelt und in den darauffolgenden Jahren ständig verbessert.

Das Rechenmodell besteht aus zwei Computerprogrammen - einem Simulationsprogramm und einem Finite Elemente Programm - und wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.1 Das Simulationsprogramm

Die Aufgabe des Simulationsprogrammes ist es, den Trägeraufbau eines Brettschichtholzträgers zu simulieren, angefangen von der Lage der Keilzinkenverbindungen bis hin zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften jeder Zelle.

5.1.1 Lage der Keilzinkenverbindungen

Die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern wird maßgeblich von der Qualität der Keilzinkenverbindungen beeinflusst. Daher ist es auch von Bedeutung zu wissen, wie oft eine Keilzinkenverbindung im hochbeanspruchten Bereich eines Brettschichtholzträgers auftritt.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens (EHLBECK/COLLING [34]) wurden die in Brettschichtholzträgern tatsächlich vorhandenen Abstände zwischen den Keilzinkenverbindungen stichprobenartig bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind am Beispiel von zwei Leimbaubetrieben in Bild 5.1 und 5.2 dargestellt.

Aus diesen Bildern geht hervor, daß die in einem Brettschichtholzträger auftretenden Brettlängen (=Keilzinkenabstände) in zwei Gruppen eingeteilt werden können:

- die erste Gruppe besteht aus Brettern, die vom gelieferten Brettstapel aus praktisch ungekürzt in den Brettschichtholzträger eingebaut werden, während
- die zweite Gruppe aus kürzeren Brettstücken besteht, die durch das Herausschneiden von Fehlstellen (vor allem Ästen) entstehen.

Der prozentuale Anteil dieser beiden Gruppen hängt hierbei sowohl von der Güte des Ausgangsmaterials als auch von der jeweiligen Gütesortierpraxis in den Leimbaubetrieben ab. So überwiegte bei Firma A der Anteil der ungekürzten Bretter (etwa 70% aller Bretter), während bei Firma B nur etwa 15% ungekürzte Bretter eingebaut wurden.

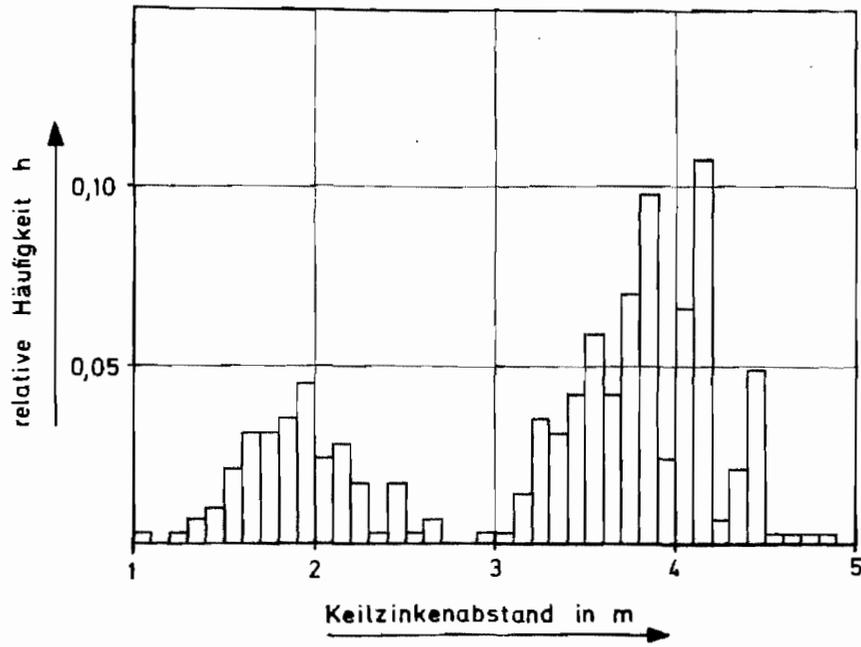


Bild 5.1: Gemessene Abstände zwischen Keilzinkenverbindungen;
Firma A

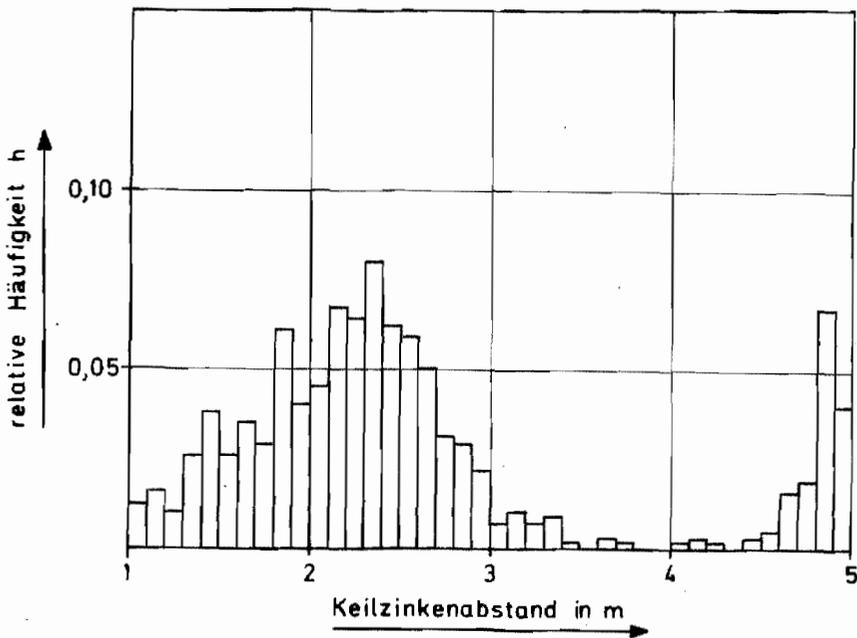


Bild 5.2: Gemessene Abstände zwischen Keilzinkenverbindungen;
Firma B

Hieraus wird deutlich, daß es kaum möglich ist, eine für alle Leimbaubetriebe gültige statistische Verteilung der Keilzinkenabstände anzugeben. Weiterhin deutet dies darauf hin, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern von Leimbaubetrieb zu Leimbaubetrieb variieren kann, und zwar nicht nur aufgrund unterschiedlicher Keilzinkenfestigkeiten, sondern auch aufgrund der z.T. stark unterschiedlichen Auftretenshäufigkeiten der Keilzinkenverbindungen.

Im Rahmen des Rechenmodells ist es möglich, sowohl den prozentualen Anteil der gekappten bzw. nicht gekappten Bretter als auch die Verteilungen der zugehörigen Brettlängen zu variieren (siehe hierzu auch *Abschnitt 5.1.7*).

Für jede zu simulierende Lamelle wird aus diesen Verteilungen mit Hilfe eines Zufallsgenerators so oft eine Brettlänge gewählt, bis das Lamellenende erreicht ist. Die Lage der Keilzinkenverbindungen liegt somit vor der Simulation der Holzeigenschaften fest.

5.1.2 Zuordnung der Holzfeuchte

Wie bereits angedeutet, sollen im Rahmen dieser Arbeit charakteristische Festigkeitswerte für Brettschichtholz in Abhängigkeit von den beeinflussenden Faktoren ermittelt werden, die als Grundlage zur Festlegung von Festigkeitsklassen für Brettschichtholz dienen können. Im Entwurf zum *Eurocode 5* sind die charakteristischen Festigkeits- und Verformungskennwerte für Holz als 5%-Fraktile der Grundgesamtheit definiert und gelten für eine Einwirkungsdauer von 3-5 Minuten bei einer Temperatur von $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $65\pm 5\%$. Diese vorgesehenen Werte entsprechen somit der Kurzzeitfestigkeit im Normklima (20/65), bei dem sich im Holz eine Ausgleichsfeuchte von etwa 12% einstellt. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit jeder Zelle eine konstante Holzfeuchte von $u = 12\%$ zugewiesen.

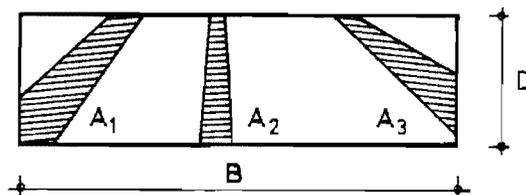
Für Fälle, in denen vom angenommenen Normklima abgewichen wird, werden die Auswirkungen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in *Anhang A2* abgeschätzt.

5.1.3 Zuordnung der Rohdichte

GLOS [43] ermittelte für das in den Leimbaubetrieben verarbeitete Schmittholz eine mittlere Darr-Rohdichte von 430 kg/m^3 bei einer Standardabweichung von 50 kg/m^3 . Diese Werte wurden in der Zwischenzeit auch von eigenen Untersuchungen (vgl. COLLING/GÖRLACHER [23]) wiederholt bestätigt. Aus dieser Verteilung wird jedem Brett eine beliebige Rohdichte zugewiesen, die für alle Zellen dieses Brettes als konstant angenommen wird. Die Vernachlässigung der Schwankung der Rohdichte in Brett längsrichtung erscheint gerechtfertigt, da bei den Simulationsrechnungen der Einfluß der Rohdichtestreuung innerhalb eines Brettes durch die Streuung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften überdeckt wird.

5.1.4 Zuordnung der Ästigkeit

COLLING/DINORT [21] untersuchten die Ästigkeit des in den Leimbaubetrieben verwendeten Schmittholzes. Bei diesen Untersuchungen wurde als Maß für die Ästigkeit der sogenannte KAR-Wert (Knot Area Ratio) nach den Richtlinien der ECE [8] verwendet. Dieser KAR-Wert entspricht dem Verhältnis der auf den Brettquerschnitt projizierten Astfläche zur Bruttoquerschnittsfläche, wobei sich der gesamte KAR-Wert aus der Summe aller in einem Querschnitt vorhandenen Äste ergibt (vgl. *Bild 5.3*). Hierbei wurden alle Äste, die innerhalb eines 150 mm Brettabschnittes auftraten, zu einem KAR-Wert zusammengefaßt, so wie dies in *DIN 4074* und den *ECE*-Regeln vorgesehen ist.



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

Bild 5.3: Berechnung des KAR-Wertes

Die Untersuchungen von *Colling/Dinort* zeigten, daß die Äste in einem Brett nicht rein zufällig verteilt sind, sondern daß die Ästigkeitsverteilung in Brettlängsrichtung gewisse Regelmäßigkeiten aufweist, die auf das Wachstum des Baumes zurückzuführen sind.

So zeigte sich z.B., daß die Äste in zwei Gruppen eingeteilt werden können:

- die erste Gruppe besteht aus Ästen, die einen Durchmesser aufweisen, der für das jeweilige Brett charakteristisch ist. Diese Äste, die in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen auftreten, werden nachfolgend als Hauptäste bezeichnet;
- die zweite Gruppe besteht aus sogenannten Füllästen, die einen deutlich geringeren Durchmesser aufweisen als die Hauptäste. Auch kann das Auftreten dieser Fülläste als eher zufällig bezeichnet werden.

Zunächst wurden von jedem Brett die Abstände zwischen den Hauptästen gemessen. Dieser Abstand, auch Astquirlabstand genannt, stellt einen für das Wachstum des Baumes charakteristischen Wert dar. In *Bild 5.4* ist die ermittelte Häufigkeitsverteilung der Hauptastabstände dargestellt.

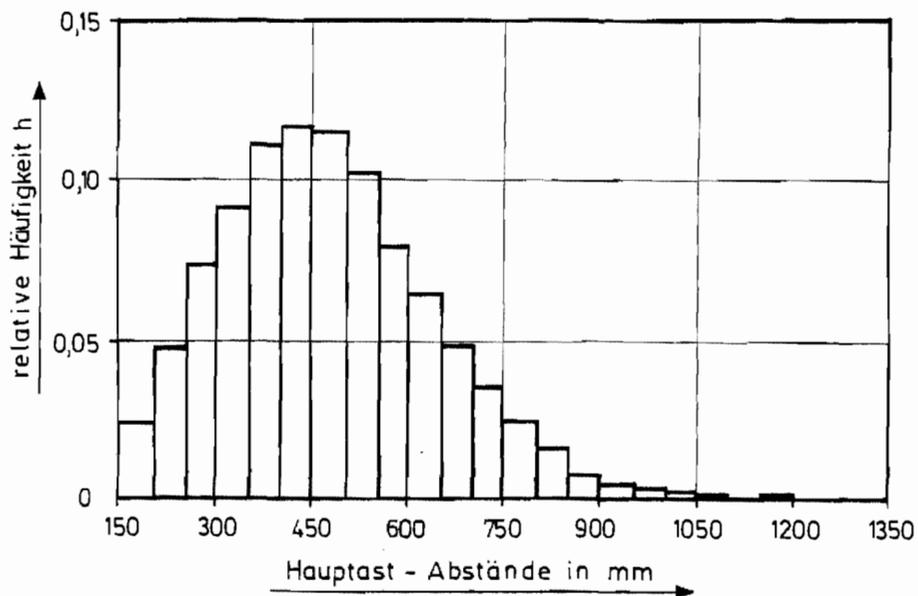


Bild 5.4: Häufigkeitsverteilung der Hauptastabstände

Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß im Mittel alle 45 cm ein Hauptast auftritt. Innerhalb eines Brettes schwankten die Abstände zwischen den Hauptästen um den für das jeweilige Brett charakteristischen Astquirlabstand. Detailliertere Angaben über die Grenzen, in denen diese Werte schwankten, sind in [34] zu finden.

Im Rahmen des Simulationsprogrammes wird nun für jedes Brett ein charakteristischer Hauptabstand aus der Verteilung nach *Bild 5.4* gewählt, um den die simulierten Abstände zwischen den Hauptästen eines Brettes schwanken. Somit sind für jedes Brett die Stellen festgelegt, an denen ein oder mehrere Hauptäste auftreten, wobei Zellen, in denen kein Ast auftritt, den KAR-Wert 0 besitzen.

Bei den o.a. Untersuchungen zeigte sich, daß nicht nur der Abstand zwischen den Hauptästen einen für das Wachstum des Baumes charakteristischen Wert darstellt, sondern daß auch die Durchmesser der in einem Brett auftretenden Hauptäste um einen mittleren Wert schwanken. Dieser mittlere Hauptast - Durchmesser geteilt durch die Brettbreite ergibt den charakteristischen KAR-Wert eines Brettes für den Fall eines durchgehenden Astes (vgl. A_2 nach *Bild 5.3*). In *Bild 5.5* ist die Häufigkeitsverteilung dieses mittleren, charakteristischen KAR-Wertes dargestellt.

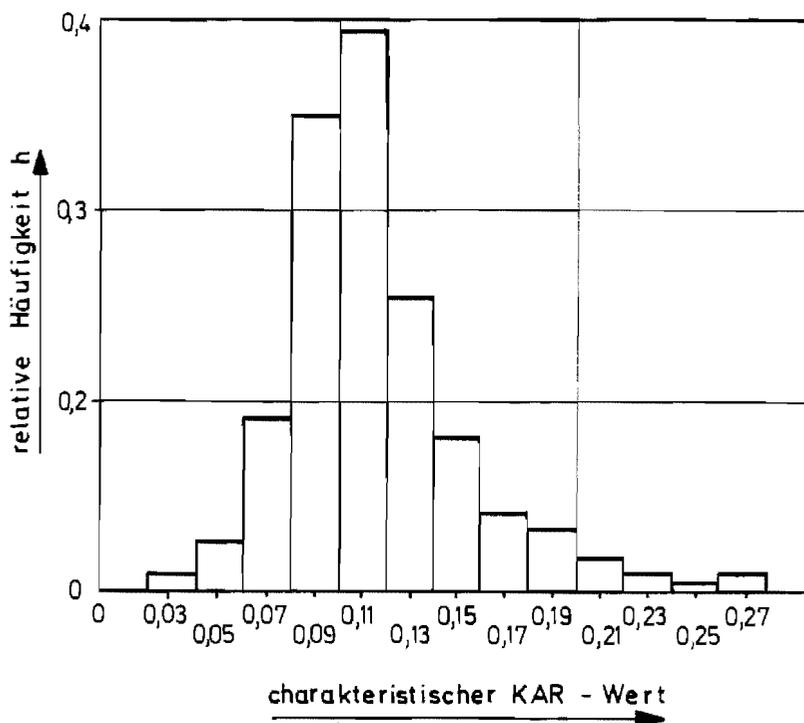


Bild 5.5: Häufigkeitsverteilung des charakteristischen KAR-Wertes

Da ein solcher Hauptast einzeln oder in Gruppen auftreten kann, wird jeder astbehafteten Zelle ein Vielfaches dieses charakteristischen KAR-Wertes zugewiesen. Da aber nicht jeder Astdurchmesser mit dem des charakteristischen Astes identisch ist, und nicht alle Äste durchgehen, sondern z.T. auch seitlich austreten, ist das Vielfache nur in seltenen Fällen ein runder Zahlenwert, sondern ebenfalls statistisch verteilt. In *Bild 5.6* sind die ermittelten Verteilungen des Vielfachen für die Fälle von Einzelästen und Astansammlungen mit jeweils zwei bzw. drei Ästen angegeben.

Der simulierte KAR-Wert einer Zelle ergibt sich somit aus dem charakteristischen KAR-Wert des Brettes multipliziert mit einem zufällig gewählten Wert des Vielfachen. Bei der Wahl dieses Vielfachen wird berücksichtigt, daß die Auftretenswahrscheinlichkeit von Einzel- oder Gruppenästen von der Größe des charakteristischen KAR-Wertes abhängig ist. So ist z.B. die Wahrscheinlichkeit, daß ein großer charakteristischer Ast als Dreifachast auftritt, deutlich geringer als bei einem kleinen Ast.

Somit sind für jedes Brett sowohl die Lage der Hauptäste als auch deren KAR-Werte festgelegt. In einem abschließenden Schritt werden noch die o.a. Fülläste nach zufälligen Gesichtspunkten über die Brettlänge verteilt.

In *Bild 5.7* ist die Ästigkeitsverteilung, die sich nach dem oben beschriebenen Simulationsverfahren ergibt, der von *Colling/Dinort* ermittelten Häufigkeitsverteilung gegenübergestellt. In diesem Bild ist dargestellt, wie oft ein bestimmter KAR-Wert in einem 15cm-Brettabschnitt auftritt. So treten z.B. in 2/3 aller Fälle nahezu fehlerfreie Brettabschnitte mit $KAR \leq 0,05$ auf. Diese Tendenz ergibt sich auch anhand der in *Bild 5.4* angegebenen Verteilung der Hauptastabstände : ein mittlerer Hauptastabstand von etwa 45 cm bedeutet, daß bei einer Zellenlänge von 15 cm etwa in jeder 3. Zelle ein Hauptast auftritt. Der Vergleich zwischen der simulierten und der gemessenen Ästigkeitsverteilung zeigt hierbei eine sehr gute Übereinstimmung.

Aufgrund der o.a. Untersuchungen ist es somit möglich, die Ästigkeit in Brettlängsrichtung unter Berücksichtigung der durch das Wachstum des Baumes bedingten Regelmäßigkeiten wirklichkeitsnah zu simulieren.

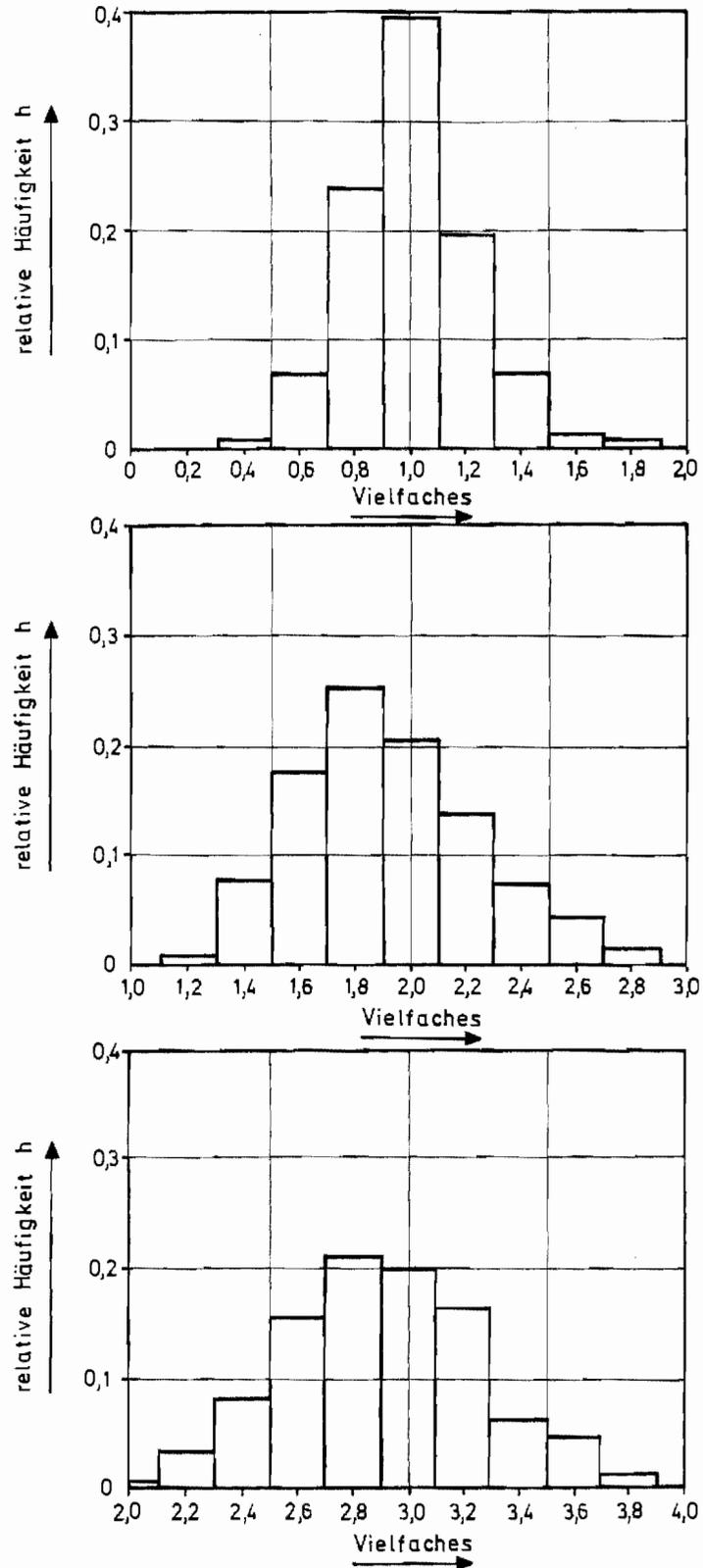


Bild 5.6: Häufigkeitsverteilungen der Vielfachen des charakteristischen KAR-Wertes

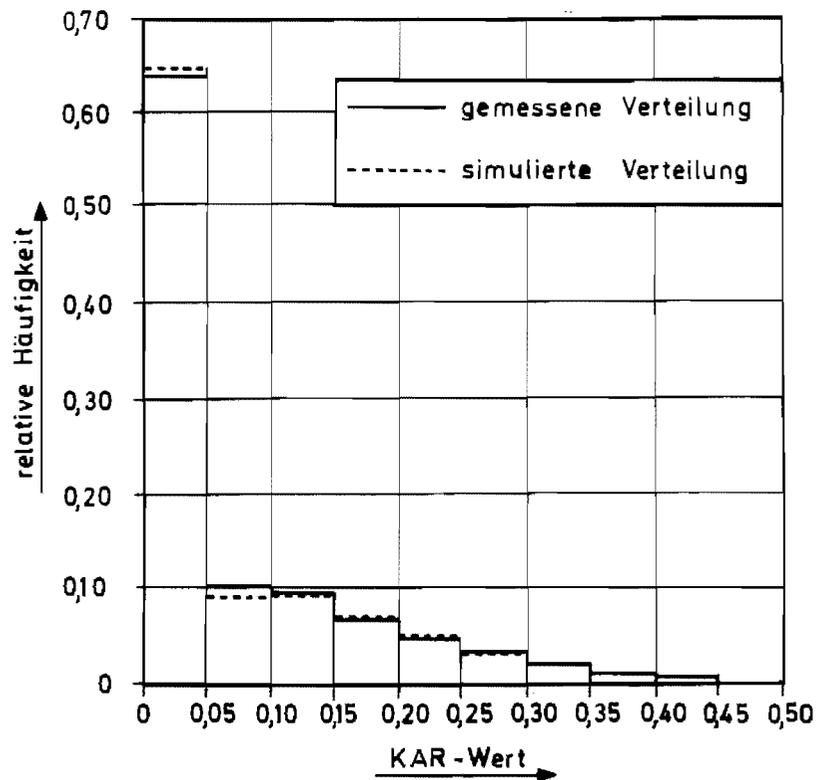


Bild 5.7: Vergleich zwischen simulierter und ermittelter Häufigkeitsverteilung der KAR-Werte

5.1.5 Bestimmung des Zellen-Elastizitätsmoduls

5.1.5.1 Nicht keilgezinkte Brettabschnitte

Nachdem die Rohdichte und die Ästigkeit jeder Zelle bekannt sind, kann der Elastizitätsmodul mit Hilfe der folgenden Regressionsgleichungen (s. auch EHLBECK et al. [29]) berechnet werden:

$$\ln(E_Z) = 8,20 + 3,13 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 1,17 \cdot \text{KAR} \quad (5.1)$$

mit $R = 0,77$ und $s_R = 0,180$

und

$$\ln(E_D) = 8,22 + 2,994 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 0,76 \cdot \text{KAR} \quad (5.2)$$

mit $R = 0,80$ und $s_R = 0,142$.

Hierin bedeuten

- E_Z, E_D = Zug- bzw. Druck-Elastizitätsmodul in N/mm^2 ,
 ρ_0 = Darr-Rohdichte in kg/m^3 ,
 KAR = KAR-Wert nach *Abschnitt 5.1.4*,
 R = Korrelationskoeffizient,
 s_R = Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung).

Diese Regressionsgleichungen wurden in München im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 96 anhand von zahlreichen Zug- und Druckversuchen ermittelt (siehe GLOS [43], HEIMESHOFF/GLOS [46]) und gelten für eine Holzfeuchte von 12%. Bei diesen Untersuchungen wurde das Tragverhalten von 137,5 mm langen Brettabschnitten untersucht, was in etwa der hier 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 [7] 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 [31] und LARSEN [61]).

Die nach Gl.(5.1) bzw. Gl.(5.2) berechneten Werte entsprechen den mittleren Elastizitätsmoduln, die unter Vorgabe der Rohdichte und des KAR-Wertes zu erwarten sind. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß zwei Zellen mit gleicher Rohdichte und Ästigkeit unterschiedliche Steifigkeitseigenschaften besitzen können, muß jedem berechneten Elastizitätsmodul noch ein Wert aus der noch verbleibenden Reststreuung hinzugezählt werden.

Untersuchungen von COLLING/SCHERBERGER [22] zeigten, daß die Streuung des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes deutlich geringer ist, als die Reststreuung s_R der allgemeinen Regressionsgeraden, die für das gesamte Holzangebot gilt. Dies ist wiederum auf die Wuchsregelmäßigkeit eines Baumes zurückzuführen.

Diese Untersuchungen zeigten weiterhin, daß in einem Brett die Elastizitätsmoduln 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 das Mittel sein.

Die gesamte Reststreuung s_R kann somit in zwei Anteile aufgeteilt werden:

- einem Abstand Δ_B des Brettes von der Regressionsgeraden, und
- einer geringeren Reststreuung $s_{R,B}$ des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes.

Diese Tendenz ist in Bild 5.8 qualitativ dargestellt.

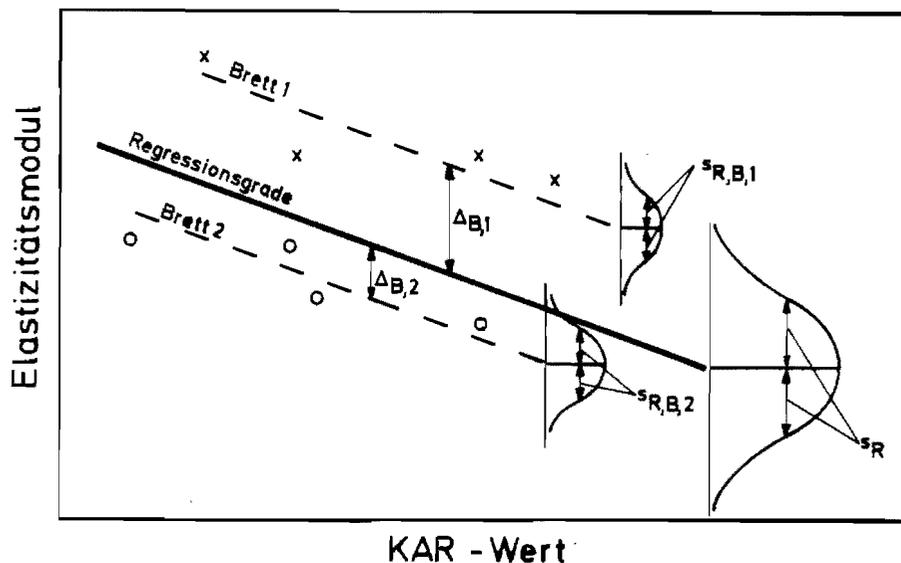


Bild 5.8: Aufteilung der gesamten Reststreuung s_R

Eingehendere Untersuchungen von GÖRLACHER [45] über den Elastizitätsmodul ergaben, daß Δ_B als normalverteilt angenommen werden kann mit dem Mittelwert 0 und der Standardabweichung 0,16. Die Reststreuung $s_{R,B}$ des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes ergab sich im Mittel zu 0,079 bei einer Standardabweichung von 0,027, was deutlich unter dem Wert der gesamten Reststreuung von $s_R = 0,18$ in *Gl(5.1)* liegt.

Im Rahmen des Simulationsprogrammes wird der Zellen-Elastizitätsmodul wie folgt bestimmt:

- 1 für jedes Brett wird ein zufälliger Abstand Δ_B aus der Normalverteilung $NV(0; 0,16)$ gewählt,
- 2 für jedes Brett wird eine Reststreuung $s_{R,B}$ aus der Normalverteilung $NV(0,079; 0,027)$ gewählt,
- 3 für jede Zelle wird der zu erwartende Elastizitätsmodul $E_{Reg,i}$ mit Hilfe der zugehörigen Regressionsgleichung bestimmt,
- 4 für jede Zelle eines Brettes wird ein zufälliger Streuwert X_i aus der unter Punkt 2 gewählten Reststreuung gewählt ($NV(0; s_{R,B})$),
- 5 der Zellen-Elastizitätsmodul E_i kann dann mit Hilfe von folgender Beziehung berechnet werden

$$\ln(E_i) = \ln(E_{Reg,i}) + \Delta_B + X_i. \quad (5.3)$$

Im Rahmen des Simulationsprogrammes werden somit bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls sowohl die streuenden Werkstoffkennwerte als auch die wachstumsbedingten Regelmäßigkeiten berücksichtigt.

5.1.5.2 Keilgezinkte Brettabschnitte

Der Elastizitätsmodul einer Zelle, in der eine Keilzinkenverbindung auftritt, kann mit Hilfe der folgenden Regressionsgleichungen (siehe auch EHLBECK et al. [29]) bestimmt werden:

$$\ln(E_{Z,KZV}) = 8,407 + 2,630 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,\min} \quad (5.4)$$

$$\text{Mit } R = 0,64 \text{ und } s_R = 0,135$$

und

$$\ln(E_{D,KZV}) = 8,282 + 2,53 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,\min} \quad (5.5)$$

$$\text{mit } R = 0,56 \text{ und } s_R = 0,231$$

Hierin bedeuten

$E_{Z,KZV}$ = Zug- bzw. Druckelastizitätsmodul einer Keilzinkenverbindung in N/mm^2 ,

$E_{D,KZV}$

$\rho_{0,\min}$ = kleinerer Wert der Darr-Rohdichten der beiden Stoßhälften in kg/m^3 ,

R = Korrelationskoeffizient,

s_R = Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung).

Diese Regressionsgleichungen gelten wiederum für Brettabschnitte mit einer Länge von etwa 150 mm und einer Holzfeuchte von 12%. In diesen Regressionsgleichungen wird berücksichtigt, daß die Tragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung von der "schwächeren" der beiden Stoßhälften bestimmt wird (siehe hierzu auch *Abschnitt 3.1*).

Im Rahmen des Simulationsprogrammes wird der Elastizitätsmodul einer Keilzinkenverbindung wie folgt bestimmt:

- 1 für jede Keilzinkenverbindung wird der erwartete Elastizitätsmodul $E_{\text{Reg},i}$ mit Hilfe der zugehörigen Regressionsgleichung bestimmt,
- 2 für jede Keilzinkenverbindung wird aus der zugehörigen Reststreuung ($NV(0;s_R)$) ein Streuwert X_i gewählt,
- 3 der Elastizitätsmodul der Keilzinkenverbindung ergibt sich dann zu

$$\ln(E_{\text{KZV},i}) = \ln(E_{\text{Reg},i}) + X_i \quad (5.6)$$

5.1.6 Bestimmung der Zellen-Festigkeit

5.1.6.1 Nicht keilgezinkte Brettabschnitte

Ist die Ästigkeit, die Rohdichte und/oder der Elastizitätsmodul jeder Zelle bekannt, so kann die zugehörige Festigkeit auf der Grundlage der folgenden Regressionsgleichungen erfolgen:

$$\ln(f_Z) = -4,22 + \ln(E_Z) \cdot (0,876 - 0,093 \cdot \text{KAR}) \quad (5.7)$$

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

und

$$\ln(f_D) = 2,586 + 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 0,825 \cdot \text{KAR} \quad (5.8)$$

mit $R = 0,94$ und $s_R = 0,088$.

Hierin bedeuten

- f_Z, f_D = Zug- bzw. Druckfestigkeit in N/mm^2 ,
- E_Z = Zug-Elastizitätsmodul in N/mm^2 ,
- ρ_0 = Darr-Rohdichte in kg/m^3 ,
- KAR = KAR-Wert nach *Abschnitt 5.1.4*,
- R = Korrelationskoeffizient,
- s_R = Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung).

Diese Regressionsgleichungen wurden anhand derselben Versuche ermittelt, die zur Bestimmung des Zellen-Elastizitätsmoduls dienen (vgl. *Abschnitt 5.1.5.1*).

Die Frage, ob bei der Festigkeit ebenfalls eine geringere Reststreuung innerhalb eines Brettes vorhanden ist, wurde im Rahmen eines z.Zt. noch laufenden Forschungsvorhabens¹ untersucht.

Da die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in der Hauptsache von den äußeren Zuglamellen bestimmt wird, war vor allem die Streuung der Zugfestigkeit von Interesse. Hierzu 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. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit mit den bisher durchgeführten Untersuchungen, wurden diese Versuche ebenfalls in München unter Leitung von *Prof. Glos* durchgeführt.

Von jedem Versuchskörper wurde neben der Zugfestigkeit $f_{Z, \text{Versuch}}$ noch der KAR-Wert, die Darr-Rohdichte und der Zug-Elastizitätsmodul bestimmt. Mit diesen Angaben konnte die zu erwartende Zugfestigkeit $f_{Z, \text{Reg.}}$ mit Hilfe von *Gl(5.7)* berechnet werden. Die Differenz zwischen tatsächlicher und erwarteter Zugfestigkeit ist ein Maß für die noch verbleibende Reststreuung. Da bei den Simulationsrechnungen logarithmische Regressionsgleichungen verwendet wurden, wurde von jedem Versuchskörper die Differenz $\ln(f_{Z, \text{Versuch}}) - \ln(f_{Z, \text{Reg.}})$ gebildet. In *Bild 5.9* ist die zugehörige Häufigkeitsverteilung dargestellt.

Aus diesen Versuchen ergab sich 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(5.7)*).

¹ Ehlbeck, J.; Colling, F.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen im Hinblick auf Normungsvorschläge. Forschungsvorhaben der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau der Universität Karlsruhe.

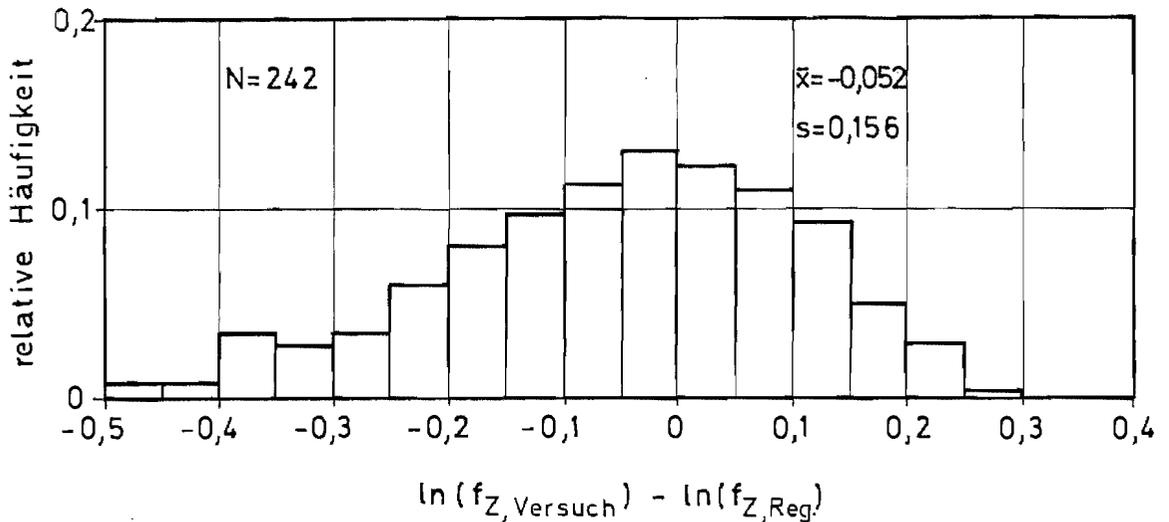


Bild 5.9: Häufigkeitsverteilung der Differenz $\ln(f_{Z,Versuch}) - \ln(f_{Z,Reg.})$ (=gesamte Reststreuung)

Weiterhin wurde in Anlehnung an *Abschnitt 5.1.5.1* und *Bild 5.8* 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 5.10* ist die Häufigkeitsverteilung dieser Abstände dargestellt.

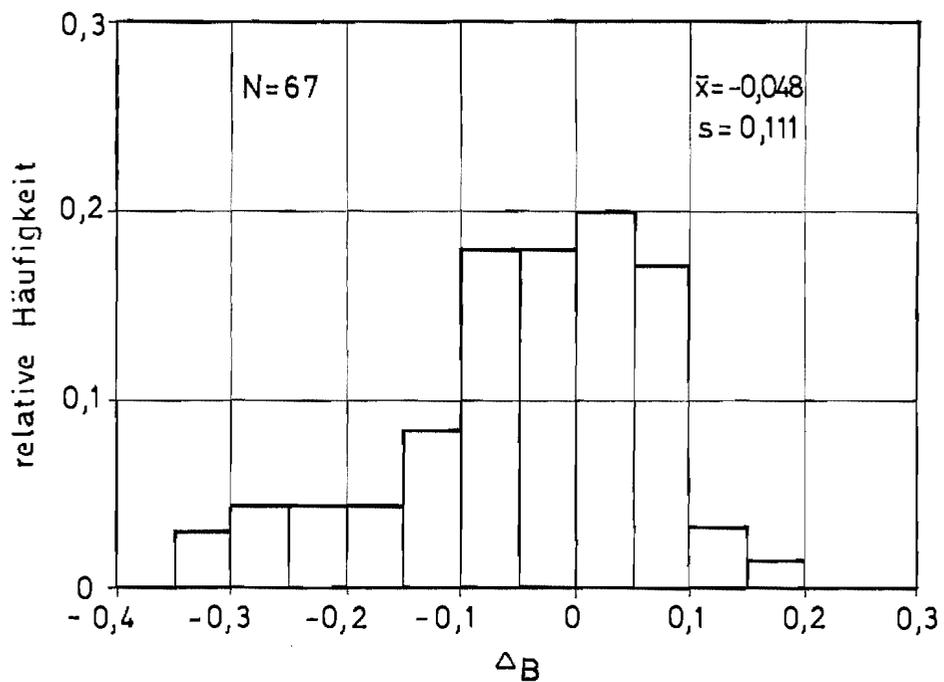


Bild 5.10: Häufigkeitsverteilung des Abstandes Δ_B eines Brettes von der Regressionsgeraden

Die Streuung der Einzelwerte um diese um das Maß Δ_B verschobenen Regressionsgeraden entspricht der Reststreuung $s_{R,B}$ der Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes. Während bei den Untersuchungen von *Görlacher* (s. *Abschnitt 5.1.5.1*) 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 ein mittlerer "Brettanstand" 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:

$$s_R^2 = \Delta_B^2 + s_{R,B}^2 \quad (5.9)$$

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, wurde bei den Simulationsrechnungen die Zugfestigkeit der Zellen weiterhin mit der in *Gl(5.7)* angegebenen Regressionsgleichung und der zugehörigen Reststreuung berechnet. Die Aufteilung dieser gesamten Reststreuung in die beiden o.a. Anteile erfolgte dabei unter der Annahme, daß auch hier etwa 70% der gesamten Reststreuung vom "Brettanstand" Δ_B erklärt werden können. Somit wurde 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.

Ein Vergleich dieser Reststreuung innerhalb eines Brettes mit der in Gl(5.7) angegebenen gesamten Reststreuung der Regressionsgeraden ($s_R = 0,187$) zeigt, daß sich diese beiden Werte nicht so stark voneinander unterscheiden, wie dies beim Elastizitätsmodul der Fall ist. Dies kann damit erklärt werden, daß das Astbild, d.h. die Anordnung der Äste (Mittenast oder Randast) mit den zugehörigen Faserabweichungen, auf die Zugfestigkeit einen größeren Einfluß ausübt als auf den Zugelastizitätsmodul. Da aber das Astbild in keiner Regressionsgleichung berücksichtigt wird, spiegelt sich dieser Einfluß in einer größeren Reststreuung der Festigkeit innerhalb eines Brettes wieder.

Im Rahmen des Simulationsprogrammes wird die Zellen-Zugfestigkeit 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 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 zu

$$\ln(f_i) = \ln(f_{Reg,i}) + \Delta_B + X_i \quad (5.10)$$

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

Da die beiden Kenngrößen Δ_B und $s_{R,B}$ dieser Regelmäßigkeit anhand einer Stichprobe von "nur" 242 Zugproben aus 67 Brettern ermittelt wurden, wird in *Anhang A1* untersucht, wie groß der Einfluß dieser beiden Kenngrößen auf die berechnete Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern ist. Mit Hilfe dieser Berechnungen kann somit abgeschätzt werden, wie groß der "Fehler" ist, den man mit "falschen" Werten für Δ_B und $s_{R,B}$ begeht.

Die Bestimmung der Zellen-Druckfestigkeit hingegen erfolgt ausschließlich mit Hilfe von Gl(5.8) und der gesamten Reststreuung der Regressionsgleichung. Aufgrund des vergleichsweise geringen Einflusses, den der Druckbereich von Brettschichtholzträgern auf deren Biegefestigkeit ausübt, erscheint diese Vereinfachung gerechtfertigt.

5.1.6.2 Keilgezinkte Brettabschnitte

Die Festigkeit einer Zelle, in der eine Keilzinkenverbindung auftritt, kann mit Hilfe der folgenden Regressionsgleichungen bestimmt werden:

$$\ln(f_{Z,KZV}) = 2,72 + 6,14 \cdot 10^{-5} \cdot E_{Z,KZV} \quad (5.11)$$

mit $R = 0,58$ und $s_R = 0,195$

und

$$\ln(f_{D,KZV}) = -3,05 + 0,66 \cdot \ln(E_{D,KZV}) + 9,85 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_0 \quad (5.12)$$

mit $R = 0,92$ und $s_R = 0,116$.

Hierin bedeuten

- $f_{Z,KZV}$ = Zug- bzw. Druckfestigkeit einer Keilzinkenverbindung in N/mm^2 ,
- $f_{D,KZV}$ = Zug- bzw. Druckelastizitätsmodul in N/mm^2 nach Abschnitt 5.1.5.2,
- $E_{Z,KZV}$ = Zug- bzw. Druckelastizitätsmodul in N/mm^2 nach Abschnitt 5.1.5.2,
- $E_{D,KZV}$ = kleinerer Wert der Darr-Rohdichten der beiden Stoßhälften in kg/m^3 ,
- $\rho_{0,min}$ = kleinerer Wert der Darr-Rohdichten der beiden Stoßhälften in kg/m^3 ,
- R = Korrelationskoeffizient,
- s_R = Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung).

Die Versuche zur Bestimmung der $GI(5.11)$ wurden im Rahmen eines von EHLBECK et al. [29] bearbeiteten Forschungsvorhabens ebenfalls in München durchgeführt und gelten wiederum für etwa 150 mm lange Brettabschnitte mit einer Holzfeuchte von $u=12\%$. Die Tatsache, daß das Versagen in den meisten Fällen von der "schwächeren" der beiden Stoßhälften ausgeht, wird in diesen Regressionsgleichungen berücksichtigt.

Im Rahmen des Simulationsprogrammes wird die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung wie folgt bestimmt:

- 1 für jede Keilzinkenverbindung wird die erwartete Festigkeit $f_{Reg,i}$ mit Hilfe der zugehörigen Regressionsgleichung berechnet,
- 2 für jede Keilzinkenverbindung wird aus der zugehörigen Reststreuung ($NV(0;s_R)$) ein Streuwert X_i gewählt,
- 3 die Festigkeit $f_{KZV,i}$ der Keilzinkenverbindung ergibt sich dann zu

$$\ln(f_{KZV,i}) = \ln(f_{Reg,i}) + X_i \quad (5.13)$$

5.1.7 Variationsmöglichkeiten

Nach Abschluß der in den *Abschnitten 5.1.1 bis 5.1.6.2* beschriebenen Simulationen sind alle benötigten Eigenschaften der Zellen eines *beliebigen* Brettschichtholzträgers bekannt. Somit kann die Berechnung der Tragfähigkeit dieses Trägers mit Hilfe des in *Abschnitt 5.2* beschriebenen Finite Elemente Programmes erfolgen.

Im Rahmen des Simulationsprogrammes ist es jedoch nicht nur möglich, beliebig zusammengesetzte Brettschichtholzträger zu simulieren, sondern es können auch bestimmte Kriterien vorgegeben werden, die dann von den simulierten Zellen, Brettern oder Lamellen zu erfüllen sind.

So ist es z.B. möglich, die Tragfähigkeit von Versuchsträgern, von denen einige Eigenschaften bekannt sind, rechnerisch abzuschätzen. Das Simulationsprogramm ermöglicht hierzu Angaben über folgende Eigenschaften:

- Lage der Keilzinkenverbindungen. Wird in einer Lamelle die Lage von mehreren Keilzinkenverbindungen vorgeschrieben, so ist hiermit auch die Länge der dazwischen liegenden Bretter vorgegeben. Auf eine zufällige Anordnung der Keilzinkenverbindungen nach *Abschnitt 5.1.1* kann somit verzichtet werden;
- Rohdichte von Brettern. Für die Bretter mit vorgegebener Rohdichte entfällt somit die Zuordnung einer beliebigen Rohdichte nach *Abschnitt 5.1.3*;
- Ästigkeitsverteilung von Brettern. Durch die Angabe der KAR-Werte eines Brettes erübrigt sich die Zuordnung der Ästigkeit nach *Abschnitt 5.1.4*;
- Elastizitätsmodul von Brettern. In Analogie zur Gesamt-Federsteifigkeit von mehreren hintereinandergeschalteten Federn unterschiedlicher Steifigkeit, wird im Rahmen des Simulationsprogrammes der Brettelastizitätsmodul mit Hilfe von folgender Gleichung berechnet:

$$E_{\text{Brett}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i}} \quad (5.14)$$

Hierbei entsprechen N der Anzahl der Zellen des Brettes und E_i den Zellen - Elastizitätsmoduln. Sind der vorgeschriebene und der

berechnete Brett - Elastizitätsmodul innerhalb eines gewissen Toleranzbereiches (der ebenfalls frei wählbar ist) gleich, so kann mit der Simulation des nächsten Brettes fortgefahren werden. Ist dies jedoch nicht der Fall, so wird für dieses Brett die Zuordnung der Zellen - Elastizitätsmoduln nach *Abschnitt 5.1.5* solange wiederholt, bis der geforderte Brett - Elastizitätsmodul erreicht wird.

Weiterhin ist es möglich, folgende Forderungen an die Lamellen zu stellen, die dann von den zugehörigen Brettern einzuhalten sind:

- Rohdichte der Lamellen. Die nach *Abschnitt 5.1.3* simulierten Brett-Rohdichten müssen diesem geforderten Wert innerhalb eines festzulegenden Toleranzbereiches entsprechen;
- Elastizitätsmodul einer Lamelle. Die nach *Gl(5.14)* berechneten Brett-Elastizitätsmoduln müssen diesen geforderten Wert wiederum innerhalb eines Toleranzbereiches erreichen;
- Höchstwert für die KAR-Werte einer Lamelle. Von sämtlichen KAR-Werten einer Lamelle darf keiner diesen Grenzwert überschreiten, andernfalls ist die Simulation der Ästigkeit nach *Abschnitt 5.1.4* solange zu wiederholen, bis diese Forderung erfüllt wird;
- Mindestwert für die KAR-Werte einer Lamelle. Von den KAR-Werten jedes Brettes muß mindestens einer diesen Grenzwert überschreiten, andernfalls muß die Ästigkeitssimulation wiederholt werden. Die Angabe dieses Wertes ist dann sinnvoll, wenn man einen "schlechteren" Brettschichtholzträger simulieren will. Die gleichzeitige Angabe eines Kleinst- und eines Größtwertes für die Ästigkeit ermöglicht die Festlegung eines Toleranzbereiches für den größten KAR-Wert eines Brettes;
- Mindestfestigkeit einer Lamelle. Von den simulierten Zellen-Festigkeiten darf keine diesen Mindestwert unterschreiten, andernfalls muß die Simulation der Festigkeitseigenschaften nach *Abschnitt 5.1.6* wiederholt werden. Durch die Angabe einer Mindestfestigkeit kann eine mögliche Probelastung der Bretter bzw. Lamellen berücksichtigt werden.

Mit Hilfe dieser Angaben ist es möglich, sowohl den Einfluß unterschiedlicher Arten der Holzsortierung - visuell, maschinell und kombiniert visuell/maschinell - als auch den Einfluß unterschiedlicher Grenzwerte der Sortierung auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern zu untersuchen.

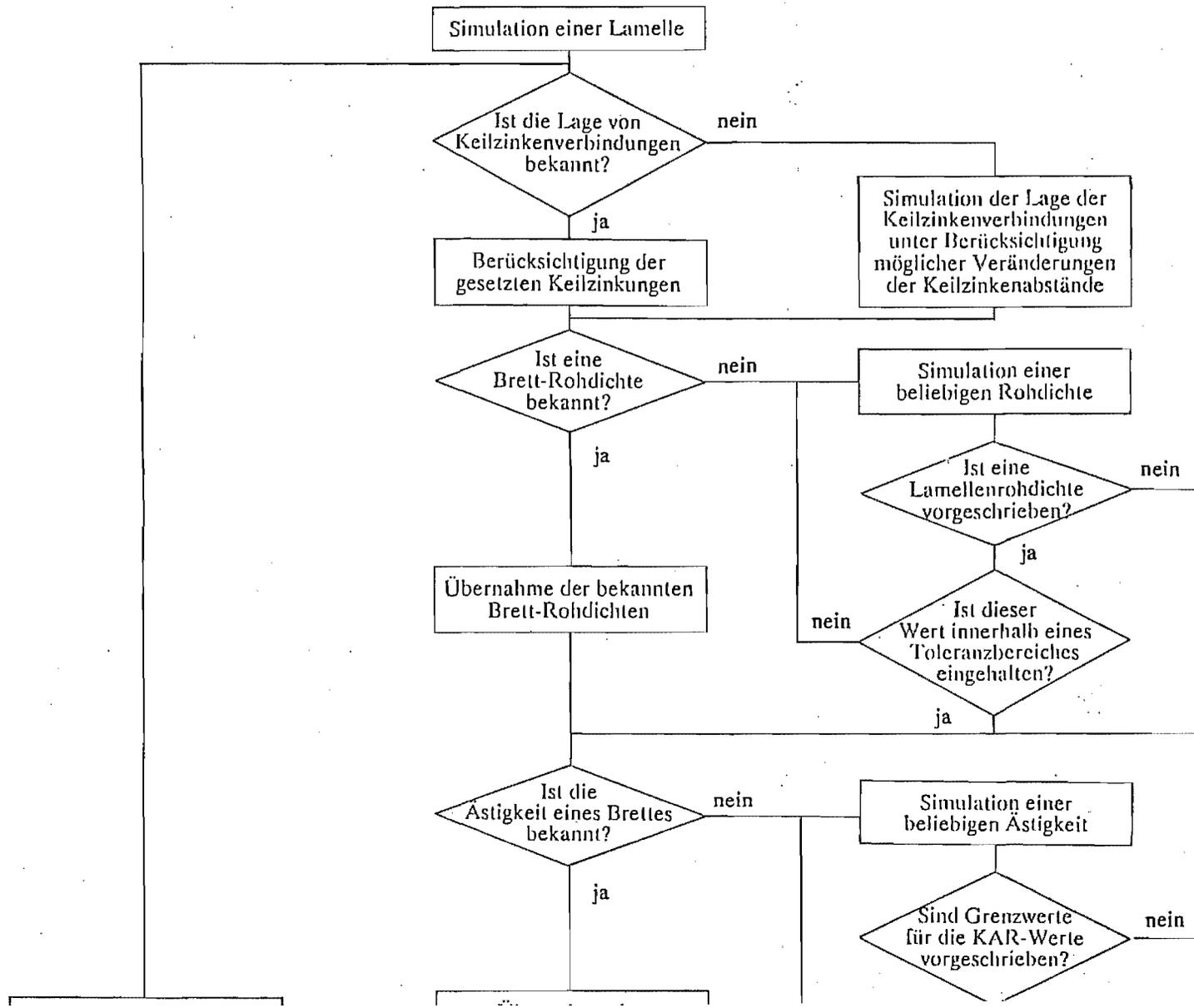
Weiterhin kann der prozentuale Anteil der gekürzten bzw. nicht gekürzten Bretter in einem Brettschichtholzträger und die zugehörigen Verteilungen der Brettlängen variiert werden (siehe hierzu auch *Abschnitt 5.1.1*). Mit Hilfe dieser Variationsmöglichkeit kann z.B. der Einfluß der Auftretenshäufigkeit von Keilzinkenverbindungen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern abgeschätzt werden.

Auch ist es möglich, die Festigkeit der simulierten Keilzinkenverbindungen zu modifizieren. Diese Variation der Keilzinkenfestigkeit erfolgt über die Angabe eines Faktors $k_{\text{Fest.}}$, mit dem die nach *Abschnitt 5.1.6.2* berechneten Werte multipliziert werden. Ein Wert $k_{\text{Fest.}} = 1,1$ bewirkt somit, daß 10% höhere Keilzinkenfestigkeiten simuliert werden, als dies normalerweise der Fall ist. Zusätzlich kann die Reststreuung s_R der Regressionsgleichung mit Hilfe eines Faktors $k_{\text{Streu.}}$ variiert werden ($k_{\text{Streu.}} = 0,8$ bedeutet 20% geringere Reststreuung). Mit Hilfe von diesen Variationsmöglichkeiten können somit die Auswirkungen von möglichen Veränderungen der Keilzinkenqualität auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern untersucht werden.

In *Bild 5.11* ist das Simulationsprogramm in Form eines Flußdiagrammes dargestellt.

5.2 Das Finite Elemente Programm

Aufgrund der zu erwartenden großen Anzahl an Simulationsrechnungen und in Anbetracht des großen Rechenaufwandes eines Finite Elemente (FE-) Programmes, erschien es nicht sinnvoll, das von EHLBECK et al. [28] entwickelte FE-programm auf einem Universalrechner (z.B. Siemens S7881 oder IBM 3090) laufen zu lassen. Vielmehr wurde daran gedacht, die Simulationsrechnungen auf dem Anfang 1989 im Karlsruher Rechenzentrum installierten Vektorrechner VP 400-EX durchführen zu lassen, der als z.Zt. weltweit schnellster Monoprozessor gilt. Hierbei zeigte sich jedoch, daß die Fähigkeiten eines Vektorrechners nur dann sinnvoll genutzt werden können, wenn seine "Vorlieben" für große, dicht gepackte Vektoren und spaltenweises Arbeiten von Feldern bereits bei der Programmierung berücksichtigt werden. Dies war aber bei dem vorhandenen FE-programm nicht der Fall.



104

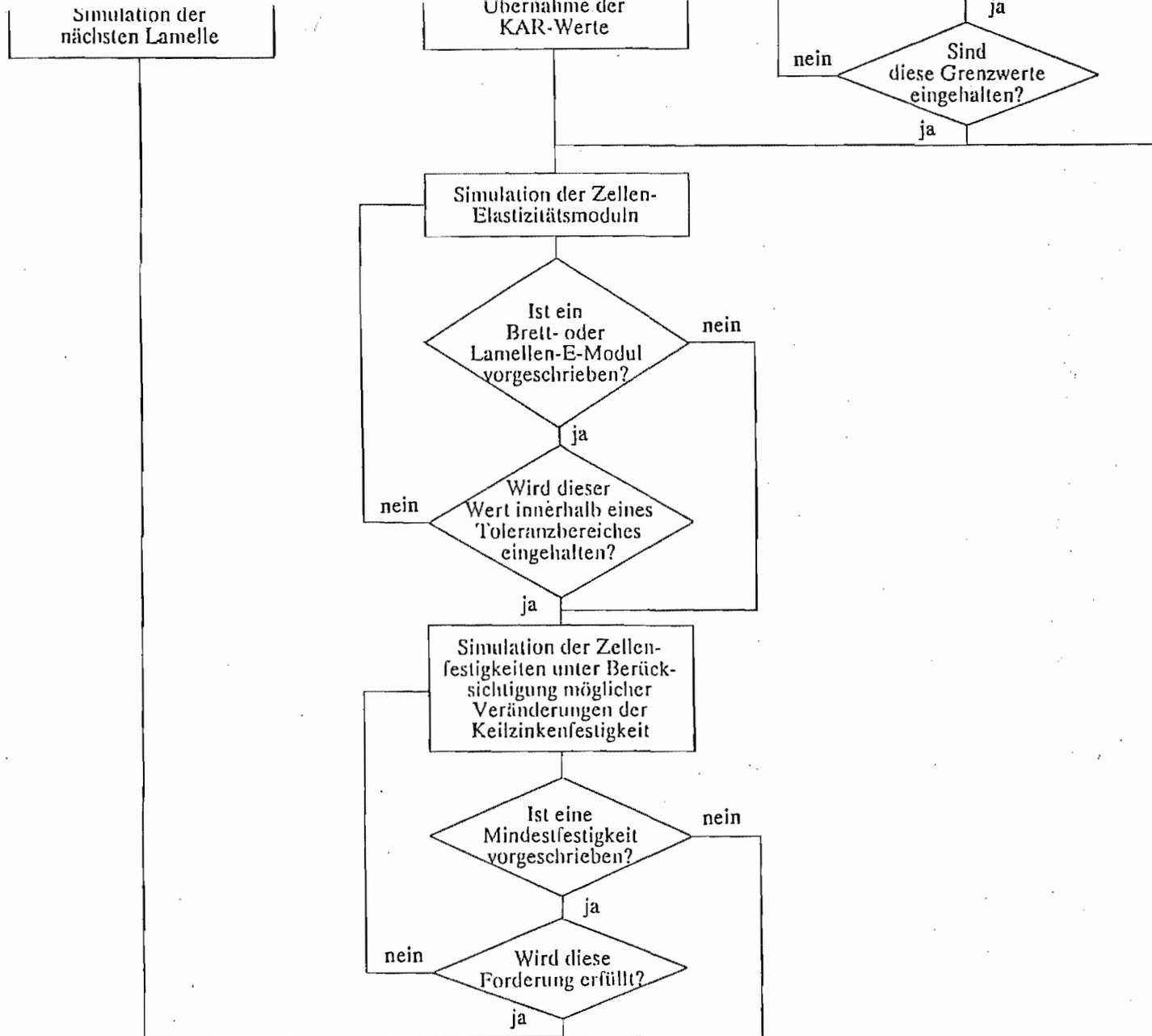


Bild 5.11: Flußdiagramm des Simulationsprogrammes

105

Als Lösung des Problem es bot sich das voll vektorisierte, lineare FE-Kernprogramm VECFEM an, das von der Abteilung "Numerikforschung für Supercomputer" des Karlsruher Rechenzentrums entwickelt wurde. In Zusammenarbeit mit dieser Abteilung wurde das FE-Kernprogramm so aufbereitet, daß das nicht-lineare Tragverhalten des Holzes unter Druckbeanspruchung und die mögliche Laststeigerung nach Ausfall einer Zelle im Zugbereich berücksichtigt werden konnte.

5.2.1 Nichtlineares Tragverhalten des Holzes unter Druckbeanspruchung

Für das Tragverhalten eines Brettabschnittes unter Druckbeanspruchung wurde die in Bild 5.12 dargestellte ideal - elastisch/ideal - plastische Arbeitslinie zugrunde gelegt. Hierbei entsprechen f_D der Druckfestigkeit, ϵ_D der Bruchstauchung und E_D dem Druck-Elastizitätsmodul einer Zelle.

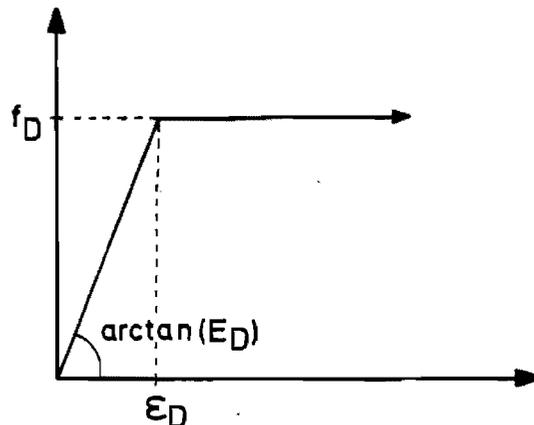


Bild 5.12: Arbeitslinie einer Zelle unter Druckbeanspruchung

Die Berücksichtigung des nichtlinearen Tragverhaltens unter Druckbeanspruchung im Rahmen des FE-programmes wird nachfolgend beschrieben.

Nach Eingabe der Trägergeometrie, der Werkstoffkennwerte (Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften jeder Zelle) sowie der

Auflagerbedingungen werden die Spannungen in jedem Element (Zelle) für eine vergleichsweise geringe Anfangsbelastung berechnet.

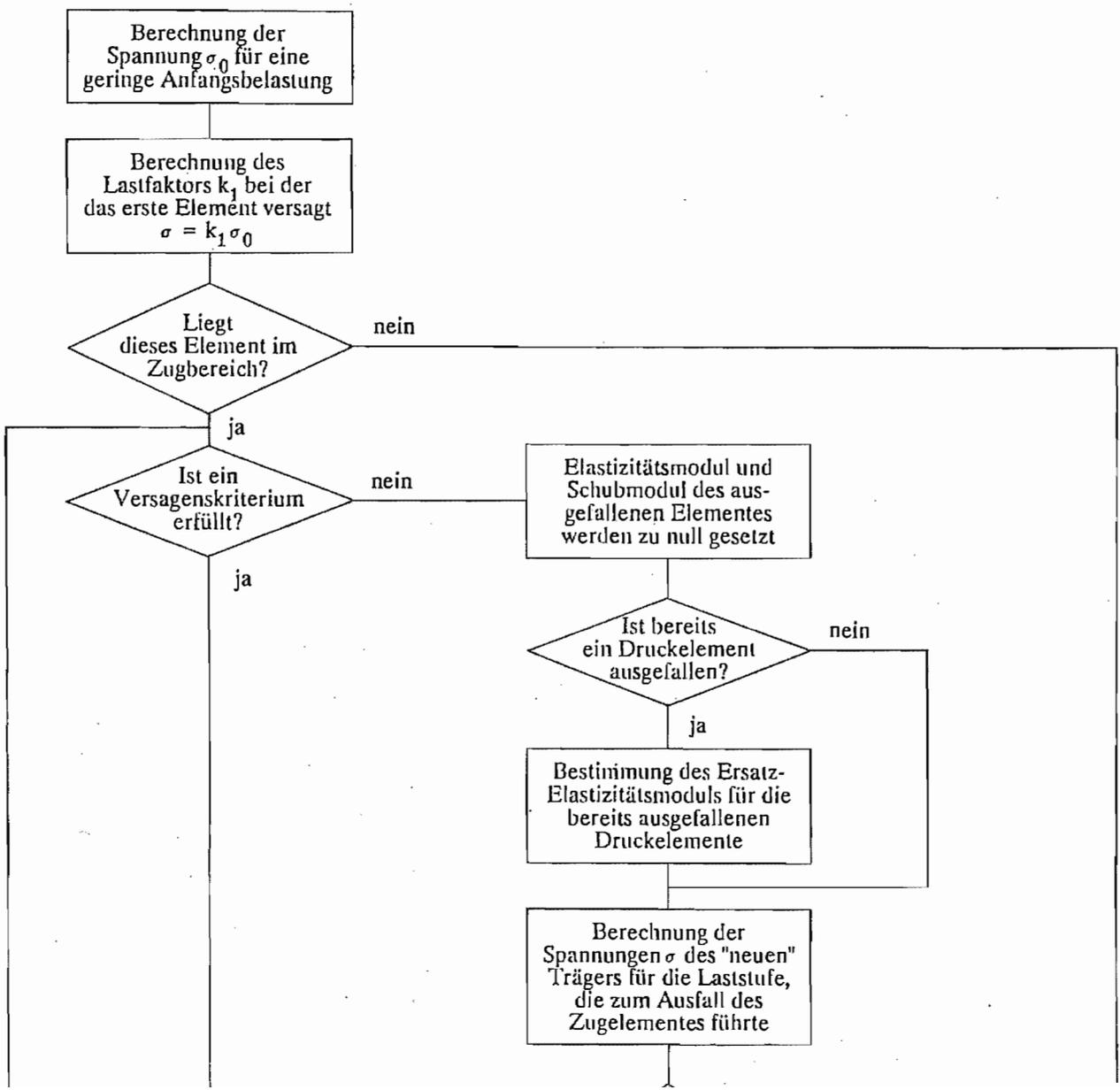
Aus dem Vergleich mit den Zellen - Festigkeiten ergibt sich die Laststufe, bei der das erste Element versagt.

Liegt diese Zelle im Druckbereich, so wird für die weitere Berechnung, d.h. für die weitere Laststeigerung, ein Träger zugrundegelegt, der an der Stelle des ausgefallenen Elementes ein "Loch" aufweist: der Elastizitätsmodul E_D dieser Zelle wird zu null gesetzt.

Für diesen neuen Träger werden wiederum die Spannungen in jedem Element berechnet, und zwar erneut für eine geringe Anfangsbelastung. Diese neue Anfangsbelastung entspricht aber in Wirklichkeit einer Laststeigerung, da ja bis zum Versagen der betrachteten Zelle bereits eine gewisse Last aufgebracht werden konnte. Die resultierenden Spannungen in den einzelnen Elementen ergeben sich somit aus der Addition der beiden o.a. Lastfälle: zu den bereits erreichten Spannungen werden Spannungen aus einem Lastfall hinzugezählt, bei dem das plastifizierte Element zwar weitere Stauchungen erfährt, aber keine weiteren Kräfte bzw. Spannungen mehr aufnehmen kann. Auf die benachbarten Elemente entfallen somit zusätzliche Spannungen, damit der Ausfall der Zelle ausgeglichen werden kann.

Die Belastung des "neuen" Trägers wird solange gesteigert, bis die Festigkeit der nächsten Zelle erreicht ist. Die Spannungen, die in den Elementen bis zu diesem Zeitpunkt erreicht wurden, werden wiederum abgespeichert, und für die weitere Berechnung d.h. Laststeigerung wird ein Träger zugrunde gelegt, bei dem die Elastizitätsmoduln aller bereits ausgefallenen Elemente zu null gesetzt wurden. Dieses Verfahren wird solange fortgesetzt, bis ein Element im Zugbereich ausfällt. Die Berücksichtigung eines ausgefallenen Zugelementes im Rahmen des FE-programmes wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

Die Berücksichtigung des nichtlinearen Tragverhaltens unter Druckbeanspruchung im Rahmen des FE-programmes ist in Bild 5.13 in Form eines Flußdiagrammes dargestellt.



103

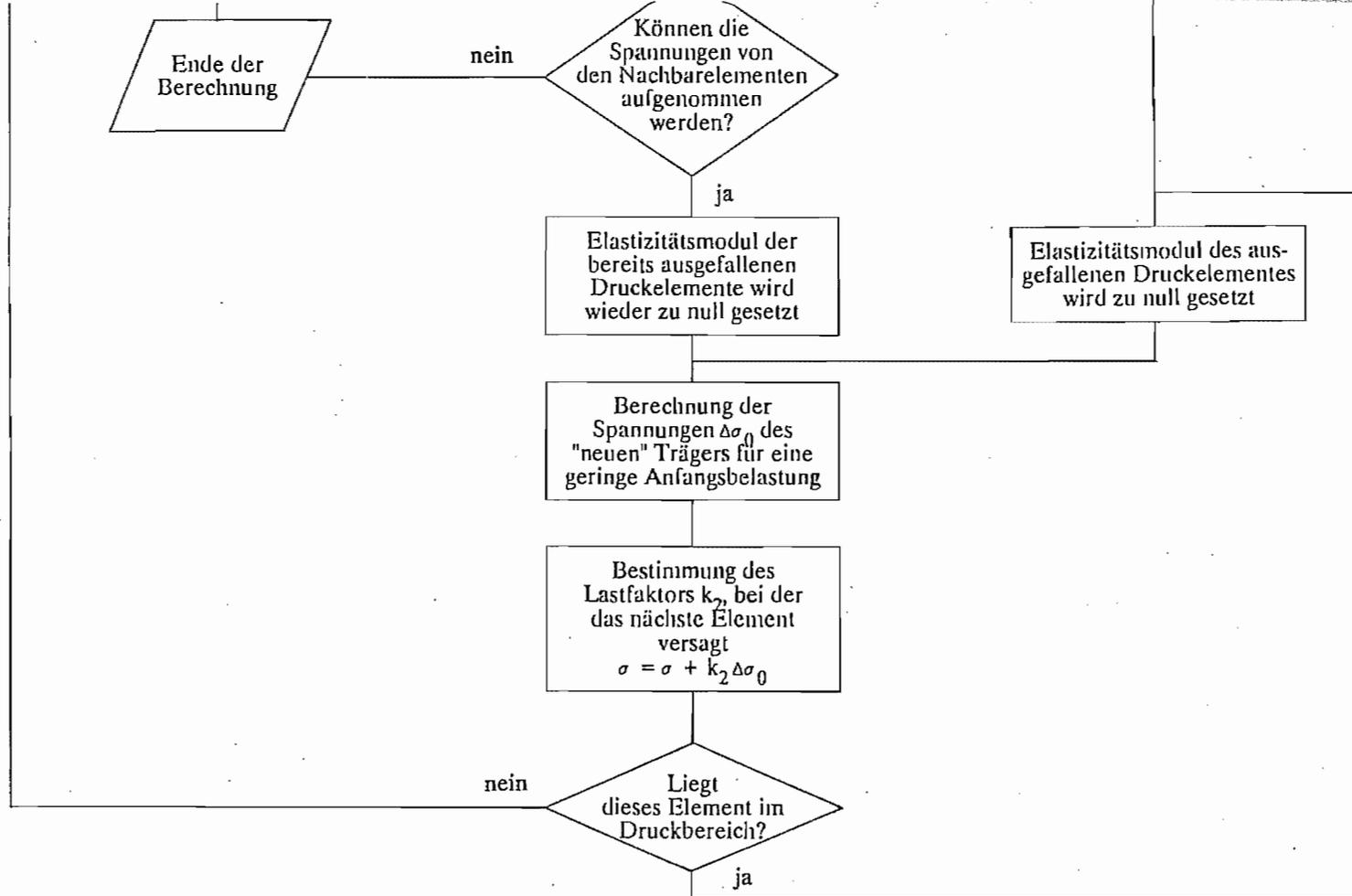


Bild 5.13: Flußdiagramm des Finite Elemente Programmes

5.2.2 Ausfall eines Elementes im Zugbereich

Für das Tragverhalten eines Brettabschnittes unter Zugbeanspruchung wurde die in Bild 5.14 dargestellte linear-elastische Arbeitslinie zugrundegelegt, wobei f_Z der Zugfestigkeit, ϵ_Z der Bruchdehnung und E_Z dem Zug-Elastizitätsmodul einer Zelle entspricht. Ein Vergleich mit der Arbeitslinie eines Elementes unter Druckbeanspruchung deutet an, daß bei Ausfall eines Zugelementes ein anderes Tragverhalten des Brettschichtholzträgers zu erwarten ist, als dies nach dem Versagen eines Druckelementes der Fall ist.

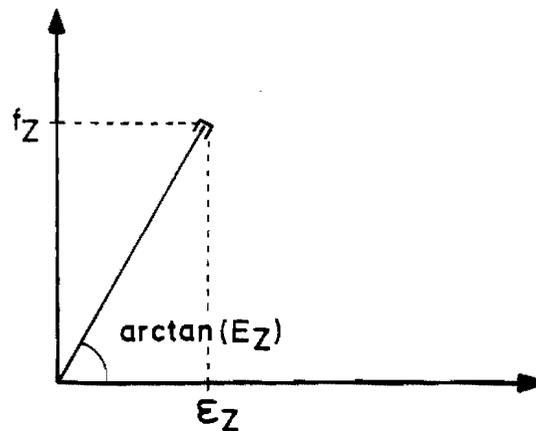


Bild 5.14: Arbeitslinie einer Zelle unter Zugbeanspruchung

So kann ein Druckelement auch nach Überschreiten seiner Bruchstauchung ϵ_D eine Spannung aufnehmen, die seiner Druckfestigkeit f_D entspricht, so daß nach Ausfall eines Druckelementes die benachbarten Zellen nur für die Lastanteile Zusatzspannungen erfahren, die über der Bruchlast dieses Elementes liegen.

Ein Zugelement hingegen kann nach Erreichen seiner Zugfestigkeit überhaupt keine Spannung mehr aufnehmen, so daß die benachbarten Zellen auch für den Lastanteil aufkommen müssen, der bereits vor Ausfall des betrachteten Zugelementes aufgebracht werden konnte. Im Gegensatz zum Ausfall eines Druckelementes entstehen bei Ausfall eines Zugelementes somit bereits zum Zeitpunkt des Versagens beträchtliche Zusatzspannungen in den benachbarten Elementen.

Bevor jedoch diese zusätzlichen Spannungen näher untersucht werden, wird überprüft, ob eins der in *Abschnitt 5.2.3* beschriebenen Bruchkriterien erfüllt ist. Ist dies der Fall, so ist die Tragfähigkeit des Brettschichholzträgers erreicht, und auf eine weitere Berechnung kann verzichtet werden.

Ist dies jedoch nicht der Fall, so wird im Rahmen des FE-programmes überprüft, ob die durch den Ausfall des Zugelementes verursachten Zusatzspannungen zu einem Überschreiten der Festigkeit eines der benachbarten Elemente führen. Hierzu werden die Spannungen im Träger nochmals berechnet, diesmal jedoch unter der Annahme, daß an der Stelle des ausgefallenen Zugelementes von Anfang an ein "Loch" vorhanden war. Bei der Laststufe, bei der dieses Element ursprünglich versagte, erhält man dann die erhöhten Spannungen in den Nachbarelementen.

Im Gegensatz zu einem rein linearen FE-programm ist es hierbei im Rahmen einer exakten Berechnung erforderlich, die gesamte Versagensgeschichte der Zellen im Druckbereich zu wiederholen, weil diese Zellen ja wiederum bis zu ihrer Druckfestigkeit voll mittragen und erst später keine weiteren Spannungen mehr aufnehmen. Diese Art der Berechnung führt jedoch zu einem erheblichen Rechenaufwand, der nicht unbedingt erforderlich ist.

Frühere Simulationsrechnungen zeigten nämlich, daß sich der Ausfall einer Zelle im Zugbereich nur unwesentlich auf die Spannungen der Zellen im Druckbereich auswirkt. Für ein bereits ausgefallenes Element im Druckbereich wurde deshalb die vereinfachende Annahme getroffen, daß die Dehnung ϵ_1 unmittelbar vor Ausfall des Zugelementes mit der Dehnung identisch ist, die unmittelbar nach Ausfall dieses Elementes auftritt. Im Rahmen eines nicht-linearen FE-programmes erfolgt die Berechnung eines Druckelementes entlang der in *Bild 5.15* mit 1 gekennzeichneten Linie. Ist jedoch die Dehnung ϵ_1 bekannt bzw. vorgegeben, so kann dieser Zustand auch mit Hilfe eines linearen FE-programmes erreicht werden, indem für dieses Element mit einem Ersatz-Elastizitätsmodul E'_D gerechnet wird, der sich aus folgender Beziehung ergibt:

$$E'_D = f_D / \epsilon_1 \quad , \quad (5.15)$$

wobei f_D der Druckfestigkeit und ϵ_1 der Dehnung des bereits ausgefallenen Druckelementes zum Zeitpunkt des Versagens einer Zelle im Zugbereich entspricht.

Im Rahmen des hier beschriebenen FE - Programmes erfolgt die Berechnung der Spannungen unmittelbar nach Ausfall eines Zugelementes mit Hilfe der in *Bild 5.15* mit 2 gekennzeichneten Linie.

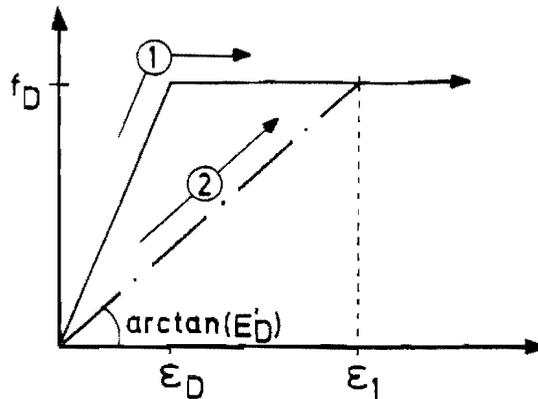


Bild 5.15: Berechnung des Ersatz-Elastizitätsmoduls E'_D eines bereits ausgefallenen Druckelementes

Um abzuschätzen, wie groß die Fehler sind, die durch diese vereinfachende Annahme entstehen, wurden für mehrere Träger die Spannungen, die mit Hilfe des exakten Verfahrens ermittelt wurden, mit denen verglichen, die sich mit Hilfe des o.a. Ersatz-Elastizitätsmoduls ergaben. Diese Vergleichsrechnungen ergaben nur im Druckbereich geringe Abweichungen, während im Zugbereich kein Unterschied zwischen der exakten und näherungsweise Berechnung erkennbar war. Die Abweichungen im Druckbereich lagen hierbei deutlich unter 1% und stiegen nur im unmittelbaren Bereich der Lasteinleitungen auf über 2%. Somit war sichergestellt, daß sich diese vereinfachende Annahme nicht auf die berechnete Tragfähigkeit des Brettschichtholzträgers auswirkt, die ja maßgeblich von den äußeren Lamellen im Zugbereich bestimmt wird, die ihrerseits nicht von dieser Näherung beeinflußt werden.

Die für jede Zelle nach Ausfall eines Zugelementes auftretenden Spannungen werden anschließend mit den zugehörigen Festigkeitswerten verglichen. Kann ein Element die erhöhten Spannungen nicht aufnehmen, d.h. wird dessen Festigkeit überschritten, so bedeutet dies, daß bei einer Laststufe zwei Zellen nacheinander ausfallen. Dieses Versagensbild entspricht dem in Versuchen oft beobachteten Rißfortschritt, der stets zum Versagen des Trägers führt. Die Berechnung des Trägers wird daher abgebrochen, seine Tragfähigkeit ist erschöpft.

Können jedoch die durch den Ausfall eines Zugelementes verursachten zusätzlichen Spannungen von allen Elementen aufgenommen werden, so ist eine weitere Laststeigerung möglich. In diesem Fall müssen jedoch die Elastizitätsmoduln der bereits ausgefallenen Druckelemente wieder zu null gesetzt werden, damit sichergestellt ist, daß diese Elemente im weiteren Verlauf der Berechnung keine weiteren Spannungen mehr aufnehmen.

Für die zusätzlich zur bereits vorhandenen Belastung aufgebrauchten Lastanteile wird somit mit einem Träger gerechnet, der in allen bereits ausgefallenen Elementen ein "Loch" aufweist. Die weitere Berechnung erfolgt dann wie in *Abschnitt 5.2.1* bereits beschrieben.

Das Verfahren zur Berücksichtigung des Versagens eines Zugelementes ist ebenfalls in *Bild 5.13* in Form eines Flußdiagrammes dargestellt.

5.2.3 Versagenskriterien

Das Rechenmodell berechnet zu jeder gegebenen Laststufe die vorhandenen Zug- bzw. Druckspannungen in jeder Zelle und vergleicht diese mit den zugehörigen Festigkeiten. Wird eine dieser Zellenfestigkeiten überschritten, so fällt das betreffende Element aus und das Rechenmodell überprüft, ob eine weitere Berechnung möglich ist (s. *Abschnitt 5.2.1* und *5.2.2*). Im Gegensatz zum reinen Sprödbruchkriterium von *Foschi/Barrett* ermöglicht dieses verfeinerte Versagenskriterium, die in Versuchen beobachtete Laststeigerung nach Ausfall des ersten Elementes zu erfassen.

Die vorhandenen Schubspannungen in jeder Zelle werden im Rahmen des FE-programmes zwar ermittelt, sie spielen jedoch im Hinblick auf die berechnete Tragfähigkeit des Brettschichtholzträgers keine Rolle, weil Angaben über die Schubfestigkeit einer Zelle in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften bislang fehlten. Daher ist es möglich, daß das Rechenmodell eine weitere Laststeigerung anzeigt, obwohl die Tragfähigkeit z.B. infolge der im Bereich eines ausgefallenen Elementes vorhandenen, hohen Schubspannungen bereits erschöpft sein kann.

Aufgrund der bei zahlreichen Biegeversuchen gewonnenen Erfahrungen und von Vergleichsrechnungen, die zur Anpassung des Rechenmodells an Trägerversuche dienen, wurden folgende Kriterien entwickelt, mit deren Hilfe die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern "sinnvoll" bestimmt werden kann:

- 1 fallen bei einer Laststufe zwei Zellen nacheinander aus, so ist die Tragfähigkeit erschöpft. In diesem Fall breitet sich der Riß schlagartig aus (Rißfortschritt), was zum totalen Versagen des Trägers führt (siehe hierzu auch *Abschnitt 5.2.2*);
- 2 fällt eine Zelle im Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Elementes aus (schraffierter Bereich in *Bild 5.16*), so wird die Berechnung abgebrochen. Hierdurch wird berücksichtigt, daß die in diesem Bereich auftretenden hohen Schubspannungsspitzen zu einem Rißfortschritt führen, auch wenn das Rechenmodell aufgrund der vorhandenen Längsspannungen eine weitere Laststeigerung für möglich hält;

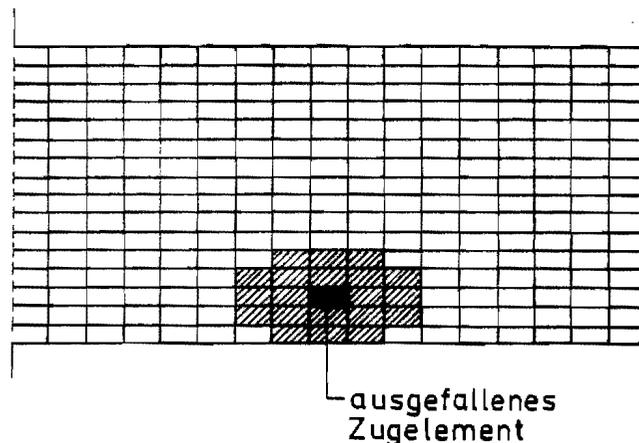


Bild 5.16: Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Zuelementes

- 3 fällt eine Keilzinkenverbindung in der äußeren Zuglamelle aus, so ist keine weitere Laststeigerung möglich. Hierdurch wird berücksichtigt, daß das Versagen einer Keilzinkenverbindung meist schlagartig über die gesamte Brettbreite auftritt, während bei einem Brettabschnitt mit Ast das Versagen oft nur mit einem Anriß im Bereich der Schrägfaserigkeit einsetzt. Treten die Keilzinkenverbindungen in der äußeren Zuglamelle auf, so führt dieses schlagartige, totale Versagen einer Keilzinkenverbindung in der Regel zu einem Abschälen der unteren Lamelle und somit zum Versagen des Trägers;

- 4 kommt keines der bisher beschriebenen Versagenskriterien zum Tragen, d.h. sind die ausgefallenen Zugelemente über den gesamten Träger verstreut, so wird die Berechnung abgebrochen, wenn das 5. Zugelement versagt. Dieses Kriterium, das nur in ganz seltenen Fällen zur Anwendung kommt und somit die Rechen-ergebnisse kaum beeinflusst, erfaßt, daß auch in diesem Fall die vorhandenen Schubspannungsspitzen im Bereich der ausgefallenen Elemente zum Versagen des Trägers führen.

Bei der späteren Auswertung wird unterschieden, ob ein Träger aufgrund eines Holzversagens im Astbereich oder eines Keilzinkenversagens zu Bruch geht. Während hierbei im Falle des 3. Bruchkriteriums die Versagensursache eindeutig ist, ist es jedoch in den anderen Fällen möglich, daß sowohl Zellen mit als auch Zellen ohne Keilzinkenverbindungen ausfallen. Da aber nach der Versagens-ursache gesucht wird, wird die Eigenschaft der bruchverursachenden Zelle in die Auswertung mit aufgenommen. So wird im Falle des 1. und 2. Versagenskriteriums die bereits ausgefallene Zelle als verursachende Zelle angesehen, weil ja die nächste Zelle nur aufgrund der erhöhten Spannungen versagt, die im Umgebungsbereich des vorher ausgefallenen Elementes auftreten. Im Falle des 4. Versagenskriteriums geht in die Auswertung die Eigenschaft der letzten versagenden Zelle ein, weil es hier keine verursachende Zelle im eigentlichen Sinne gibt.

Somit sind die Grundlagen zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern - Simulation der Werkstoffeigenschaften, Berechnung der Spannungen und Versagenskriterien - gegeben.

5.3 Überprüfung des Rechenmodells mit Hilfe von Trägerversuchen

Im Rahmen von zwei früheren Forschungsvorhaben wurde die Anwendbarkeit dieses Rechenmodells mit Hilfe von Trägerversuchen überprüft. Während die in [30] beschriebenen Simulationsrechnungen noch mit der Grundversion dieses Rechenmodells erfolgten, konnten bei den in [32] beschriebenen Simulationsrechnungen bereits die in den *Abschnitten 5.1.4* und *5.1.5* beschriebenen Regelmäßigkeiten der Ästigkeits- und Elastizitätsmodulverteilung berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde werden hier nur die letztgenannten Vergleichsrechnungen kurz beschrieben.

Insgesamt wurde die Tragfähigkeit von 9 Versuchsträgern unterschiedlicher Größe mit Hilfe des Rechenmodells abgeschätzt. Von diesen Versuchsträgern waren alle festigkeitsrelevanten Eigenschaften der beiden äußeren Zuglamellen bekannt, und zwar Lage und Größe der Äste, Brett - Rohdichten, Brett - Elastizitätsmoduln sowie Lage der Keilzinkenverbindungen.

Von jedem Träger wurden 30 Simulationen (Berechnungen) durchgeführt. In Bild 5.17 sind die Mittelwerte der berechneten Biegefestigkeiten den im Versuch ermittelten Tragfähigkeiten gegenübergestellt. Die größte Abweichung zwischen Versuch und Rechnung beträgt hierbei etwa 10%, so daß eine sehr gute Übereinstimmung über den gesamten Tragfähigkeitsbereich festgestellt werden konnte.

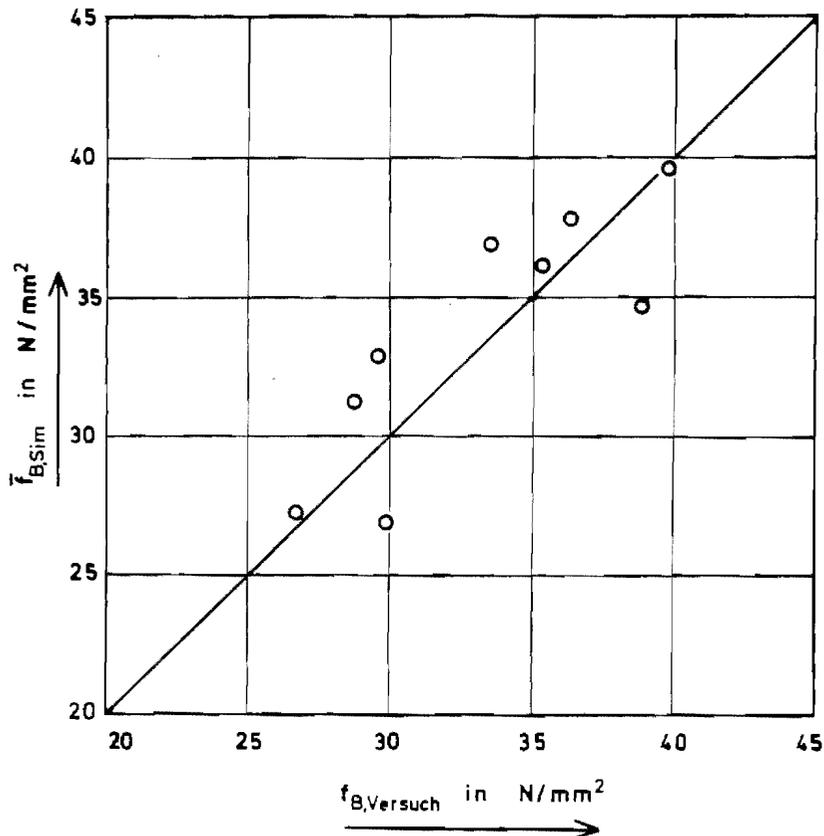


Bild 5.17: Vergleich der mittleren berechneten Biegefestigkeiten $f_{B,Sim}$ mit den Versuchswerten $f_{B,Versuch}$

Bei der Auswertung der Simulationsrechnungen wurde unterschieden, ob eine Keilzinkenverbindung oder ein Holzfehler (Ast) für das Versagen verantwortlich war. Anhand der Auftretenshäufigkeit dieser beiden Versagensarten war es möglich, die wahrscheinliche Bruchursache des Versuchsträgers vorherzusagen. Hierbei konnte in allen Fällen eine Übereinstimmung zwischen der erwarteten und der im Versuch festgestellten Versagensursache erzielt werden.

Diese Versuche zeigten somit, daß es mit Hilfe des Rechenmodells möglich ist, das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Größe treffend zu beschreiben.

6 Das theoretische Modell

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

Das in diesem Kapitel vorgestellte theoretische Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern geht davon aus, daß Brettschichtholz aus zwei voneinander unabhängigen Materialien, dem Holz bzw. 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 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 "richtigen" 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 "richtigen" Verteilung des Materials "Keilzinkenverbindung".

Die Tragfähigkeiten der Träger, 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.

Aus diesen Überlegungen geht hervor, 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 Festigkeitsverteilungen der beiden beeinflussenden Materialien "Holz" und "Keilzinkenverbindung" bekannt sind.

Wie bereits angedeutet, kann die 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 Festigkeitsverteilung beschränkt sich somit auf Brettschichtholzträger mit kleinen Trägerabmessungen.

Im Falle des Materials "Keilzinkenverbindung" könnte die 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 in *Kapitel 5* beschriebenen Rechenmodells ist es jedoch möglich, sowohl die Keilzinkenfestigkeit als auch die Holzqualität "künstlich" zu verändern, so daß die gewünschte Versagensart "erzwingen" werden kann. Mit Hilfe dieses Rechenmodells ist es also möglich, die geforderten Festigkeitsverteilungen der beiden Materialien "Holz" und "Keilzinkenverbindung" zu ermitteln (siehe hierzu *Kapitel 7*).

6.2 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:

$$1 - H(\sigma) = (1 - F(\sigma)) \cdot (1 - G(\sigma)) \quad (6.1)$$

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:

$$H(\sigma) = F(\sigma) + G(\sigma) - F(\sigma) \cdot G(\sigma) \quad (6.2)$$

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(6.2) zu:

$$H(\sigma) = \Phi\left(\frac{\sigma/m_1 - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma/m_2 - 1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma/m_1 - 1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\sigma/m_2 - 1}{v_2}\right), \quad (6.3)$$

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:

$$0,05 = \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_1-1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_2-1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_1-1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\sigma_5/m_2-1}{v_2}\right) \quad (6.4)$$

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:

$$0,5 = \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1-1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_2-1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_1-1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\sigma_{50}/m_2-1}{v_2}\right) \quad (6.5)$$

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(6.1)* 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 6.1* ist diese Tendenz qualitativ dargestellt.

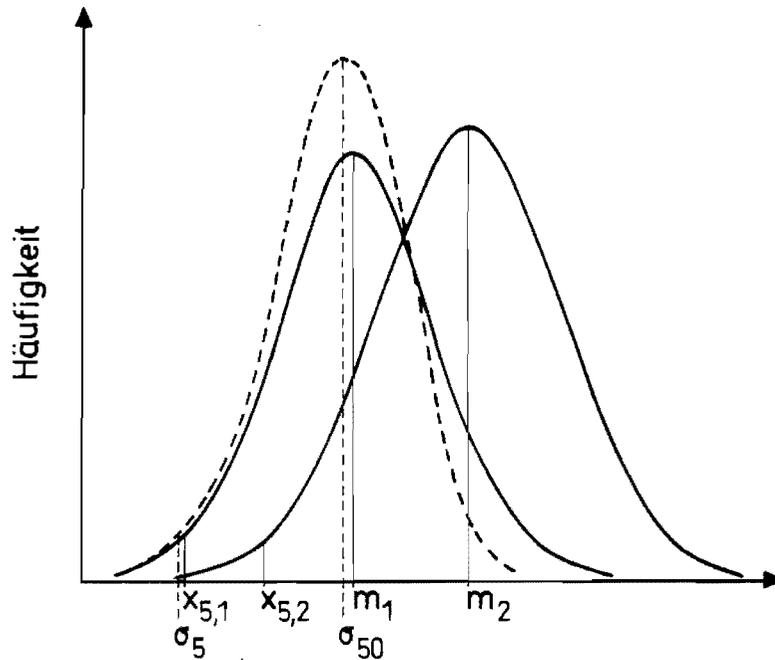


Bild 6.1: Verteilungen der Biegefestigkeit für das Endprodukt "Brettschichtholz" und die beiden Materialien 1 und 2

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 liegt.

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%-Fraktile, das Verhältnis m_1/m_2 der beiden Mittelwerte sowie der Variationskoeffizient v_1 des schwächeren Materials als beschreibende Kenngrößen gewählt.

Mit Hilfe der Beziehungen

$$x_{5,1} = m_1 \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1) \quad (6.6a)$$

und

$$x_{5,2} = m_2 \cdot (1 - 1,645 \cdot v_2) \quad (6.6b)$$

zur Bestimmung der 5%-Fraktile der beiden Materialien, ergeben sich nach einigen Umformungen folgende Gleichungen zur Bestimmung der 5%-Fraktile σ_5 und des Medianwertes σ_{50} der Brettschichtholzbiegefestigkeit:

$$\begin{aligned} 0,05 = & \Phi \left(\frac{(1-1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5 / x_{5,1} - 1}{v_1} \right) + \Phi \left(1,645 \cdot \frac{(1-1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5 / x_{5,1} \cdot m_1 / m_2 - 1}{1 - \frac{m_1 / m_2}{x_{5,1} / x_{5,2}} \cdot (1-1,645 \cdot v_1)} \right) \\ & - \Phi \left(\frac{(1-1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5 / x_{5,1} - 1}{v_1} \right) \cdot \Phi \left(1,645 \cdot \frac{(1-1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_5 / x_{5,1} \cdot m_1 / m_2 - 1}{1 - \frac{m_1 / m_2}{x_{5,1} / x_{5,2}} \cdot (1-1,645 \cdot v_1)} \right) \end{aligned} \quad (6.7)$$

und

$$\begin{aligned} 0,5 = & \Phi \left(\frac{\sigma_{50} / m_1 - 1}{v_1} \right) + \Phi \left(1,645 \cdot \frac{\sigma_{50} / m_1 \cdot m_1 / m_2 - 1}{1 - \frac{m_1 / m_2}{x_{5,1} / x_{5,2}} \cdot (1-1,645 \cdot v_1)} \right) \\ & - \Phi \left(\frac{\sigma_{50} / m_1 - 1}{v_1} \right) \cdot \Phi \left(1,645 \cdot \frac{\sigma_{50} / m_1 \cdot m_1 / m_2 - 1}{1 - \frac{m_1 / m_2}{x_{5,1} / x_{5,2}} \cdot (1-1,645 \cdot v_1)} \right) \end{aligned} \quad (6.8)$$

In Bild 6.2a-d und 6.3a-d ist der Verlauf der Verhältnismerte $\sigma_5 / x_{5,1}$ und σ_{50} / m_1 in Abhängigkeit von den o.a. Kenngrößen dargestellt.

Aus diesen Bildern wird deutlich, daß sich die 5%-Fraktile und der Medianwert des Brettschichtholzes sehr stark an den entsprechenden Werten des schwächeren Materials orientieren, und daß sich diese Verhältnismerte für $x_{5,1} / x_{5,2} < 0,5$ praktisch zu 1 ergeben.

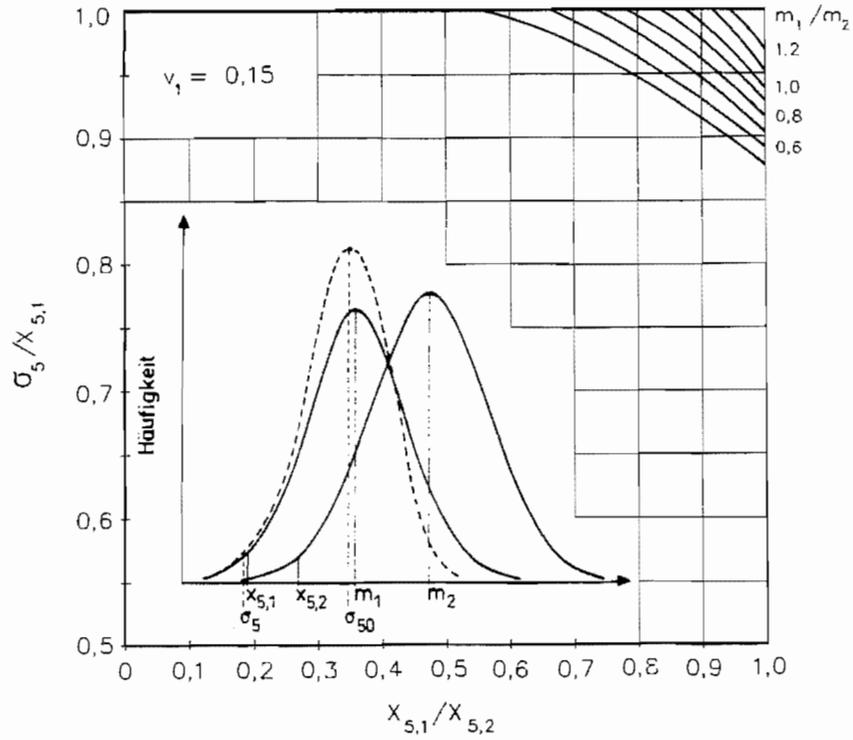


Bild 6.2a: 5%-Fraktile σ_5 des Brettschichtholzes (bezogen auf die 5%-Fraktile des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,15$

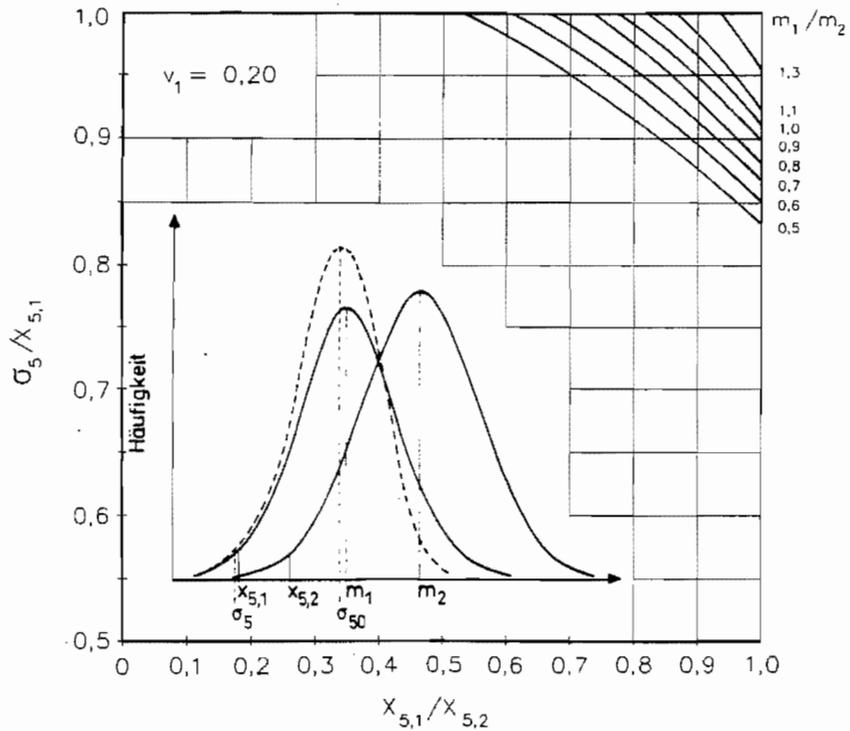


Bild 6.2b: 5%-Fraktile σ_5 des Brettschichtholzes (bezogen auf die 5%-Fraktile des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,20$

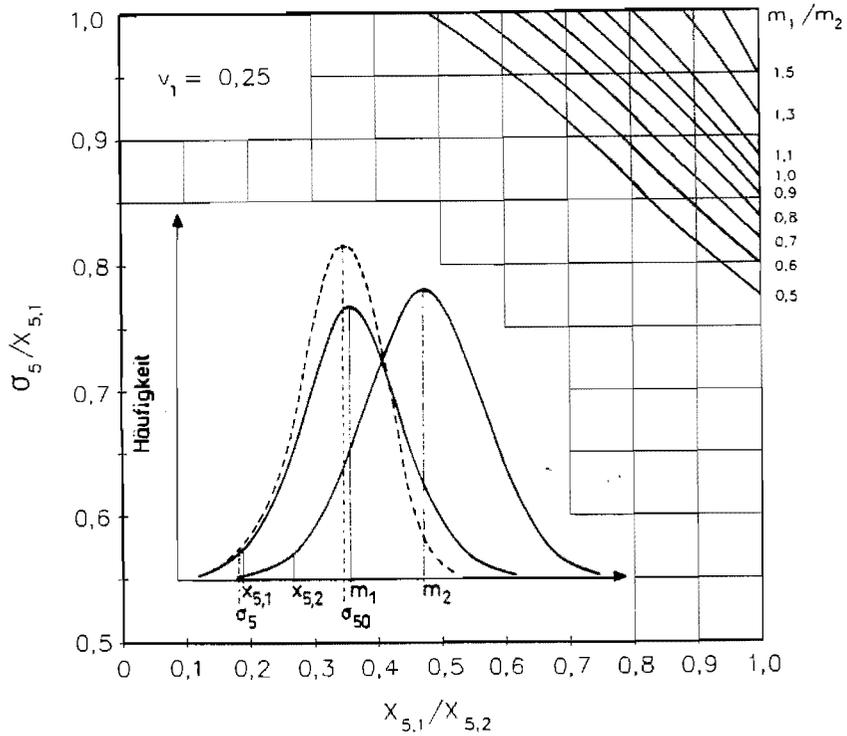


Bild 6.2c: 5%-Fraktile σ_5 des Brettschichtholzes (bezogen auf die 5%-Fraktile des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,25$

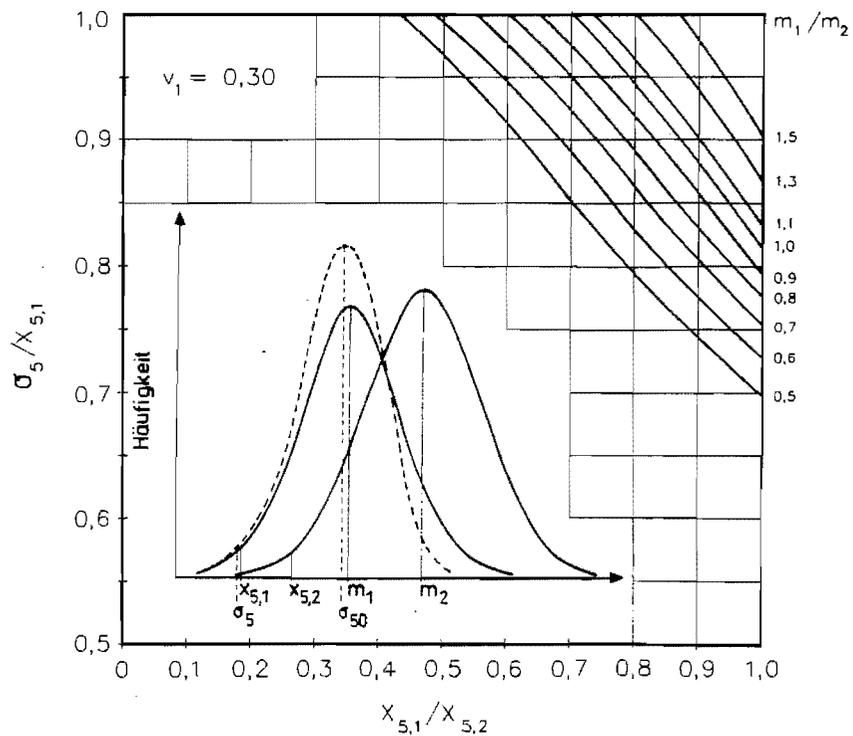


Bild 6.2d: 5%-Fraktile σ_5 des Brettschichtholzes (bezogen auf die 5%-Fraktile des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,30$

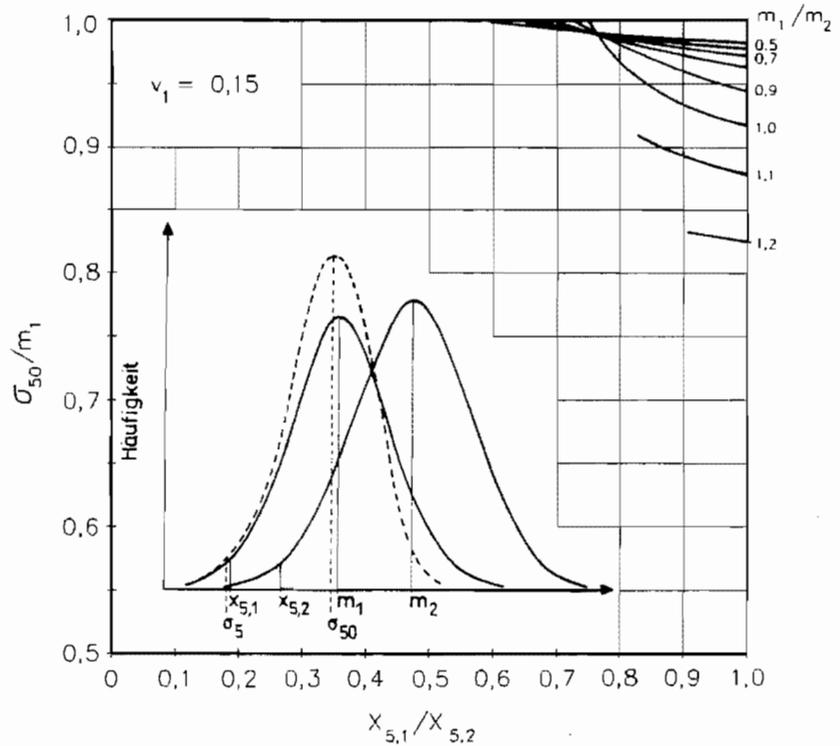


Bild 6.3a: Medianwert σ_{50} des Brettschichtholzes (bezogen auf den Mittelwert des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,15$

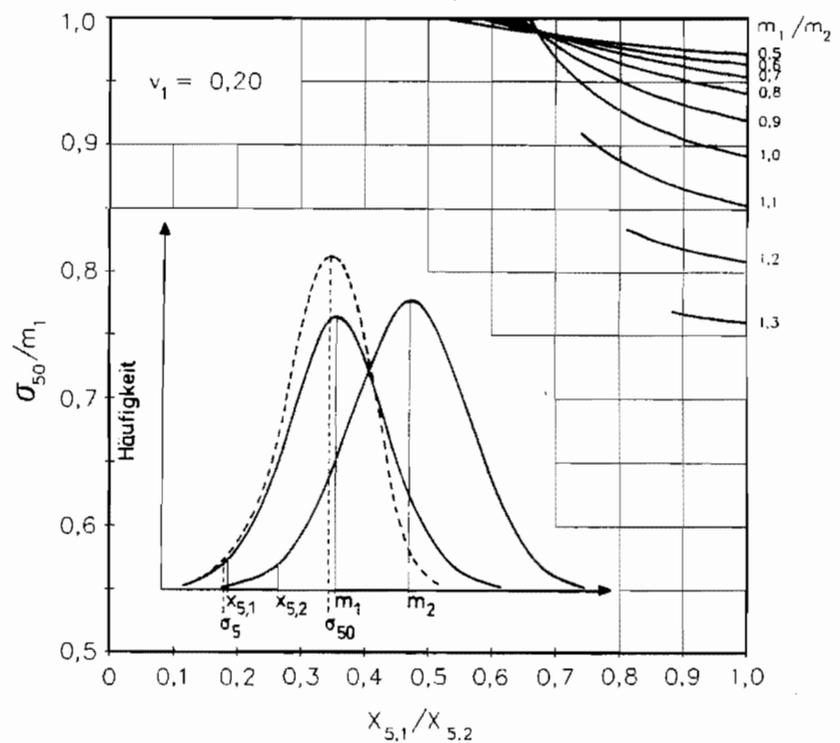


Bild 6.3b: Medianwert σ_{50} des Brettschichtholzes (bezogen auf den Mittelwert des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,20$

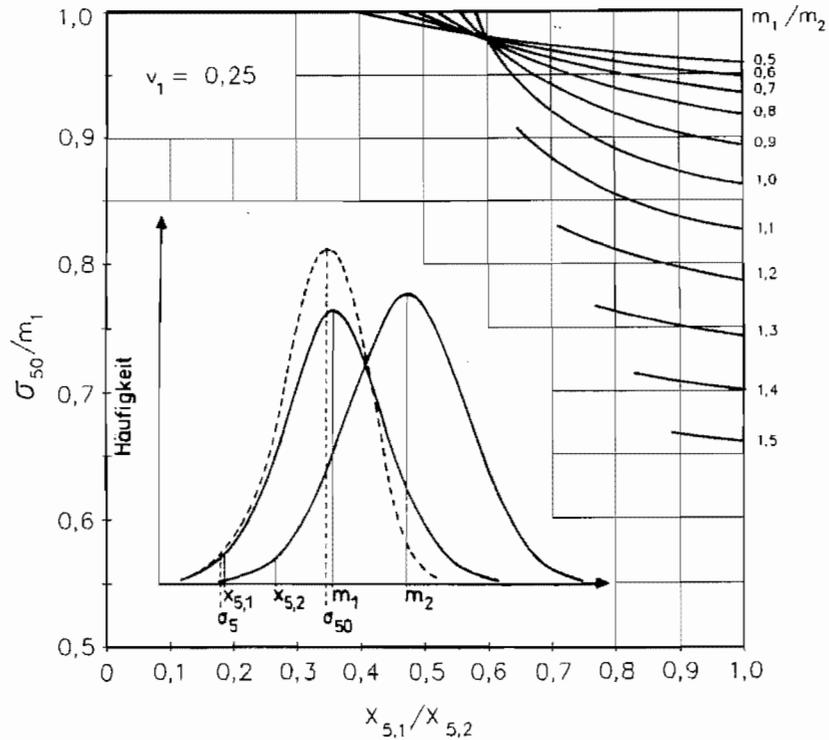


Bild 6.3c: Medianwert σ_{50} des Brettschichtholzes (bezogen auf den Mittelwert des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,25$

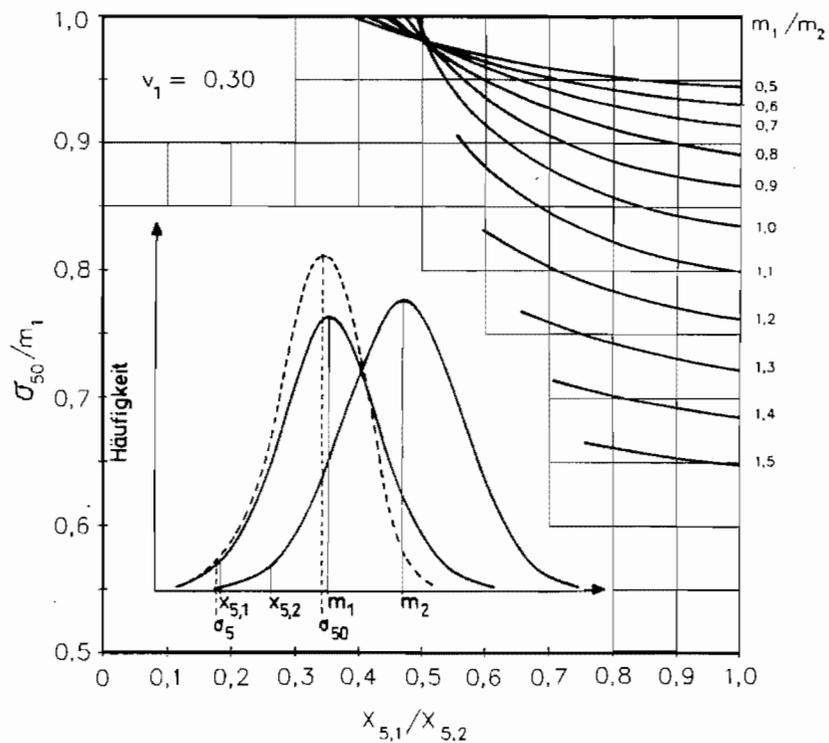


Bild 6.3d: Medianwert σ_{50} des Brettschichtholzes (bezogen auf den Mittelwert des schwächeren Materials) in Abhängigkeit vom Verhältnis der 5%-Fraktile und der Mittelwerte der Materialien 1 und 2; $v_1 = 0,30$

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.

Es folgen nun einige Erläuterungen, die zu einem besseren Verständnis dieser Diagramme bzw. des hier vorgestellten theoretischen Modells führen sollen.

Ein steigender Wert des Verhältnisses $x_{5,1}/x_{5,2}$ bedeutet, daß sich die 5%-Fraktile der beiden Materialien annähern. Dies hat zur Folge, daß sich das "bessere" Material häufiger für das Versagen eines Brettschichtholzträgers verantwortlich zeigt, bevor die Festigkeit des eigentlich "schwächeren" Materials überschritten wird. Die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger nimmt somit im Vergleich zum schwächeren Material weiter ab, weil die Tragfähigkeit des vermeintlich schwächeren Materials nicht mehr in allen Fällen ausgenutzt werden kann.

Entspricht das Verhältnis m_1/m_2 gerade dem Verhältnis $x_{5,1}/x_{5,2}$, so geht aus *Gl(6.6a)* und *Gl(6.6b)* hervor, daß dann auch der Variationskoeffizient v_2 des besseren Materials dem Variationskoeffizienten v_1 entspricht.

Ist das Verhältnis m_1/m_2 größer als $x_{5,1}/x_{5,2}$, so ist der Variationskoeffizient v_2 kleiner als v_1 . Dies wirkt sich günstig auf die 5%-Fraktile des Brettschichtholzes aus, weil das bessere Material weniger "ausstrahlt", so daß sich die charakteristische Biegefestigkeit des Brettschichtholzes dem entsprechenden Wert des "schwächeren" Materials annähern kann. Eine geringere Streuung des besseren Materials bewirkt jedoch auch, daß nicht mehr so viele hohe Festigkeitswerte zu erwarten sind, so daß der Medianwert des Brettschichtholzes im Gegensatz zur 5%-Fraktile abnimmt.

Aus *Bild 6.3* ist ersichtlich, daß für Verhältniswerte $m_1/m_2 > 1$ die Kurven für den Medianwert ab einem bestimmten Verhältnis $x_{5,1}/x_{5,2}$ plötzlich aufhören. Diese Endpunkte kennzeichnen den Fall, bei dem sich der Variationskoeffizient v_2 des besseren Materials gerade zu null ergibt. Eine Fortführung dieser Kurven ist somit nicht möglich, weil sich dann aufgrund der Kombination "kleines $x_{5,1}/x_{5,2}$ " und "zu großes m_1/m_2 " ein negativer Variationskoeffizient ergäbe.

Ist das Verhältnis m_1/m_2 jedoch kleiner als $x_{5,1}/x_{5,2}$, so ist der Variationskoeffizient v_2 größer als v_1 . In diesem Fall "strahlt" das bessere Material weiter aus, was zu einer Abnahme der 5%-Fraktile und einer Zunahme des Medianwertes des Brettschichtholzes führt.

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.

6.3 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 [85] die Wahrscheinlichkeit P_2 eines Versagens im besseren Material zu:

$$P_2 = \Phi \left(\frac{m_1 - m_2}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} \right) \quad (6.9)$$

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.

6.4 Zahlenbeispiel

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

Gegeben seien die normalverteilten Verteilungsfunktionen der Biegefestigkeit der beiden Materialien "Holz" und "Keilzinkenverbindung (KZV)" mit den Mittelwerten $m_{\text{Holz}} = 40 \text{ N/mm}^2$ und $m_{\text{KZV}} = 36 \text{ N/mm}^2$ und den zugehörigen Standardabweichungen $s_{\text{Holz}} = 6,8 \text{ N/mm}^2$ und $s_{\text{KZV}} = 9 \text{ N/mm}^2$. Die zugehörigen 5%-Fraktilen ergeben sich nach Gl(6.6) zu:

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

$$x_{5,\text{KZV}} = 36 \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{9}{36}\right) = 21,2 \text{ N/mm}^2$$

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

$$x_{5,1}/x_{5,2} = 21,2/28,8 = 0,74$$

$$m_1/m_2 = 36/40 = 0,90$$

$$v_1 = 9/36 = 0,25$$

Die erwartete 5%-Fraktile und der Medianwert der Brettschichtholzträger ergibt sich dann mit Hilfe von *Bild 6.2c* und *Bild 6.3c* zu:

$$\sigma_5 = 0,99 \cdot 21,2 = 21,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{50} = 0,935 \cdot 36 = 33,7 \text{ N/mm}^2$$

Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Holzversagens ergibt sich nach Gl(6.9) zu:

$$\Phi\left(\frac{36 - 40}{\sqrt{6,8^2 + 9^2}}\right) = \Phi(-0,355) = 0,36,$$

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.

7 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 Problem-bereiche 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 in *Kapitel 5* beschriebenen Rechenmodells untersucht.

Der Großteil der im folgenden beschriebenen Simulationsrechnungen wurde mit Hilfe des in *Bild 7.1* dargestellten "Standard"-Trägers durchgeführt, und Änderungen bezüglich der Trägergröße oder der Belastungsart wurden auf diesen Träger bezogen. Dieser Bezugsträger entspricht den Anforderungen nach ISO 8375 [7], so daß die Simulationsergebnisse als Grundlage für die Festlegung von charakteristischen Festigkeitswerten im *Eurocode 5* dienen können.

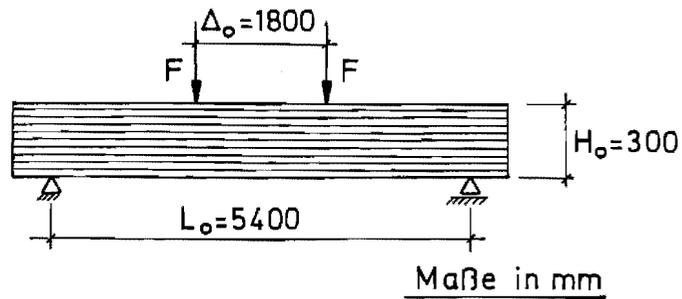


Bild 7.1: Standardträger

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 im *Abschnitt 5.1.1* bereits beschrieben ist es jedoch nicht möglich, eine für alle Leimbaubetriebe 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. Die im *Anhang A3* beschriebenen Untersuchungen 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 Tatsache, daß 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 nach Gl(4.2) zum Zeitpunkt des Versagens gewählt.

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 und den unverändert übernommenen Mittelwert eine Normalverteilung "hineingezwungen", deren Variationskoeffizient sich gemäß Gl(6.6) zu

$$v_{KZV} = \frac{1 - x_{5,KZV}/m_{KZV}}{1,645} \quad (7.1)$$

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 6* 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.

7.1 Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

7.1.1 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 der Keilzinkenverbindungen 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:

$$x_{5,KZV}^0 = k_{0,5,KZV} \cdot f_{Z,5,KZV} \quad (7.2a)$$

und

$$m_{KZV}^0 = k_{0,m,KZV} \cdot f_{Z,m,KZV} \quad (7.2b)$$

Hierbei sind

- $x_{5,KZV}^0$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des
 und m_{KZV}^0 Standardträgers,
 $f_{Z,5,KZV}$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Keilzinkenzugfestig-
 und $f_{Z,m,KZV}$ keit,
 $k_{0,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung der Biegefestigkeit des
 und $k_{0,m,KZV}$ Standardträger 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 5.1.5.1*).

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

$$x_{5,KZV} = k_{L,5,KZV} \cdot k_{H,5,KZV} \cdot k_{F,5,KZV} \cdot x_{5,KZV}^0 \quad (7.3a)$$

und

$$m_{KZV} = k_{L,m,KZV} \cdot k_{H,m,KZV} \cdot k_{F,m,KZV} \cdot m_{KZV}^0 \quad (7.3b)$$

Hierbei sind

- $x_{5,KZV}$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit der
 und m_{KZV} Träger mit Keilzinkenversagen,
 $x_{5,KZV}^0$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des
 und m_{KZV}^0 Standardträgers (mit Keilzinkenversagen),
 $k_{L,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
 und $k_{L,m,KZV}$ Trägerlänge,
 $k_{H,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
 und $k_{H,m,KZV}$ Trägerhöhe,
 $k_{F,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
 und $k_{F,m,KZV}$ Belastungsart.

Bei den in *Abschnitt 5.1.5* und *5.1.6* 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.

In Anlehnung an die in *Abschnitt 5.2.3* beschriebenen Versagenskriterien weisen die Träger mit Keilzinkenversagen ein sprödes Bruchverhalten auf, wenn z.B. eine Keilzinkenverbindung in der äußeren Zuglamelle versagt. Das gleiche gilt, wenn eine Keilzinkenverbindung in einer weiter innen liegenden Zuglamelle versagt und die durch diesen Ausfall entstehenden Zusatzspannungen von den benachbarten Elementen nicht aufgenommen werden können. Führen diese Zusatzspannungen jedoch nicht zum Versagen einer benachbarten Zelle, so kann die Last weiter gesteigert werden, wobei das Maß der möglichen Laststeigerung von der Güte, d.h. der Festigkeit der Brettlamellen, abhängig ist.

Bei den Simulationsrechnungen zeigte sich jedoch, daß die Fälle, in denen eine weitere Laststeigerung möglich ist, sich nur geringfügig auf die 5%-Fraktile auswirken. Aufgrund dieser Beobachtung und in Anbetracht der Tatsache, daß für die Bemessung in erster Linie dieser charakteristische Festigkeitswert von Bedeutung ist, 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. Dieser Fehler liegt jedoch auf der sicheren Seite.

7.1.2 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 $k_{0,5,\text{KZV}}$ und $k_{0,m,\text{KZV}}$ ist für verschiedene Werte des Variationskoeffizienten $v_{Z,\text{KZV}}$ der Keilzinken-zugfestigkeit in *Bild 7.2a* und *Bild 7.2b* dargestellt.

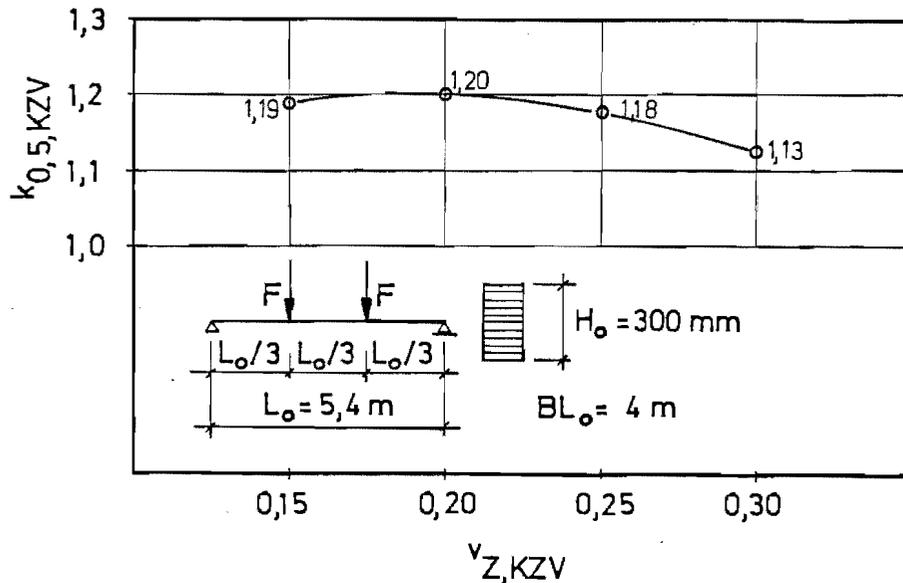


Bild 7.2a: Faktor $k_{0,5,\text{KZV}}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,\text{KZV}}$ der Keilzinken-zugfestigkeit

Aus *Bild 7.2a* ist zu erkennen, daß die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen für $0,15 < v_{Z,\text{KZV}} < 0,25$ nahezu konstant ist und etwa 20% über der charakteristischen Keilzinken-zugfestigkeit 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 Keilzinken-zugfestigkeit (Bild 7.2b).

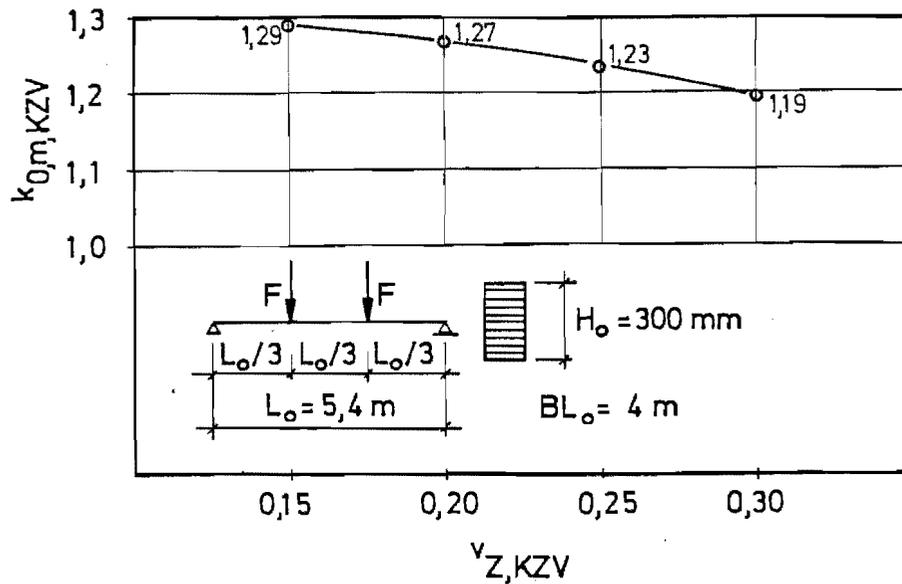


Bild 7.2b: Faktor $k_{0,m,KZV}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinken-zugfestigkeit

7.1.3 Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart

1939 entwickelte WEIBULL [89] 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 2.5* beschriebenen Höheneffektes von BOHANNAN [13]. Die Gleichungen, die sich mit Hilfe dieser Theorie zur Beschreibung des Volumeneffektes ergeben, haben sich international durchgesetzt und haben auch Eingang in den Entwurf zum Eurocode 5 [6] gefunden. Aus diesem Grunde werden diese Gleichungen auch im Rahmen dieser Arbeit dazu verwendet, die Simulationsergebnisse zu beschreiben.

7.1.3.1 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 Brettängen 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:

$$k_L = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-1/k_{Wei}} \quad (7.4)$$

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

Für den Fall eines homogenen, isotropen Materials kann der Exponent k_{Wei} nach COLLING [19] in guter Näherung zu

$$k_{Wei} \approx \frac{1,15}{v} \quad (7.5)$$

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(7.4) und Gl(7.5) beschrieben werden konnte.

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

$$k_{L,5,KZV} = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,5,KZV}} \quad (7.6a)$$

und

$$k_{L,m,KZV} = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,m,KZV}} \quad (7.6b)$$

wobei die Exponenten β_L zwar weiterhin von den Variationskoeffizienten der Verteilungen abhängig sind, jedoch nicht mehr mit Hilfe von Gl(7.5) 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.

In *Bild 7.3a* und *Bild 7.3b* 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.

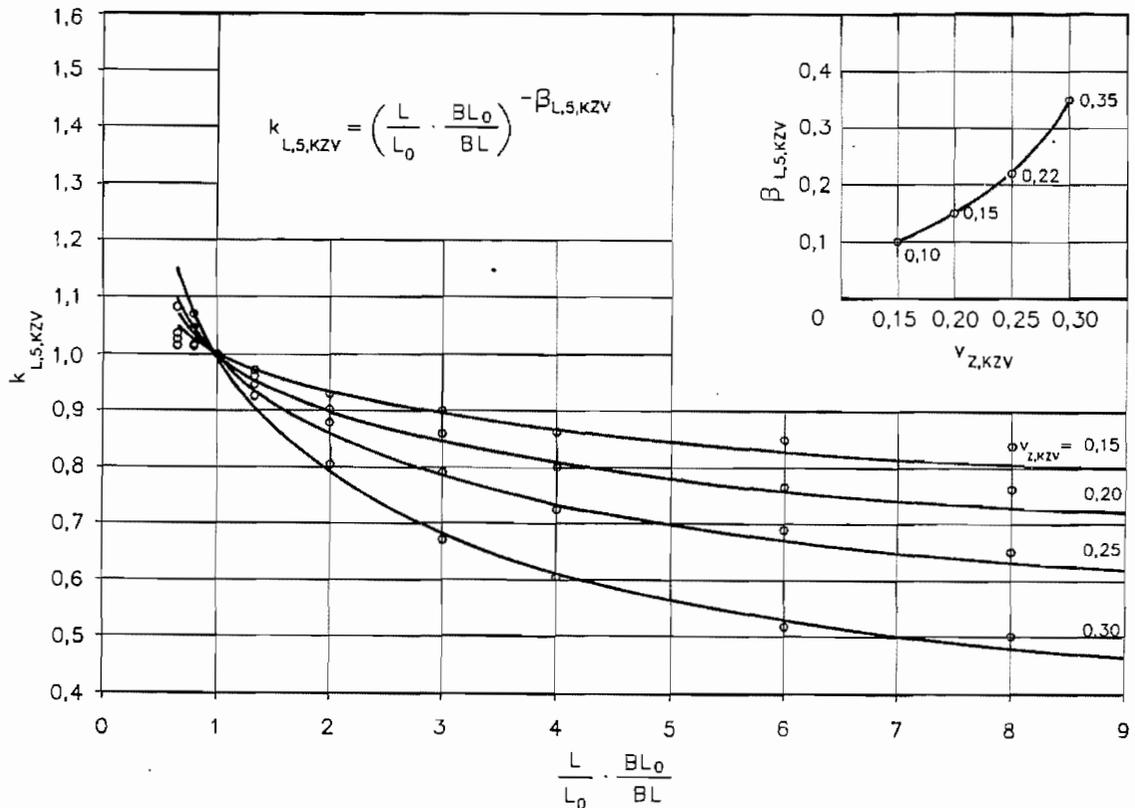


Bild 7.3a: Einfluß der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

Bei der Anpassung von $Gl(7.6)$ 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 die bestmögliche Anpassung an die Simulationsergebnisse dar; aufgrund der bereits erwähnten verhältnismäßig geringen Empfindlichkeit des "Mischverfahrens" bzgl. der Eingangswerte erscheint diese Vereinfachung jedoch gerechtfertigt.

Für den Fall der 5%-Fraktile der Biegefestigkeit ist aus *Bild 7.3a* 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.

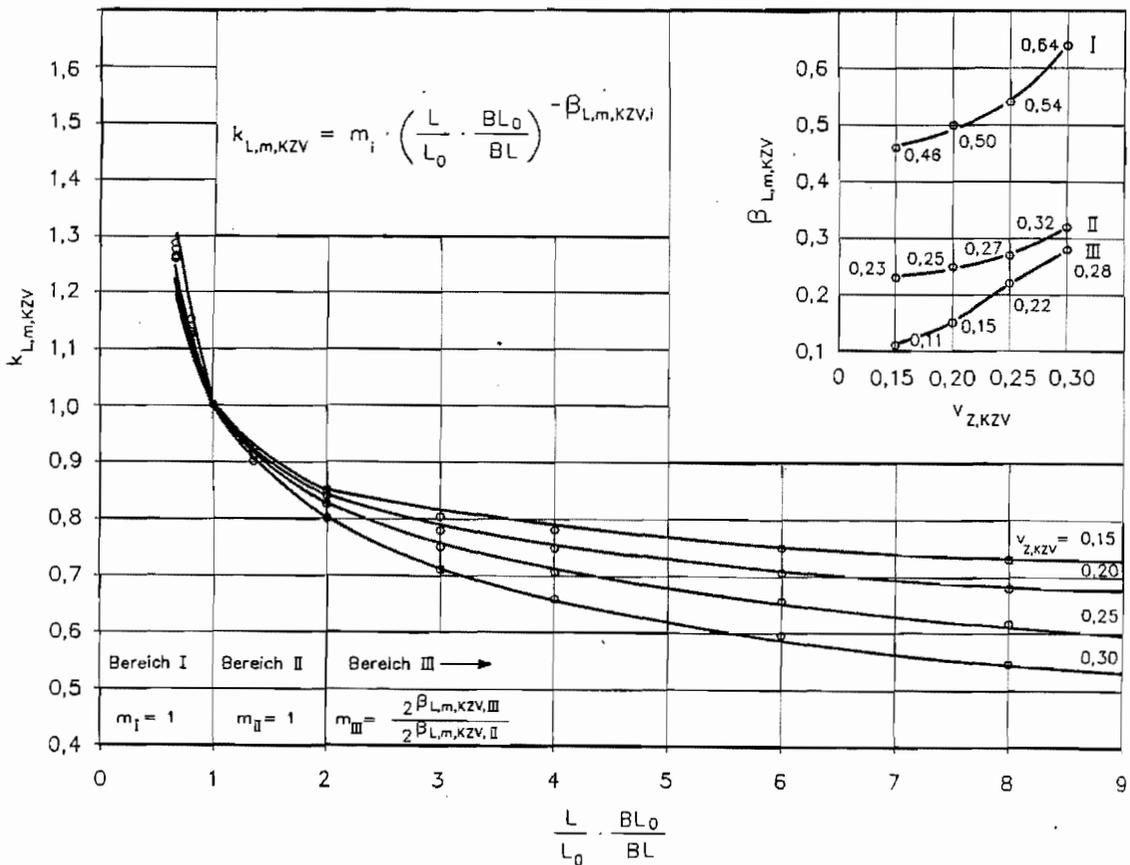


Bild 7.3b: Einfluß der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

Im Falle der mittleren Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen ist für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) < 2$ aus *Bild 7.3b* 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:

$$k_{L,m,KZV} = m_i \cdot \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,m,KZV,i}} \quad (7.6c)$$

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 7.3b* dargestellt.

Ein Vergleich mit *Bild 7.3a* 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 charakteristischen Festigkeitswerte bemerkbar.

7.1.3.2 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(7.6) folgende Beziehungen:

$$k_{H,5,KZV} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,5,KZV}} \quad (7.7a)$$

und

$$k_{H,m,KZV} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,m,KZV}} \quad , \quad (7.7b)$$

wobei H_0 der Höhe des Bezugsträgers ($H_0 = 300 \text{ mm}$) 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 7.4a 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 7.4a 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 7.1.3.1 angepaßten Exponenten $\beta_{H,5,KZV}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ ist ebenfalls in Bild 7.4a dargestellt.

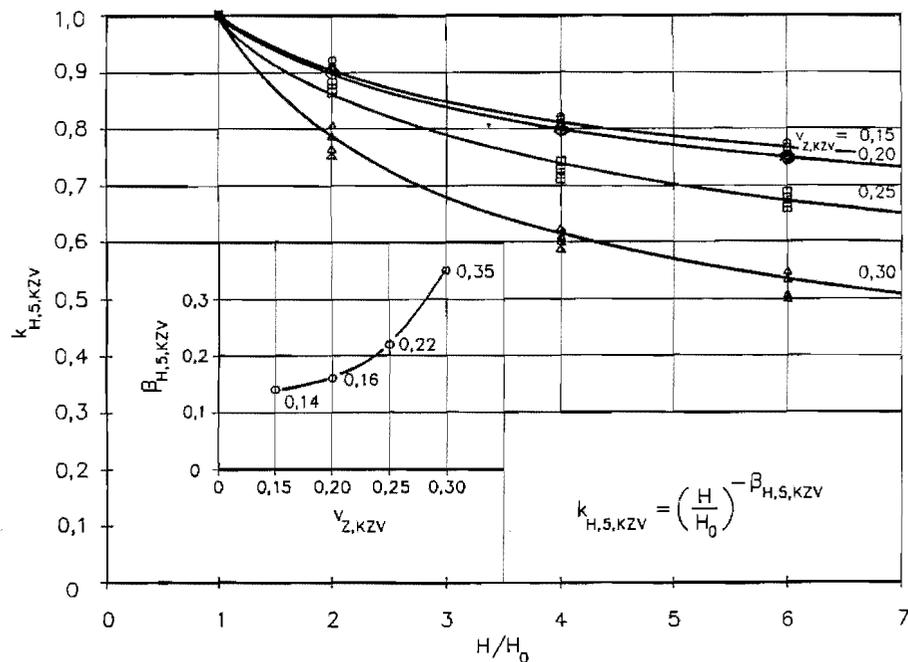


Bild 7.4a: Einfluß der Trägerhöhe auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67/1/2$ und $= 4$

Ein Vergleich mit *Bild 7.3a* 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 *Bild 7.4b* sind die Simulationsergebnisse für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67$ und $= 1$ dargestellt. Die zugehörigen Exponenten $\beta_{H,m,KZV}$ sind in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ ebenfalls angegeben.

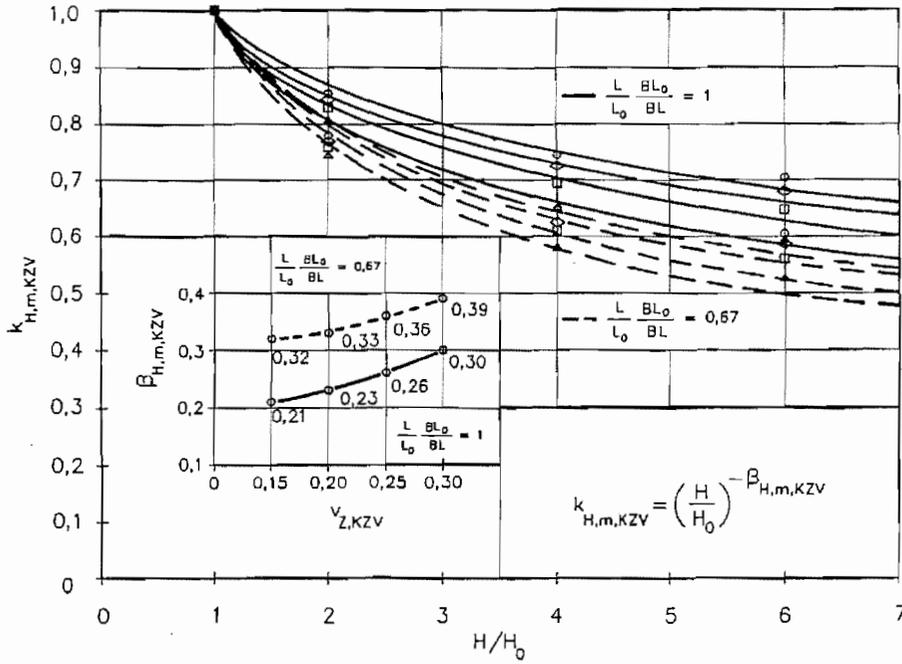


Bild 7.4b: Einfluß der Trägerhöhe auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67$ und $= 1$

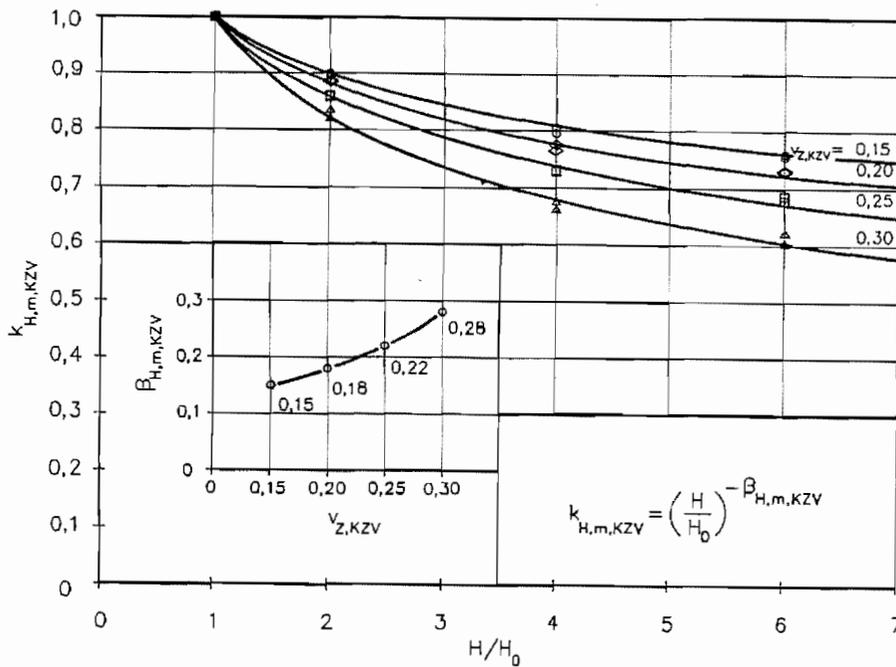


Bild 7.4c: Einfluß der Trägerhöhe auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 2$ und $= 4$

„In *Bild 7.4c* sind die Simulationsergebnisse für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 2$ und $= 4$ dargestellt. Hieraus ist zu erkennen, daß der Höheneinfluß für beide Werte vergleichbar ist, so daß die in diesem Bild dargestellten Ergebnisse für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \geq 2$ verwendet werden können.

Für Werte von $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$, die zwischen den Bereichsgrenzen 0,67/1 und 2 liegen, kann der Faktor $k_{H,m,KZV}$ in ausreichender Näherung mittels linearer Interpolation der Exponenten $\beta_{H,m,KZV}$ bestimmt werden.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß eine Erhöhung der Trägerhöhe in den meisten Fällen auch mit einer Erhöhung der Trägerlänge verbunden ist, dürften für praktische Fälle die Simulationsergebnisse aus *Bild 7.4c* zur Anwendung kommen.

7.1.3.3 Einfluß der Belastungsart

Nach *Weibulls* Spröbruchtheorie 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 [19] mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$k_{F,5,KZV} = \left(\frac{\beta_{F,5,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,5,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,KZV}} \quad (7.8a)$$

und

$$k_{F,m,KZV} = \left(\frac{\beta_{F,m,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,m,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,KZV}} \quad (7.8b)$$

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

In *Bild 7.5a* 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 $= 4$.

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 7.5a* dargestellt.

Ein Vergleich mit *Bild 7.3a* 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 *Bild 7.5b* sind die Simulationsergebnisse für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67$ und $= 1$ dargestellt

Aus diesem Bild ist zu erkennen, daß für diese beiden Fälle der Einfluß der Belastungsart unabhängig vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinkenzugfestigkeit beschrieben werden kann.

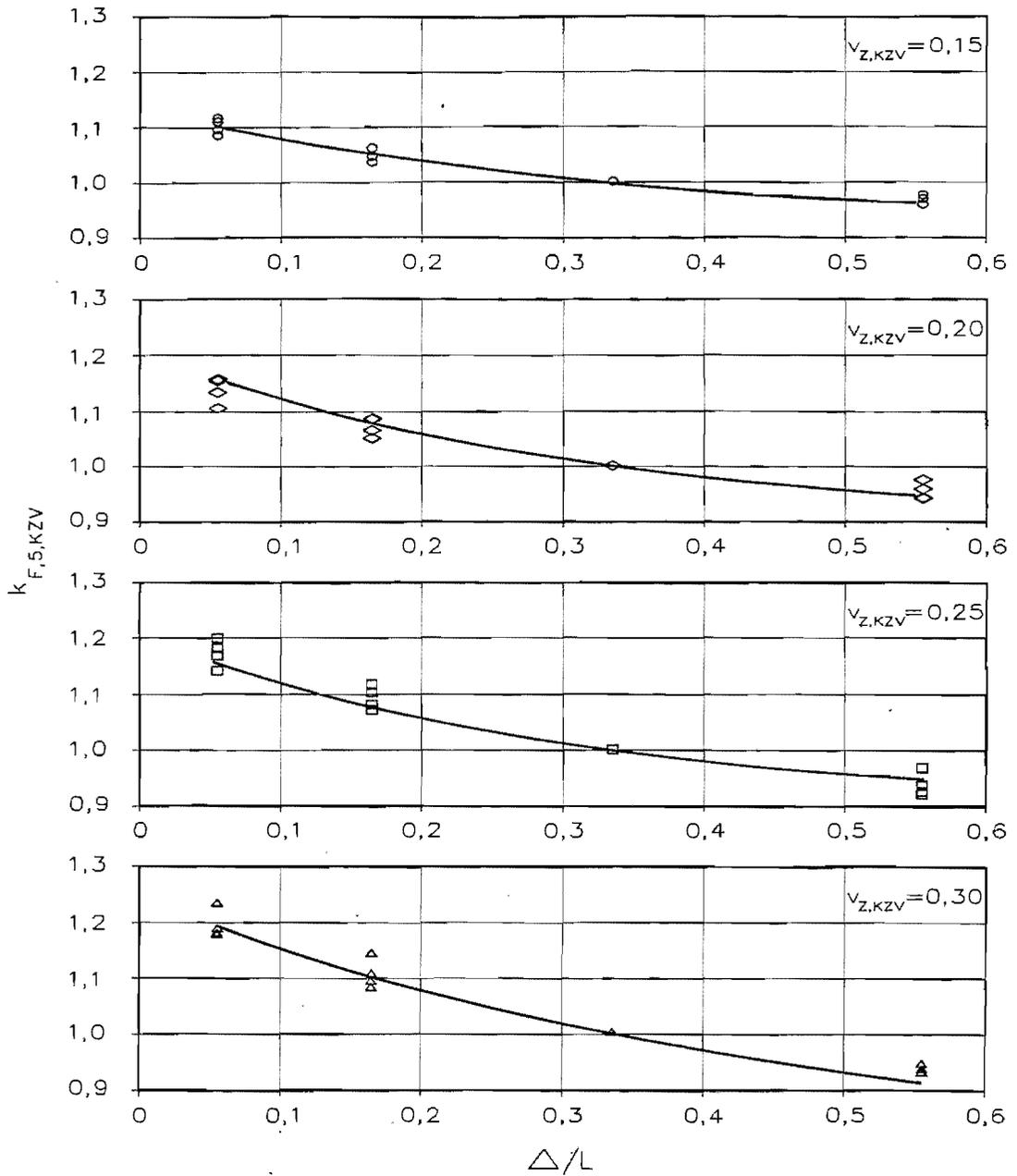
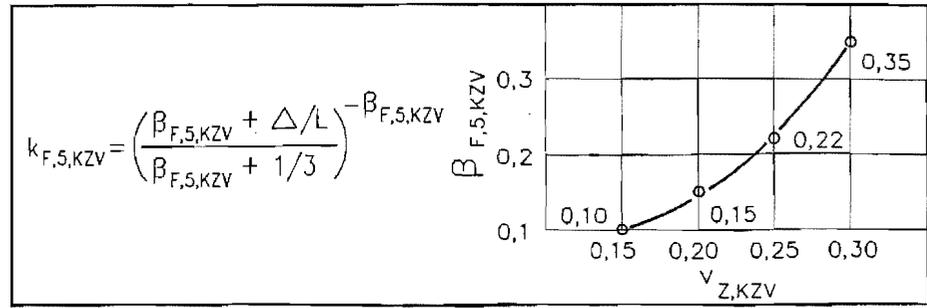


Bild 7.5a: Einfluß der Belastungsart auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67/1/2$ und $= 4$

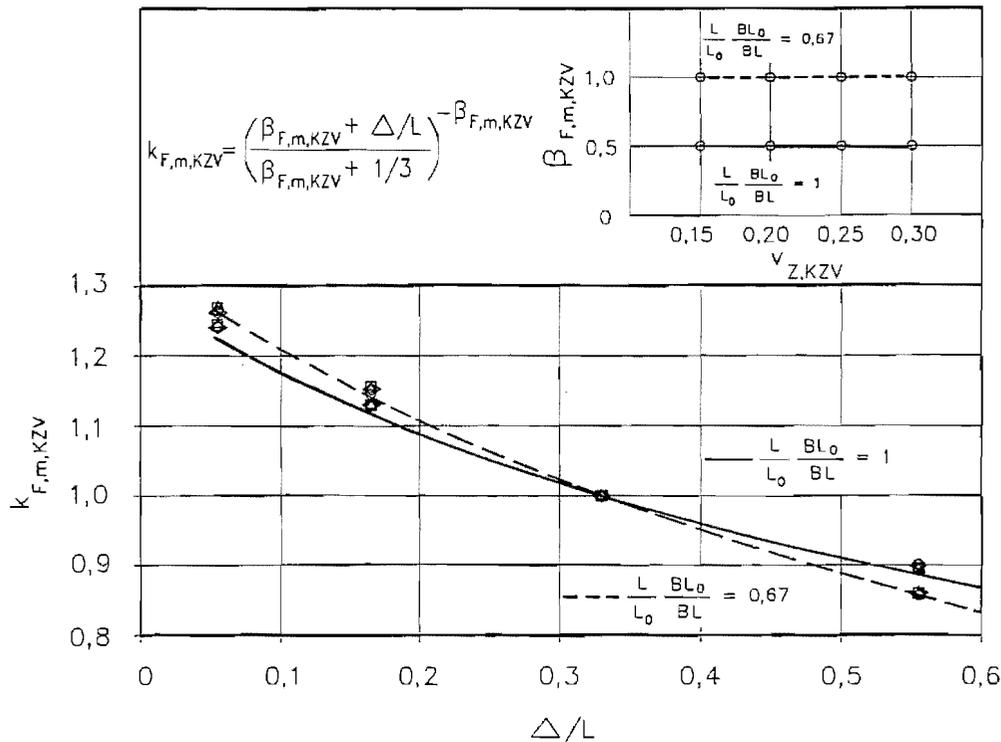


Bild 7.5b: Einfluß der Belastungsart auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 0,67$ und $= 1$

In **Bild 7.5c** sind die Simulationsergebnisse für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 2$ und $= 4$ dargestellt. Der Verlauf der angepaßten Exponenten $\beta_{F,m,KZV}$ in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ der Keilzinken-zugfestigkeit ist ebenfalls in diesen Bildern angegeben.

Aus **Bild 7.5c** ist zu erkennen, daß der Einfluß der Belastungsart für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 2$ und $= 4$ gleich ist, so daß die hier dargestellten Ergebnisse für $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) \geq 2$ anwendbar sind.

Weiterhin zeigt ein Vergleich mit **Bild 7.3b**, daß dann der Einfluß der Belastungsart mit den gleichen Exponenten beschrieben werden kann wie der Längeneffekt.

Für Werte von $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL)$ die zwischen den Bereichsgrenzen 0,67/1 und 2 liegen, kann der Faktor $k_{F,m,KZV}$ wiederum in ausreichender Näherung mittels linearer Interpolation der Exponenten $\beta_{F,m,KZV}$ bestimmt werden.

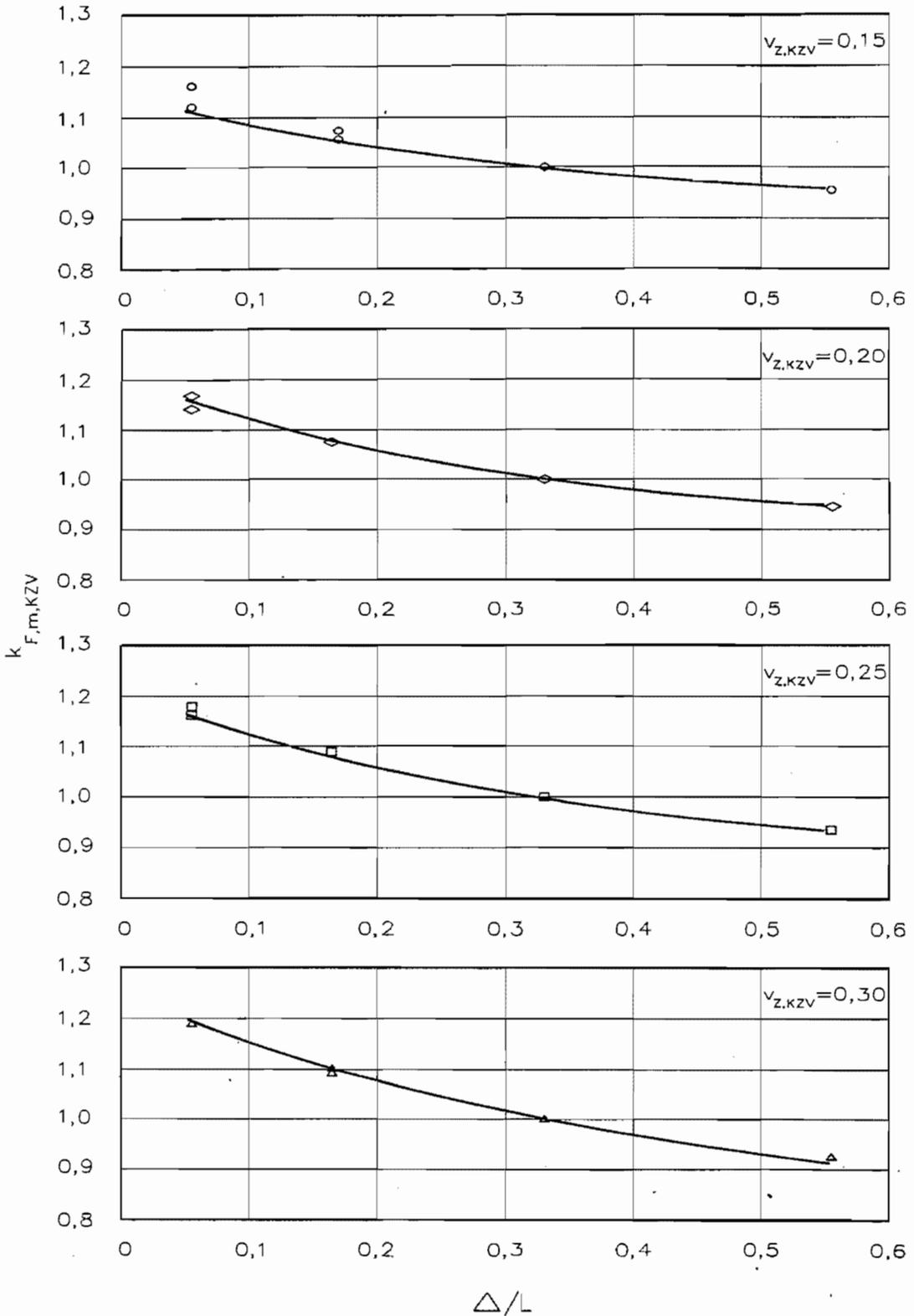
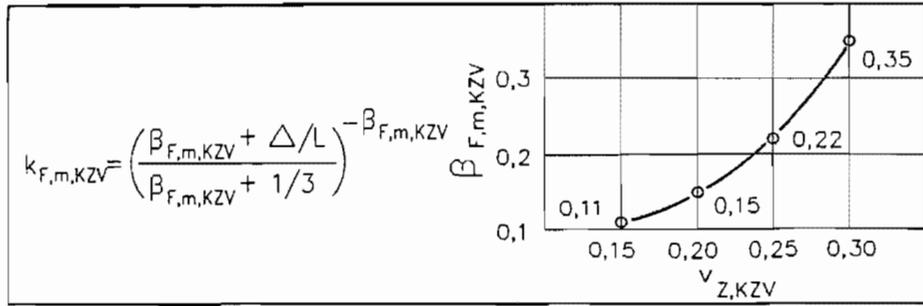


Bild 7.5c: Einfluß der Belastungsart auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen; $(L/L_0) \cdot (BL_0/BL) = 2$ und $= 4$

7.1.4 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 Sprödbrechungskriteriums 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.

Da es aufgrund der in *Kapitel 3* beschriebenen Abhängigkeit zwischen der Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen und den Holzeigenschaften der Bretter nicht möglich ist, einen festen Wert für die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen anzugeben, 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 berechnet. Diese Werte wurden auf der Grundlage von *Gl(5.4)* und *Gl(5.11)* mit Hilfe von jeweils 1000 Simulationen berechnet. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 7.1* und *Tabelle 7.2* angegeben.

Aufgrund der logarithmischen Regressionsgleichungen sind die simulierten Festigkeitsverteilungen ebenfalls log-normalverteilt. Infolge der positiven Schiefe dieser Verteilungen liegen die 5%-Fraktilen, die unter Annahme einer Normalverteilung mit den Variationskoeffizienten der Stichproben berechnet werden, unter den in *Tabelle 7.1* und *7.2* angegebenen Werten, die den "abgezählten" 5%-Fraktilwerten entsprechen. Da aber die bisherigen Simulationsrechnungen unter der Annahme einer normalverteilten Keilzinkenzugfestigkeit erfolgten, sind in *Tabelle 7.1* und *7.2* die Variationskoeffizienten $v_{Z,KZV}$ angegeben, die sich nach *Gl(7.1)* für eine durch die 5%-Fraktilen und den Mittelwert "hineingezwängte" Normalverteilung ergeben.

Tabelle 7.1: Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm²] 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 7.2: Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm²] 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 eine mittlere Keilzinken-zugfestigkeit von $f_{Z,m,KZV} = 35,0$ N/mm² bei einer zugehörigen 5%-Fraktile von 23,4 N/mm² und einem Variationskoeffizienten von $v_{Z,KZV} = 0,20$.

Die Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen wurden anhand von Zugversuchen mit insgesamt 239 keilgezinkten Brettabschnitten ermittelt, die nach zufälligen Gesichtspunkten aus der laufenden Produktion von 18 deutschen Leimbaubetrieben entnommen wurden (siehe EHLBECK et al. [29]).

Hierbei wurden an die Holzeigenschaften der miteinander verbundenen Bretter keine besonderen Anforderungen gestellt, so daß die jeweiligen Stoßhälften z.T. beträchtliche Unterschiede bzgl. Rohdichte und Elastizitätsmodul aufwiesen. Die ermittelten Regressionsgleichungen gelten somit streng genommen nur für beliebig zusammengesetzte Keilzinkenverbindungen.

Werden jedoch bestimmte Mindestanforderungen an die Holzeigenschaften der Brettlamellen gestellt, so ist es möglich, daß das Tragverhalten dieser "homogeneren" Keilzinkenverbindungen nicht mehr vollständig mit Hilfe der o.a. Regressionsgleichungen beschrieben werden kann. Die vorliegenden Regressionsgleichungen ermöglichen es jedoch, die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern, die nach bestimmten Kriterien aufgebaut sind, zumindest in erster Näherung abzuschätzen.

Bei den in *Kapitel 8* 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 7.1 und 7.2* angegeben.

7.2 Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen

7.2.1 Allgemeines

In *Abschnitt 7.1* 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.

Wie in *Abschnitt 5.1.1* bereits beschrieben, 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 Brettschichtholzträgers 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 Brettschichtholzträger durch das Verleimen der einzelnen Brett lamellen unterbunden. Die so ermittelten Zugfestigkeiten von Brett lamellen sind daher nicht auf die Verhältnisse in einem Brettschichtholzträger übertragbar. Da bisher nur sehr grobe Angaben über

diesen Einfluß der Prüfmethode vorliegen (siehe z.B. EHLBECK/COLLING [31]), ist es kaum möglich, die "freie" Zugfestigkeit auf eine "behinderte" Zugfestigkeit (ohne seitliche Verformungen) umzurechnen.

Daher wird im Rahmen dieser Arbeit die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul der Brettlamellen 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 Wahl des Trägeraufbaus erfolgte auf der Grundlage der im *Anhang 4* dargestellten Untersuchungen über den Einfluß der Anzahl der Decklamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern.

Diese Untersuchungen bestätigten auch die in *Kapitel 4* beschriebene 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(4.2)* zum Zeitpunkt des Versagens gewählt. Für den Fall, daß sämtliche Lamellen die an die Decklamellen gestellten Anforderungen erfüllen, ist diese effektive Biegerandspannung $e\sigma$ mit der rechnerischen Biegespannung $\sigma = M/W$ identisch.

In Anlehnung an *Abschnitt 7.1* ergeben sich zur Bestimmung der charakteristischen und der mittleren Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen folgende Beziehungen:

$$x_{5,\text{Holz}} = k_{L,5,\text{Holz}} \cdot k_{H,5,\text{Holz}} \cdot k_{F,5,\text{Holz}} \cdot x_{5,\text{Holz}}^0 \quad (7.9a)$$

und

$$m_{\text{Holz}} = k_{L,m,\text{Holz}} \cdot k_{H,m,\text{Holz}} \cdot k_{F,m,\text{Holz}} \cdot m_{\text{Holz}}^0 \quad (7.9b)$$

Hierbei sind

$x_{5,\text{Holz}}$	=	5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit der
und m_{Holz}		Träger mit Holzversagen,
$x_{5,\text{Holz}}^0$	=	5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des
und m_{Holz}^0		Standardträgers (in Abhängigkeit von den
		Holzeigenschaften der Brettlamellen),
$k_{L,5,\text{Holz}}$	=	Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
und $k_{L,m,\text{Holz}}$		Trägerlänge,
$k_{H,5,\text{Holz}}$	=	Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
und $k_{H,m,\text{Holz}}$		Trägerhöhe,
$k_{F,5,\text{Holz}}$	=	Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
und $k_{F,m,\text{Holz}}$		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.

7.2.2 Einfluß der Holzeigenschaften

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

In Tabelle 7.3 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(7.1)* für eine durch die 5%-Fraktile und den Mittelwert "hineingezwängte" Normalverteilung ergibt.

Tabelle 7.3: 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^0_{Holz}	49,9	46,6	43,3	39,3
$x^0_{5,\text{Holz}}$	39,0	36,2	32,9	28,9
v^0_{Holz}	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 Brettlamellen strengere Anforderungen gestellt werden.

Für den Fall einer rein maschinellen Holzsortierung nach der Brettroh-dichte bzw. dem Brettelastizitätsmodul sind die Simulationsergebnisse für einige Bereiche dieser Holzeigenschaften in *Tabelle 7.4* bzw. *Tabelle 7.5* angegeben. Bei diesen Berechnungen wurde an die Ästigkeit der Bretter keine besonderen Anforderungen gestellt (KAR ≤ 0,50).

Tabelle 7.4: Biegefestigkeit [N/mm²] 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^0_{Holz}	38,3	41,2	44,4	47,9	51,5
$x^0_{5,\text{Holz}}$	29,2	31,7	34,3	37,3	40,6
v^0_{Holz}	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13

Auch hier ist zu erkennen, daß die Tragfähigkeit der Brettschichtholzträger mit besser werdenden Holzeigenschaften zunimmt. Ein Vergleich mit *Tabelle 7.3* 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 Brettrohndichte.

Tabelle 7.5: 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 unter Berücksichtigung der "Klassengrenzen" nach *Tabelle 7.3* bis *7.5* in *Tabelle 7.6a-c* und *Tabelle 7.7a-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. Dies ist darauf zurückzuführen, daß, entsprechend den Untersuchungen von *Glos*, der Elastizitätsmodul enger mit der Festigkeit von Brettabschnitten korreliert ist als die Rohdichte, so daß die Festigkeit stärker auf Veränderungen des Elastizitätsmoduls reagiert als auf Veränderungen der Rohdichte.

Tabelle 7.6a: 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 7.6b: 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 7.6c: 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

Tabelle 7.7a: 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

Tabelle 7.7b: 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

Tabelle 7.7c: Variationskoeffizient v_{Holz}^0 in Abhängigkeit vom größten KAR - Wert und der Darr - Rohdichte ρ_0 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 8* beschriebenen Trägerversuchen zur Überprüfung des theoretischen Modells wurden an die äußeren Decklamellen verschiedene Anforderungen bzgl. der Holzeigenschaften gestellt. In *Tabelle 7.8* 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 7.8: 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

7.2.3 Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart

In *Abschnitt 7.1.3* 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 7.3 bis 7.8* 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 Brettlamellen 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 7.2.2* ein Variationskoeffizient von 0,13 ermittelt, so daß er geeignet ist, den Volumeneffekt "im Mittel" gut zu beschreiben.

7.2.3.1 Einfluß der Trägerlänge

In Anlehnung an *Abschnitt 7.1.3.1* ergeben sich für die Faktoren $k_{L,5,Holz}$ und $k_{L,m,Holz}$ zur Beschreibung des Längeneffektes folgende Beziehungen:

$$k_{L,5,Holz} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,5,Holz}} \quad (7.10a)$$

und

$$k_{L,m,Holz} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,m,Holz}} \quad , \quad (7.10b)$$

wobei L der Länge eines beliebigen Trägers und L_0 der Länge des Standardträgers nach *Bild 7.1* 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 7.6a* und *Bild 7.6b* ist der Verlauf der Faktoren $k_{L,5,Holz}$ und $k_{L,m,Holz}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis L/L_0 dargestellt. In diesen Bildern sind auch die Exponenten $\beta_{L,5,Holz}$ und $\beta_{L,m,Holz}$ angegeben, mit deren Hilfe die Simulationsergebnisse am besten beschrieben werden können.

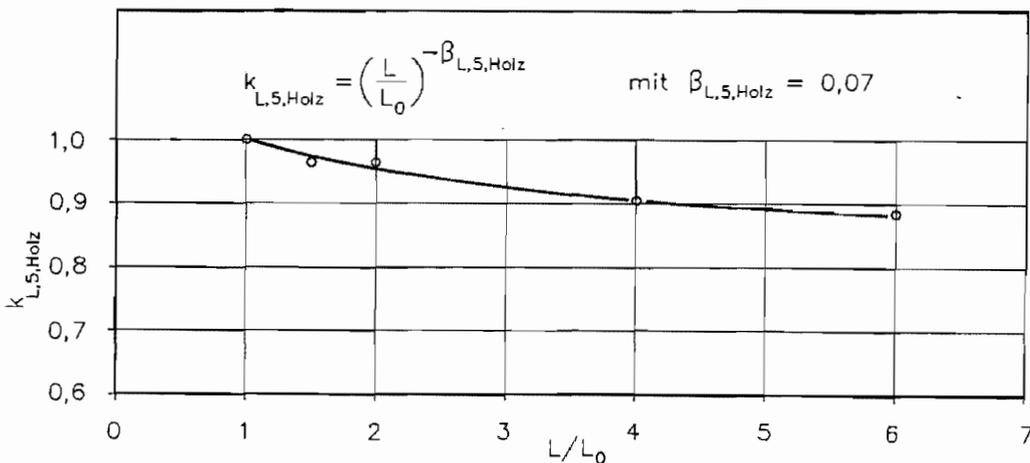


Bild 7.6a: Einfluß der Trägerlänge auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

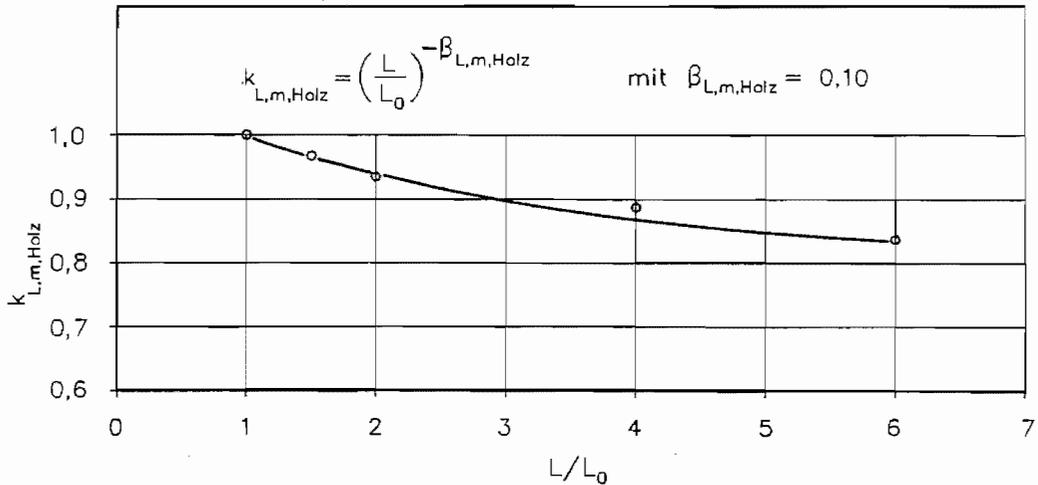


Bild 7.6b: Einfluß der Trägerlänge auf den Mittelwert der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

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 7.3a und 7.3b 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.

7.2.3.2 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(7.7) folgende Beziehungen:

$$k_{H,5,Holz} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,5,Holz}} \quad (7.11a)$$

und

$$k_{H,m,Holz} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,m,Holz}} \quad (7.11b)$$

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

In *Bild 7.7a* und *Bild 7.7b* 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.

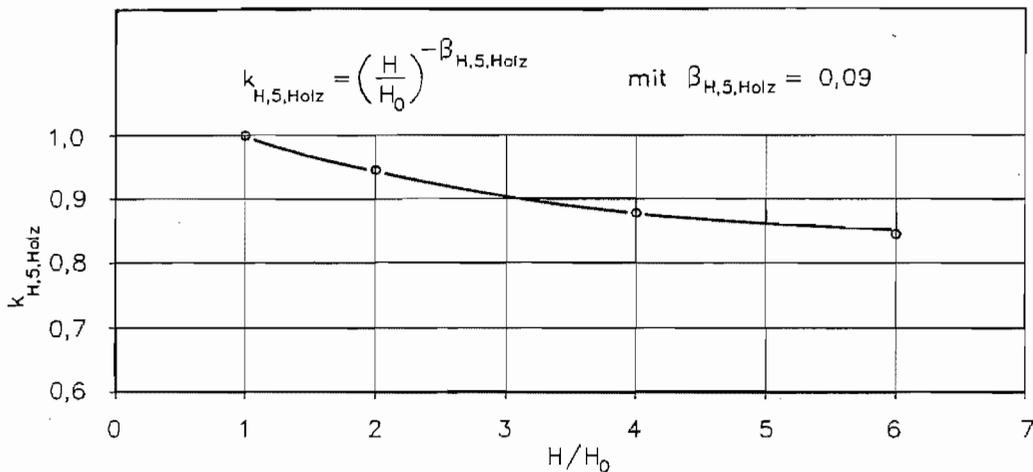


Bild 7.7a: Einfluß der Trägerhöhe auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

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 7.6a* und *7.6b* 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 7.1.3.2* für Träger mit Keilzinkenversagen festgestellt, bei denen der Variationskoeffizient der Keilzinkenzugfestigkeit unter 0,2 lag.

Ein Vergleich mit den *Bildern 7.4a-c* 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.

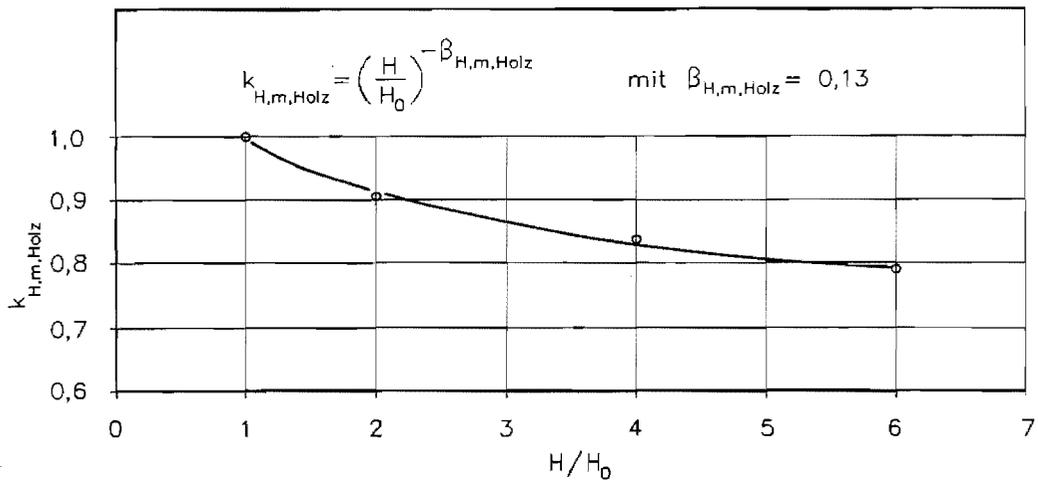


Bild 7.7b: Einfluß der Trägerhöhe auf den Mittelwert der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

7.2.3.3 Einfluß der Belastungsart

In Anlehnung an Gl(7.8) 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:

$$k_{F,5,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,5,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,5,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,Holz}} \quad (7.12a)$$

und

$$k_{F,m,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,m,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,m,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,Holz}} \quad , \quad (7.12b)$$

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

In **Bild 7.8a** und **Bild 7.8b** ist der Verlauf der Faktoren $k_{F,5,Holz}$ und $k_{F,m,Holz}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis Δ/L dargestellt.

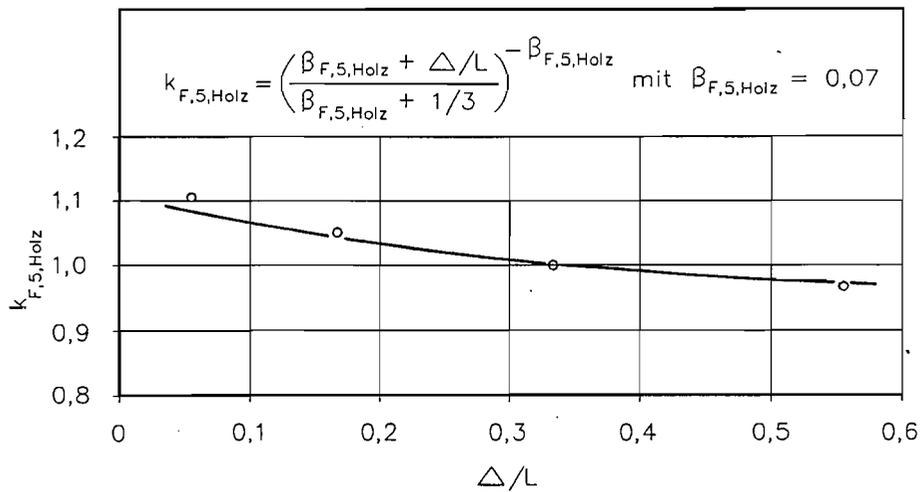


Bild 7.8a: Einfluß der Belastungsart auf die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

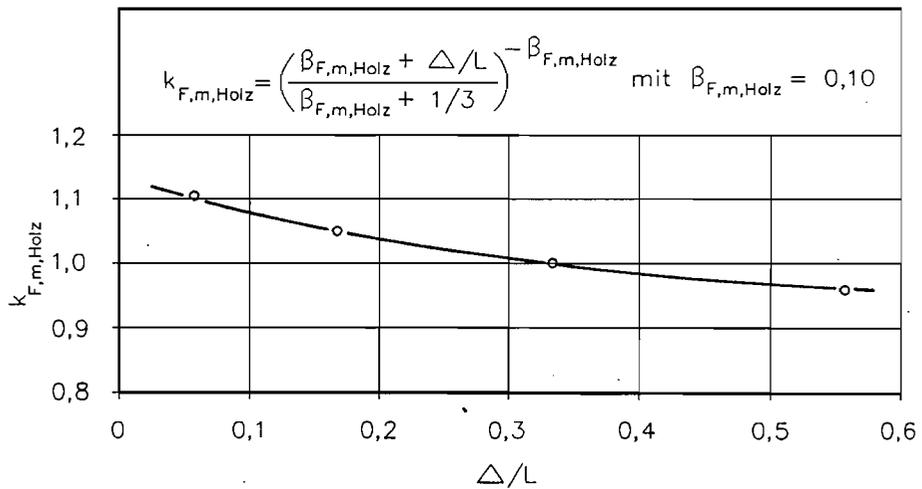


Bild 7.8b: Einfluß der Belastungsart auf den Mittelwert der Biegefestigkeit; Träger mit Holzversagen

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 7.1.3.3* für die Träger mit Keilzinkenversagen festgestellt.

7.3 Zusammenstellung der Simulationsergebnisse

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

7.3.1 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:

$$x_{5,KZV} = k_{L,5,KZV} \cdot k_{H,5,KZV} \cdot k_{F,5,KZV} \cdot x_{5,KZV}^0 \quad (7.3a)$$

und

$$m_{KZV} = k_{L,m,KZV} \cdot k_{H,m,KZV} \cdot k_{F,m,KZV} \cdot m_{KZV}^0 \quad (7.3b)$$

Hierbei sind

- $x_{5,KZV}^0$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers (mit Keilzinkenversagen),
- und m_{KZV}^0
- $k_{L,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
- und $k_{L,m,KZV}$ Trägerlänge,
- $k_{H,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
- und $k_{H,m,KZV}$ Trägerhöhe,
- $k_{F,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der
- und $k_{F,m,KZV}$ Belastungsart.

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

$$v_{KZV} = \frac{1 - x_{5,KZV}/m_{KZV}}{1,645} \quad (7.1)$$

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

$$x_{5,KZV}^0 = k_{0,5,KZV} \cdot f_{Z,5,KZV} \quad (7.2a)$$

und

$$m_{KZV}^0 = k_{0,m,KZV} \cdot f_{Z,m,KZV} \quad (7.2b)$$

Hierbei sind

$f_{Z,5,KZV}$ = 5%-Fraktile und Mittelwert der Keilzinkenzugfestigkeit,
 und $f_{Z,m,KZV}$ keit,
 $k_{0,5,KZV}$ = Faktoren zur Beschreibung der Biegefestigkeit der
 und $k_{0,m,KZV}$ Träger mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit von
 den Festigkeitseigenschaften der Keilzinken-
 verbindungen,

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

$$k_{L,5,KZV} = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,5,KZV}} \quad (7.6a)$$

$$k_{L,m,KZV} = m_i \cdot \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \right)^{-\beta_{L,m,KZV,i}} \quad (7.6c)$$

$$k_{H,5,KZV} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{H,5,KZV}} \quad (7.7a)$$

$$k_{H,m,KZV} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\beta_{H,m,KZV}} \quad (7.7b)$$

$$k_{F,5,KZV} = \left(\frac{\beta_{F,5,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,5,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,KZV}} \quad (7.8a)$$

$$k_{F,m,KZV} = \left(\frac{\beta_{F,m,KZV} + \Delta/L}{\beta_{F,m,KZV} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,KZV}} \quad (7.8b)$$

In Tabelle 7.9a und 7.9b sind alle erforderlichen Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Fraktile $x_{5,KZV}$ und des Mittelwertes m_{KZV} der Biegefestigkeit des Materials "Keilzinkenverbindung" angegeben.

Tabelle 7.9a: 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 7.9b: 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

7.3.2 Träger mit Holzversagen

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

$$x_{5,\text{Holz}} = k_{L,5,\text{Holz}} \cdot k_{H,5,\text{Holz}} \cdot k_{F,5,\text{Holz}} \cdot x_{5,\text{Holz}}^0 \quad (7.9a)$$

und

$$m_{\text{Holz}} = k_{L,m,\text{Holz}} \cdot k_{H,m,\text{Holz}} \cdot k_{F,m,\text{Holz}} \cdot m_{\text{Holz}}^0 \quad (7.9b)$$

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:

$$v_{\text{KZV}} = \frac{1 - x_{5,\text{KZV}}/m_{\text{KZV}}}{1,645} \quad (7.1)$$

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

$$k_{L,5,\text{Holz}} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,5,\text{Holz}}} \quad (7.10a)$$

$$k_{L,m,\text{Holz}} = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\beta_{L,m,\text{Holz}}} \quad (7.10b)$$

$$k_{H,5,\text{Holz}} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,5,\text{Holz}}} \quad (7.11a)$$

$$k_{H,m,\text{Holz}} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{-\beta_{H,m,\text{Holz}}} \quad (7.11b)$$

$$k_{F,5,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,5,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,5,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,5,Holz}} \quad (7.12a)$$

$$k_{F,m,Holz} = \left(\frac{\beta_{F,m,Holz} + \Delta/L}{\beta_{F,m,Holz} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,m,Holz}} \quad (7.12b)$$

Die zur Berechnung der 5%-Fraktile $x_{5,Holz}$ und des Mittelwertes m_{Holz} der Biegefestigkeit erforderlichen Zahlenwerte sind in Tabelle 7.10a und 7.10b angegeben.

Tabelle 7.10a: 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 7.10b: 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

8 Überprüfung des theoretischen Modells mit Hilfe von Trägerversuchen

8.1 Darstellung der Versuche

Zur Überprüfung des in *Kapitel 6* vorgestellten theoretischen Modells wurden im Rahmen dieser Arbeit insgesamt 42 Biegeversuche mit Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Holzgüte durchgeführt. In *Bild 8.1* sind die Abmessungen und die Belastung dieser Träger dargestellt.

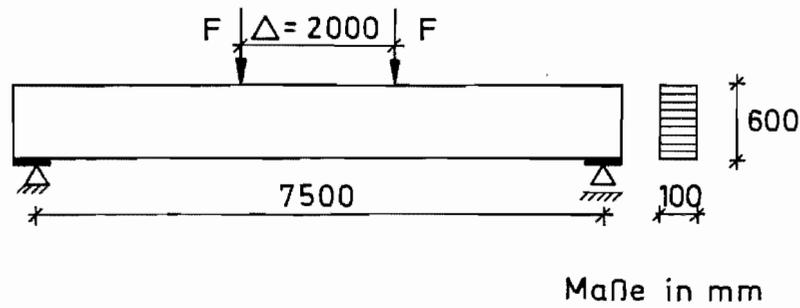


Bild 8.1: Abmessungen und Belastung der Versuchsträger

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 7* ermittelten Faktoren zur Beschreibung des Volumeneffektes auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern möglich war.

Insgesamt wurden 6 Versuchsreihen mit jeweils 7 Trägern geprüft. An die Holzeigenschaften der jeweils drei äußeren Lamellen dieser Träger wurden dabei die in *Tabelle 8.1* angegebenen Anforderungen gestellt.

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 8.1: 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 Brettrohichte wurde mittels Wägung bestimmt, während der mittlere Brett-Elastizitätsmodul mit Hilfe von Längsschwingungen nach GÖRLACHER [45] ermittelt wurde. Dieser dynamische Elastizitätsmodul stimmt sehr gut mit dem nach Gl(5.14) berechneten zusammengesetzten Längs-Elastizitätsmodul eines Brettes überein, so daß die ermittelten Brett-Elastizitätsmoduln direkt, d.h. ohne Umrechnung in das Rechenmodell eingehen können.

In Anlehnung an die in Kapitel 4 und Anhang 4 gemachten Ausführungen wurde von jedem Träger die effektive Biegerandspannung $ef \sigma$ nach Gl(4.2) zum Zeitpunkt des Versagens berechnet.

Für diese effektive Spannung $ef \sigma$ nach Gl(4.2) gilt dabei folgende Beziehung:

$$ef \sigma = k_{\sigma} \cdot \sigma^0 \quad , \quad (8.1)$$

wobei σ^0 der Biegerandspannung nach Gl(4.3) 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 8.2 angegebenen Brett-Elastizitätsmoduln berechnet. Diese Werte wurden anhand von jeweils 1000 simulierten

Brettern mit Hilfe von $Gl(5.14)$ ermittelt und entsprechen den Elastizitätsmoduln, die bei den jeweils gestellten Anforderungen an die Holzeigenschaften im Mittel zu erwarten sind.

Tabelle 8.2: Mittlerer Brett-Elastizitätsmodul

Versuchsreihe	mittlerer Brett - Elastizitätsmodul in 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 8.3 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 $ef \sigma = \sigma^0$ besteht, gibt der Faktor k_σ weiterhin 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 8.3: Faktoren $k_\sigma = ef \sigma / \sigma^0$ zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Lamellen-Elastizitätsmoduln

Versuchsreihe	k_σ
I - III	1,0
IV	1,073
V - VI	1,088

In *Tabelle 8.4a* und *8.4b* sind für jeden Versuchsträger neben der rechnerischen Biegefestigkeit σ^0 auch die zugehörige Spannung $e_f \sigma$ nach *Gl(8.1)* 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" (siehe hierzu auch *Kapitel 3*);
- 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%-Fraktilen möglich war.

Tabelle 8.4a: Versuchsergebnisse; Reihe I, II und III

Träger	σ^0 N/mm ²	= ef σ 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		34,7	
Var. - koeff.		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		38,9	
Var. - koeff.		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		40,3	
Var. - koeff.		0,13	

¹ KZV = Keilzinkenverbindung

Tabelle 8.4b: Versuchsergebnisse; Reihe IV, VI 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	42,9	46,0	
Var. - koef.	0,12	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	43,8	47,7	
Var. - koef.	0,19	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	46,1	50,2	
Var. - koef.	0,13	0,13	

¹ KZV = Keilzinkenverbindung

8.2 Prognosen des theoretischen Modells

In diesem Abschnitt werden die Tragfähigkeiten der geprüften Trägertypen mit Hilfe des in *Kapitel 6* 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 7.3* 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:

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

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

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

Um die Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen möglichst zuverlässig abschätzen zu können, wurden an dem Tag, an dem die Versuchsträger hergestellt wurden, insgesamt 15 keilgezinkte Brettabschnitte entnommen und deren Biegefestigkeit in Anlehnung an *Abschnitt 3.2.1* ermittelt. In *Tabelle 8.5* sind die Versuchsergebnisse den entsprechenden Werten aller Proben aus *Tabelle 3.1* gegenübergestellt.

Tabelle 8.5: Vergleich der Holzeigenschaften und der Biegefestigkeiten der am Herstellungstag der Brettschicht-holzträger 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 <i>Tabelle 3.1</i>)	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 Keilzinken-zugfestigkeit 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 8.6a und 8.6b angegeben. 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 8.6a: 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 8.6b: 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 7.1.4* angegeben

Nimmt man jedoch an, daß alle Träger aufgrund eines Holzversagens zu Bruch gehen, so sind die in Tabelle 8.7a und 8.7b angegebenen Festigkeitswerte $x_{5,\text{Holz}}$ und m_{Holz} zu erwarten.

Tabelle 8.7a: Berechnung der 5% - Fraktile $x_{5,\text{Holz}}$

Versuchsreihe	$x_{5,\text{Holz}}^0$ 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 8.7b: Berechnung der mittleren Biegefestigkeit m_{Holz} sowie des Variationskoeffizienten v_{Holz}

Versuchsreihe	m_{Holz}^0 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 6* beschriebenen "Mischverfahrens" abgeschätzt werden.

In *Tabelle 8.8* sind der vom theoretischen Modell erwartete Medianwert σ_{50} (= Mittelwert) und die zugehörige 5%-Fraktile σ_5 der Biegefestigkeit jeder Versuchsreihe angegeben. Diese Werte wurden auf der Grundlage der in den *Tabellen 8.6a-b* und *8.7a-b* angegebenen Werten mit Hilfe der *Bilder 6.2* und *6.3* 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 8.8: 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_1^1 Versuch 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 8.4a-b*

Weiterhin wurde mit Hilfe von *Gl(6.9)* die für jede Versuchsreihe zu erwartende Auftretenshäufigkeit eines Keilzinkenversagens abgeschätzt. In *Tabelle 8.9* sind die berechneten Prozentzahlen angegeben.

Tabelle 8.9: 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 8.8* und *8.9* 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 Brett lamellen 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 8.8* ist zu erkennen, daß bei kleiner werdender Ästigkeit der Brett lamellen die 5%-Fraktile 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%-Fraktile 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%-Fraktilwerte 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.

8.3 Vergleich zwischen Versuch und Rechnung

In Bild 8.2 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.

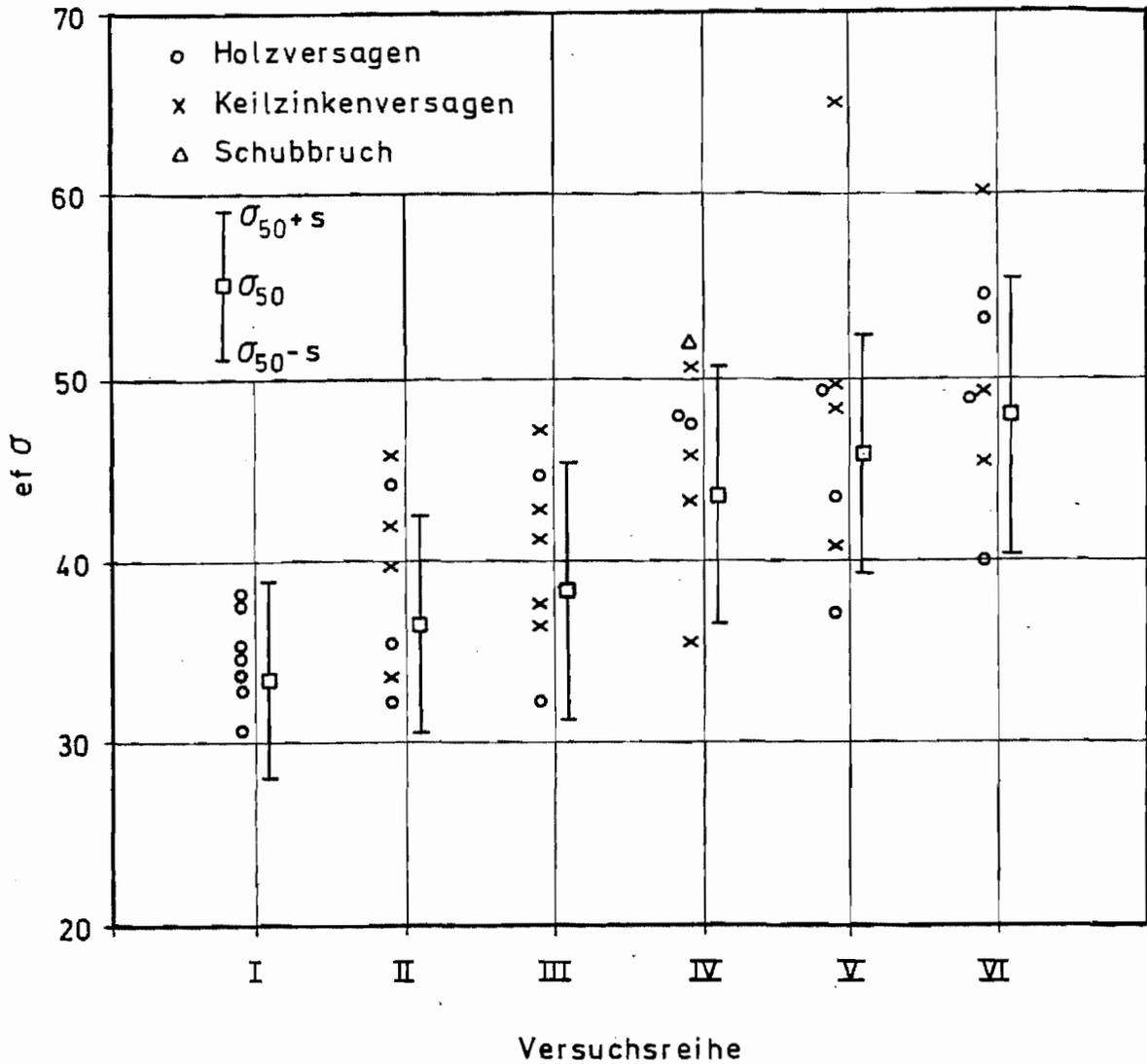


Bild 8.2: Vergleich zwischen den Versuchswerten und den Rechenergebnissen

Diese gute Übereinstimmung über den gesamten Tragfähigkeitsbereich wird auch in Bild 8.3 deutlich, in dem die im Versuch ermittelten mittleren Biegefestigkeiten ($ef \sigma$) den zugehörigen erwarteten Medianwerten 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.

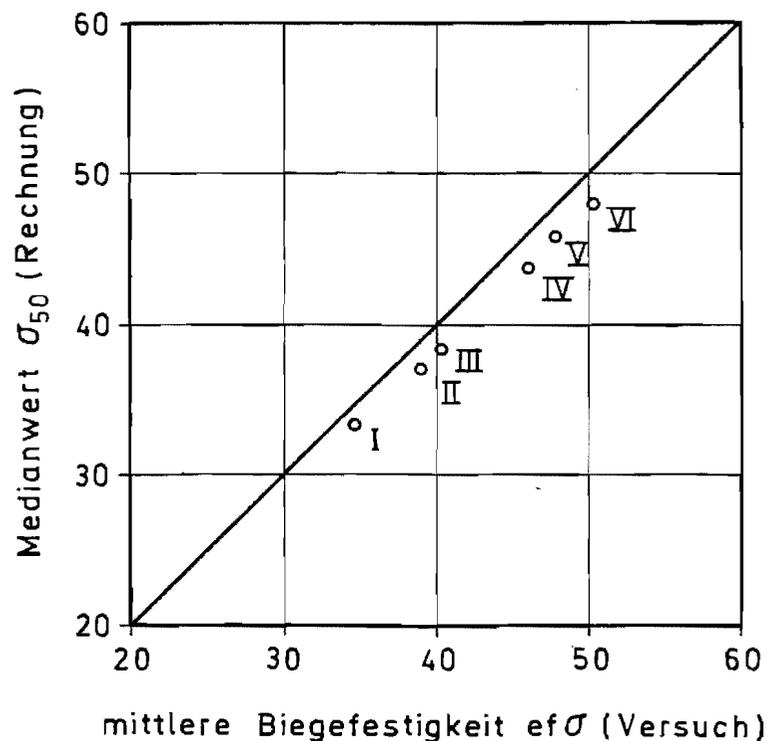


Bild 8.3: Vergleich zwischen den Versuchswerten und den Rechenergebnissen (Mittelwerte)

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 Sprödbbruchkriterium zugrundegelegt (siehe *Abschnitt 7.1.1*). 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 unbeeinträchtigt, denn dieser Wert wird in der Hauptsache von solchen

- Trägern bestimmt, bei denen die Keilzinkenverbindungen in der äußeren Zuglamelle im hochbeanspruchten Bereich auftreten und das angenommene Sprödbruchverhalten 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.

Diese Ausführungen zeigen, daß es möglich ist, die festgestellte systematische Unterschätzung der Biegefestigkeit der Versuchsträger zu erklären. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß diese Abweichungen nur gering sind und zudem auf der sicheren Seite liegen.

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

Insgesamt gesehen kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung festgestellt werden, sodaß das in *Kapitel 6* beschriebene theoretische Modell - aufbauend auf den Simulationsrechnungen des in *Kapitel 5* beschriebenen Rechenmodells - das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern unterschiedlicher Güte und Trägerabmessungen treffend erfaßt.

9 Bemessungsvorschlag

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 erwies sich bei fünf der sechs untersuchten Trägertypen die Keilzinkenverbindung als das schwächere Material mit der geringeren 5%-Fraktile. Die zugehörigen Mittelwerte der Biegefestigkeit lagen hingegen nur in zwei Fällen unter den entsprechenden Werten der Träger mit Holzversagen.

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 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%-Fraktile 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 somit in Anlehnung an *Gl(7.2a)* und *Tabelle 9.a* folgende Beziehung:

$$\sigma_5^0 = 1,20 \cdot f_{Z,5,KZV} \quad , \quad (9.1)$$

wobei $f_{Z,5,KZV}$ der charakteristischen Keilzinkenzugfestigkeit mit einem Variationskoeffizienten von $v_{Z,KZV} = 0,2$ entspricht. Dieser Wert wurde auf der Grundlage der in *Abschnitt 7.1.4* beschriebenen Simulationsrechnungen gewählt.

Für diesen Variationskoeffizienten kann der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in ausreichender Näherung mit nur einem einzigen Exponenten beschrieben werden ($\beta_{L,5,KZV} = \beta_{F,5,KZV} = 0,15 \approx \beta_{H,5,KZV} = 0,16$). Somit ergibt sich in Anlehnung an *Gl(7.3a)*, *Gl(7.6a)* und *Gl(7.7a)* folgende Beziehung zur Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit σ_5 eines beliebigen Brettschichtholzträgers:

$$\sigma_5 = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{BL_0}{BL} \cdot \frac{H}{H_0} \right)^{-0,15} \cdot k_F \cdot \sigma_5^0 \quad . \quad (9.2)$$

Hierbei sind für L bzw. H die Länge bzw. die Höhe des betrachteten Trägers und für BL die mittlere Länge der eingebauten Bretter einzusetzen, während $L_0 = 5400$ mm, $H_0 = 300$ mm und $BL_0 = 4000$ mm den zugehörigen Werten des Standardträgers entsprechen. Da aber die in einem Brettschichtholzträger auftretenden Brettlängen von Firma zu Firma unterschiedlich und somit 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 jedoch mit einem Wert von $BL_0/BL \approx 1$ gerechnet werden, während der Einfluß der Brettlänge im Falle einer (visuellen) Holzsortierung, bei der einzelne Schwachstellen (große Äste) herausgeschnitten und die Bretter an diesen Stellen wieder keilgezinkt werden, mit einem pauschalen Abminderungsbeiwert von z.B. $(BL_0/BL \approx 4/3)^{-0,15} \approx 0,95$ berücksichtigt werden könnte.

Für den Faktor k_F zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart kann keine allgemeingültige Gleichung angegeben werden. Die in *Gl(7.8a und b)* angegebenen Beziehungen beschränken sich auf den Fall von zwei aufgetragenen 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 [19], [20] 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 $\beta = 0,15$ 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.

Die Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit σ_5 eines beliebigen Brettschichtholzträgers kann somit auf der Grundlage der 5%-Fraktile σ_5^0 des Bezugsträgers erfolgen, wobei der Einfluß der Trägergröße und der Belastungsart in bekannter Weise mit einem "Weibull-Exponenten" von $\beta = -0,15$ erfaßt werden kann.

Bei der Bemessung von Brettschichtholzbauteilen ist allerdings 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 (z.B. nach Gl(4.2)) erfolgen, weil nur diese mit den hier ermittelten Festigkeitswerten vergleichbar ist. In solchen Fällen werden nämlich bei der näherungsweisen Bestimmung der größten Biegerandspannung mit $\sigma = M/W$ die in der äußeren Lamelle tatsächlich auftretenden Spannungen unterschätzt.

Bei dem hier vorgeschlagenen Bemessungskonzept wird die charakteristische Biegefestigkeit des Bezugsträgers ausschließlich mit Hilfe der charakteristischen Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen und dem Variationskoeffizienten der zugehörigen Festigkeitsverteilung beschrieben, die ihrerseits maßgeblich von den Holzeigenschaften Rohdichte und Elastizitätsmodul der Brettlamellen bestimmt werden.

Da aber noch keine Grenzwerte dieser Holzeigenschaften für eine maschinelle Holzsortierung bekannt sind, können im Rahmen dieser Arbeit keine konkreten Vorschläge für Festigkeitsklassen von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von der jeweils zu erwartenden Keilzinkenfestigkeit gemacht werden. Lediglich für den Fall der z.Zt. praktizierten rein visuellen Holzsortierung kann die im Mittel erwartete

charakteristische Biegefestigkeit des Bezugsträgers mit aufgebrachtter Streckenlast mit

$$\begin{aligned}\sigma_5^0 &= 1,04 \cdot 1,20 \cdot 23,4 \\ &= 29,2 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

angegeben werden (siehe hierzu auch *Abschnitt 7.1.4*).

Im Rahmen eines Bemessungskonzeptes ist es aber möglich, einen beliebigen Wert für die charakteristische Biegefestigkeit σ_5^0 des Bezugsträgers festzulegen. Mit Hilfe von *Gl(9.1)* kann dann die charakteristische Keilzinkenzugfestigkeit bestimmt werden, die mindestens erforderlich ist, um den gewünschten Bemessungswert zu gewährleisten.

In diesem Fall müssen die Leimbaubetriebe, die einen Brettschichtholzträger mit vorgegebener charakteristischer Biegefestigkeit herstellen wollen, nachweisen, daß die 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 bzw. 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 der Keilzinkenverbindungen, so kann deren Zugfestigkeit mit Hilfe von Biegeversuchen an keilgezinkten Brettabschnitten abgeschätzt werden.

Die Bestimmung der Keilzinkenbiegefestigkeit könnte hierbei in Anlehnung an das in *Abschnitt 3.2.1* beschriebene Prüfverfahren erfolgen, so daß es möglich wäre, die erforderlichen Versuche in den

Leimbaubetrieben selbst durchzuführen, so wie das bereits in einigen Betrieben im Zuge der Eigenüberwachung praktiziert wird.

Mit Hilfe einer solchen Eigenüberwachung und einer ständigen Fremdüberwachung zur Überprüfung der Firmenergebnisse ist es möglich festzustellen, ob die geforderten Werte der charakteristischen Keilzinkenbiegefestigkeit eingehalten werden.

Auf der Grundlage der in *Kapitel 3* beschriebenen Biegeversuche und der in *Abschnitt 7.1* erwähnten 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 [78] mit keilgezinkten Furnierschichtholzproben mittlere Zugfestigkeiten, die nur etwa 21 - 28% unter den mittleren Biegefestigkeiten lagen, und auch JOHANSSON [52], [53] 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.

Im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens¹ sind systematische Untersuchungen über das Verhältnis Zug-/Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen (auch in Abhängigkeit der Holzeigenschaften der

¹ Ehlbeck, J.; Colling, F.: Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen im Hinblick auf Normungsvorschläge, Forschungsvorhaben der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau der Universität Karlsruhe.

Brettlamellen) geplant, so daß gesicherte Daten erst nach Abschluß dieses Projektes vorliegen werden.

Um jedoch das hier vorgestellte Bemessungskonzept zu vervollständigen, wird, in Anlehnung an die bisher durchgeführten Untersuchungen, für das Verhältnis der 5%-Fraktilen mit einem vorläufigen Wert von 0,70 gerechnet (Verhältnis der Mittelwerte $\approx 0,75$).

Somit ergibt sich, in Anlehnung an *Gl(9.1)* mit $k_F = 1,04$, die charakteristische Biegefestigkeit σ_5^0 des Standardträgers unter Gleichstreckenlast in Abhängigkeit von der charakteristischen Biegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ der Keilzinkenverbindungen zu:

$$\begin{aligned}\sigma_5^0 &= 1,04 \cdot 1,20 \cdot 0,70 \cdot f_{B,5,KZV} & (9.4) \\ &= 0,874 \cdot f_{B,5,KZV}\end{aligned}$$

Aus dieser Gleichung geht hervor, daß zur Gewährleistung einer festgelegten charakteristischen Biegefestigkeit σ_5^0 der Brettschichtholzträger eine etwa 15% höhere charakteristische Biegefestigkeit $f_{B,5,KZV}$ der Keilzinkenverbindungen erforderlich ist.

Diese Tendenz stimmt gut mit den Untersuchungsergebnissen von JOHANSSON [54] überein, der auf der Grundlage von zahlreichen Versuchen eine ähnliche Beziehung feststellte (0,8 anstelle von 0,874) und die von EHLBECK/COLLING [31] vorgeschlagene Gleichung zur vereinfachten Bemessung von Brettschichtholzträgern bestätigte.

Somit ergibt sich folgender Bemessungsvorschlag für Brettschichtholzträger unter Biegebeanspruchung:

Werden Brettschichtholzträger planmäßig aus Lamellen unterschiedlicher Steifigkeit zusammengebaut, so kann die vorhandene Biegerandspannung σ_B bei symmetrisch aufgebauten Trägern in Anlehnung an die Theorie der Verbundquerschnitte nach folgender Gleichung berechnet werden:

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

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

Die Berechnung dieser effektiven Biegesteifigkeit, die auch beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegungsnachweis) benötigt wird, kann hierbei nach folgender Gleichung erfolgen:

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

wobei $E_i I_i$ der Biegesteifigkeit einer Lamelle und $E_i A_i a_i^2$ dem zugehörigen Steineranteil entsprechen.

Die so berechnete Biegespannung σ_B wird mit der erwarteten charakteristischen Biegefestigkeit σ_5 des betrachteten Trägertyps verglichen, die sich aus folgender Gleichung ergibt:

$$\sigma_5 = \left(\frac{L}{L_0} \cdot \frac{H}{H_0} \right)^{-0,15} \cdot k_F \cdot \sigma_5^0 \quad .$$

Hierbei entsprechen L bzw. H der Länge bzw. der Höhe des betrachteten Trägers. k_F berücksichtigt den Einfluß der Belastungsart und ergibt sich für den Fall einer Gleichstreckenlast zu 1,04. Diese Gleichung setzt allerdings voraus, daß die Länge der eingebauten Bretter im Mittel 4 m beträgt. Bei kürzeren Brettern ist der Wert für σ_5 um 5% abzumindern.

σ_5^0 entspricht der charakteristischen Biegefestigkeit des Standardträgers mit $L_0 = 5400$ mm und $H_0 = 300$ mm. Mit diesem Wert darf jedoch nur dann gerechnet werden, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

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

wobei $f_{B,5,KZV}$ der charakteristischen Biegefestigkeit der eingebauten Keilzinkenverbindungen entspricht.

Ist dies der Fall, so kann der Biegespannungsnachweis nach folgender Gleichung erfolgen:

$$\max \sigma_B \leq \sigma_5 / \gamma_{ges} \quad ,$$

wobei $\max \sigma_B$ der größten in einem Träger auftretenden Biegerandspannung und γ_{ges} einem noch festzulegenden gesamten Sicherheitsbeiwert entsprechen. In Anlehnung an den Entwurf zum *Eurocode 5* [6] ist hierbei ein γ_{ges} von 2,0 - 2,2 zu erwarten.

10 Zusammenfassung

Bisherige Untersuchungen mit Versuchsträgern in Bauteilgröße haben gezeigt, daß die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern nicht ausschließlich von den Holzeigenschaften der Brettlamellen, sondern auch von der Qualität, d.h. der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen, abhängig ist.

Das festgestellte erhöhte Versagensrisiko einer Keilzinkenverbindung konnte mit dem Tragverhalten von Brettabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit in einem Brettschichtholzträger erklärt werden. So kann ein astbehafteter Brettabschnitt mit geringem Elastizitätsmodul aufgrund der wirksamen behinderten Längsdehnung einen Teil der ihm eigentlich zustehenden Spannungen an die steiferen Nachbarn abgeben (Laminierungseffekt), während eine Keilzinkenverbindung aufgrund ihrer hohen Steifigkeit sogar noch Kräfte anzieht und daher früher versagt als ein astbehafteter Brettabschnitt mit gleicher Festigkeit.

Eingang in ein Bemessungskonzept hat die Keilzinkenqualität jedoch noch nicht gefunden, weil es bisher noch nicht möglich war, das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von einer veränderlichen Keilzinkenfestigkeit rechnerisch zu erfassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nun ein Modell entwickelt, mit dem es auf statistischem Wege möglich ist, die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der beeinflussenden Faktoren Holzeigenschaften und Keilzinkenverbindungen zu beschreiben.

In diesem Modell wurde das Endprodukt "Brettschichtholz" in die beiden Materialien "Keilzinkenverbindung" und "Holz" aufgeteilt, wobei z.B. unter dem Material "Keilzinkenverbindung" nicht die Verbindung selbst, sondern die Brettschichtholzträger zu verstehen sind, die aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch gehen.

Die benötigten Festigkeitsverteilungen dieser beiden Materialien wurden mit Hilfe eines Rechenmodells berechnet, das auf der Basis der Finite-Elemente die Berechnung der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern nach Art der Monte-Carlo-Simulationen ermöglicht.

Dieses Rechenmodell berücksichtigt neben dem nichtlinearen Tragverhalten des Holzes unter Druckbeanspruchung auch die bei

Versuchen beobachtete Möglichkeit einer Laststeigerung nach Ausfall eines Elementes (kein reines Sprödbbruchkriterium).

In Anlehnung an frühere, umfangreiche Untersuchungen über das Tragverhalten von 137,5 mm langen Brettabschnitten unter Zug- und Druckbeanspruchung, wurde die Dicke eines Elementes zu 30 mm (\approx Lamellendicke) und deren Länge zu 150 mm gewählt.

Auf der Grundlage der bei diesen Untersuchungen ermittelten Regressionsgleichungen wurde bei den Simulationsrechnungen jedem Element ein Elastizitätsmodul und eine Festigkeit in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften Ästigkeit und Rohdichte zugewiesen. Hierbei wurden neben der natürlichen Streuung dieser Eigenschaften auch die durch das Wachstum des Baumes bedingten Regelmäßigkeiten - charakteristische Astgröße, geringere Streuung des Elastizitätsmoduls und der Festigkeit innerhalb eines Brettes - berücksichtigt.

Die Aufteilung des Endproduktes Brettschichtholz in die beiden Materialien "Keilzinkenverbindung" und "Holz" bewirkte, daß das komplexe Themengebiet in zwei kleinere Problembereiche aufgeteilt werden konnte, innerhalb derer es möglich war, den Einfluß jedes einzelnen Parameters auf die Tragfähigkeit des jeweiligen Materials eindeutig zu erfassen.

Mit Hilfe des hier vorgestellten "Mischverfahrens" ist es somit möglich, auch die Tragfähigkeit des Endproduktes Brettschichtholz in Abhängigkeit von diesen Parametern eindeutig zu beschreiben.

Die Tragfähigkeit der beiden beeinflussenden Materialien wurde in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul der Brettlamellen, der Länge der eingebauten Bretter, der Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen sowie von der Trägergröße und der Belastungsart untersucht.

Hierbei zeigte sich, daß, bei gleichen Holzeigenschaften der Bretter, die Träger mit Keilzinkenversagen in den meisten Fällen eine geringere charakteristische Biegefestigkeit aufwiesen als die Träger mit Holzversagen. Dies konnte auf die beim Material "Keilzinkenverbindung" vorhandene größere Streuung der Festigkeitswerte zurückgeführt werden, die sich auch auf das Tragverhalten dieser Träger mit veränderlicher Trägergröße auswirkte. So zeigten die Simulationsrechnungen, daß der "Volumeneffekt" beim Material "Keilzinkenverbindung" ausgeprägter ist als beim Material "Holz".

Dieses Tragverhalten und die Tatsache, daß die Holzfestigkeit enger mit den Holzeigenschaften korreliert ist als die Keilzinkenfestigkeit, bewirken, daß sich die Festigkeitsverteilungen der beiden Materialien mit besser werdender Holzqualität und zunehmender Trägergröße immer weiter voneinander entfernen. Hierdurch wächst die Wahrscheinlichkeit eines Keilzinkenversagens, und die Festigkeitsverteilung des Endproduktes "Brettschichtholz" nähert sich der Verteilung des Materials "Keilzinkenverbindung" an.

Die Gültigkeit und die Anwendbarkeit des theoretischen Modells wurde mit Hilfe von insgesamt 42 Biegeversuchen mit Brettschichtholzträgern ($B/H/L = 100/600/7500$ mm) unterschiedlicher Holzgüte untersucht. Hierbei konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung über den gesamten Tragfähigkeitsbereich festgestellt werden.

Die zu diesen Versuchen durchgeführten Berechnungen ergaben, daß in praktischen Fällen, in denen versucht wird, Brettschichtholzträger mit hoher Tragfähigkeit herzustellen, die charakteristische Biegefestigkeit dieser Träger sehr stark von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen bestimmt wird.

Auf der Grundlage dieser Berechnungen und der durchgeführten Trägerversuche wurde ein Bemessungskonzept entwickelt, in dem die charakteristische Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern als ausschließlich abhängig von der Keilzinkenfestigkeit und der Trägergröße angesehen wird.

In Anbetracht der Bedeutung, die der Keilzinkenqualität hinsichtlich der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern zukommt, wurde die Biegefestigkeit von insgesamt 900 keilgezinkten Brettabschnitten in Abhängigkeit von den beeinflussenden Faktoren untersucht. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich, daß die Holzeigenschaften Rohdichte und Elastizitätsmodul der Brettlamellen auch auf die Tragfähigkeit von ordnungsgemäß hergestellten Keilzinkenverbindungen einen dominanten Einfluß ausüben. Die Keilzinkengeometrie scheint demgegenüber von vergleichsweise geringerer Bedeutung zu sein.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen deuten somit darauf hin, daß es nur mit Hilfe einer maschinellen Holzsortierung möglich ist, Brettschichtholzträger mit hoher Tragfähigkeit herzustellen und zu gewährleisten.

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] DIN 1052. Holzbauwerke, Ausgabe April 1988
- [4] DIN 4074. Gütebedingungen für Nadel-schnittholz. Ausgabe September 1989
- [5] DIN 68140. Keilzinkenverbindung von Holz. Ausgabe Oktober 1971
- [6] Eurocode Nr.5 (Entwurf) 1987: Gemeinsame einheitliche Regeln für Holzbauwerke. Bericht EUR 9887 der Kommission der Europäischen Gemeinschaften
- [7] ISO 8375 1985: Solid timber in structural sizes - Determination of some physical and mechanical properties
- [8] United Nations; Economic Commission for Europe 1982: ECE recommended standard for stress grading of coniferous sawn timber. Timber Bull. for Europe, Vol XXXIV, Suppl. 16: 1 - 17, Genf, Schweiz
- [9] Aicher, S.; Loeber, R. 1988: Voruntersuchung zur rechnerischen Optimierung von Keilzinkenverbindungen im Hinblick auf das Tragverhalten. Forschungsbericht, Inst. f. Holzphysik U., Hamburg.
- [10] Aplin, E.N. 1972: Stiffness - graded Eastern Spruce laminated beams. Forest Products Journal 22(1): 26 - 31
- [11] Barrett, J.D.; Lau, W. 1989: Moisture content adjustments for in-grade data. CIB-W18A/22-6-2, Berlin, DDR
- [12] Bohannon, B. 1964: Prestressed laminated wood beams. US Forest Service, FPL 8, Madison, Wisc.
- [13] Bohannon, B. 1966: Effect of size on bending strength of wood members. U.S. Forest Service, Research Paper FPL 56, Madison, Wisc.
- [14] Bohannon, B. 1966: Flexural behaviour of large glued-laminated beams. U.S. Forest Service, Research Paper FPL 72, Madison, Wisc.
- [15] 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.
- [16] Bohannon, B.; Moody, R.C. 1973: Evolution of glulam strength criteria. Forest Products Journal 23(6): 19 - 24

- [17] Braun, M.O.; Moody, R.C. 1977: Bending strength of small glulam beams with a laminated - veneer tension lamination. *Forest Products Journal* 27(11): 46 - 51
- [18] Cardesjoe, P.; Dahlberg, R. 1973/74: Limträbalkar med lamellerad Draglamell: Delrapport 2. Dragproving av Limträlameller med särskild Hänsyn till Kivstars. Chalmers Teckniska Högskola, S 73:24
- [19] 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
- [20] 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
- [21] Colling, F.; Dinort, R. 1987: Die Ästigkeit des in den Leimbau-betrieben verwendeten Schnittholzes. *Holz als Roh- und Werkstoff* 45: 23 - 26
- [22] Colling, F.; Scherberger, M. 1987: Die Streuung des Elastizitätsmoduls in Brettlängsrichtung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 45: 95 - 99
- [23] Colling, F.; Görlacher, R. 1989: Eigenschaften des in Leimbau-betrieben verarbeiteten Schnittholzes. *Bauen mit Holz* 91: 327 - 331
- [24] Curry, W.T. 1967: Grade stresses for structural laminated timber. Princes Risborough, Special Report N. 15
- [25] Eby, R.E. 1968: Structural finger-jointing criteria and performance. *Journal of the Structural Division* ST3: 657 - 669
- [26] Egner, K. 1941: Festigkeit von aus kunstharzverleimten Brettern zusammengesetzten, geraden und gebogenen Balken. *Holz als Roh- und Werkstoff* 4: 9
- [27] Egner, K.; Dorn, H. 1962: Untersuchungen von geleimten tragenden Holzteilen nach längerer Gebrauchsdauer. *Berichte aus der Bauforschung*, Heft 25, W. Ernst u. Sohn
- [28] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholz-trägern. Teil 1: Entwicklung eines Rechenmodells. *Holz als Roh- und Werkstoff* 43: 333 - 337
- [29] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholz-trägern. Teil 2: Eingangsdaten für das Rechenmodell. *Holz als Roh- und Werkstoff* 43: 369 - 373

- [30] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R. 1985: Einfluß keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Teil 3: Überprüfung des Rechenmodells mit Hilfe von Trägerversuchen. Holz als Roh- und Werkstoff 43: 439 - 442
- [31] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1986: Strength of glued laminated timber. CIB-W18/19-12-1, Florence, Italy
- [32] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brett lamellen. Bauen mit Holz 89(10): 646 - 655
- [33] Ehlbeck, J.; Colling, F. 1987: Tragfähigkeit von mit Glasfaser-Verbund-Profilen verstärkten Brettschichtholzträgern. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau der Universität Fridericiana, Karlsruhe
- [34] 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
- [35] 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
- [36] 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.
- [37] Filler, M.C.; Hofstrand, A.D.; Howe, J.P. 1964: Laminated beam design for four Western Softwoods. Forest Products Journal 14(10): 451 - 455
- [38] Fisette, P.R.; Rice, W.W. 1988: An analysis of structural finger - joints made from two north - eastern species. Forest Products Journal 38(9): 40 - 44
- [39] Foschi, R.O.; Barrett, J.D. 1980: Glued - laminated beam strength: a model. Journal of the Structural Division , ASCE , Vol.106, No.ST8: 1735 - 1754
- [40] Fox, S.P. 1978: Development and tests of 26f - E Hem - fir glulam beams. Forest Products Journal 28(6): 48 - 55

- [41] Freas, A.D.; Selbo, M.L. 1954: Fabrication and design of glued - laminated wood structural members. USDA Techn. Bull. 1069
- [42] Frech, P. 1976: Prüfung großer Träger aus Brettschichtholz. Bauen mit Holz 12: 590 - 591
- [43] 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
- [44] Görlacher, R. 1984: Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 42: 219 - 222
- [45] Görlacher, R. 1989: Die Methode der Eigenfrequenzmessung zur Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur - und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe (noch nicht veröffentlicht)
- [46] Heimeshoff, B.; Glos, P. 1980: Zugfestigkeit und Biege - E - Modul von Fichten - Brettlamellen. Holz als Roh- und Werkstoff 38: 51 - 59
- [47] Hübner, F. 1924: Versuche mit Holzbalken nach Bauweise Hetzer. Schweizerische Bauzeitung Bd. 84(5): 51 - 67
- [48] Johansson, C.J. 1974: Limträbalkar med lamellerad draglamell. Delrapport 3. Chalmers Tekniska Högskola, Nr. S 74:10
- [49] Johansson, C.J. 1974: Limträbalkar med lamellerad draglamell. Delrapport 4. Chalmers Tekniska Högskola, Nr. S 74:23
- [50] Johansson, C.J. 1974: Limträbalkar med lamellerad draglamell. Delrapport 5. Chalmers Tekniska Högskola, Nr. S 75:1
- [51] Johansson, C.-J. 1977: Limträbalkar med vertikala lamellar i dragzonen; Bøjprovning av 16 balkar. Chalmers Tekniska Högskola, S 77:6
- [52] Johansson, C.-J. 1983: Hallfasthet hos fingerskarvat virke till limträ: Bestämning av bøj - och draghallfasthet hos fingerskarvade limträlamellar. Teknisk Rapport, Sp - rapp 10, Borås, Statens Provingsanstalt
- [53] Johansson, C.-J. 1986: Hallfasthet hos fingerskarvat virke till limträ: Fingerskarvade höghallfasta limträlamellar. Teknisk Rapport, Sp - rapp 09, Borås, Statens Provingsanstalt

- [54] Johansson, C.-J. 1988: High - strength lamination for glulam. IUFRO, Turku, Finland
- [55] Kolb, H. 1968: Festigkeitsuntersuchungen an gestoßenen und gekrümmten Bauteilen aus Brettschichtholz. Holz als Roh- und Werkstoff 26(7): 244 - 253
- [56] Kolb, H. 1974: Versuche mit verleimten Holzbauteilen. Holz als Roh- und Werkstoff 32: 257 - 262
- [57] Kolb, H.; Frech, P. 1977: Testing of big glulam timber beams. CIB-W18/8-12-1, Bruxelles, Belgique
- [58] Kollmann, F. 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer - Verlag
- [59] Komatsu, K.; Kawamoto, N. 1988: Modulus of rupture of glulam beam composed of arbitrary laminae. CIB-W18/21-12-1, Vancouver, Canada
- [60] Larsen, H.J. 1980: Strength of finger joints. Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Danmark
- [61] Larsen, H.J. 1980: Tests of beams. Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg, Danmark
- [62] 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
- [63] Madsen, B.; Littleford, T.W. 1962; Finger joints for structural usage. Forest Products Journal 2: 68 - 73.
- [64] Madsen, B.; Buchanan, A.H. 1984: Size effects in timber explained by a modified weakest link theory. IUFRO, Xalapa, Mexico
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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

- [68] Moe, J. 1961: The mechanism of failure of wood in bending. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Holzbau 21, Zürich
- [69] 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.
- [70] Moody, R.C. 1970: Tensile strength of finger joints in pith - associated and non - pith - associated southern - pine 2 by 6's. USDA Forest Service, FPL 138, Madison, Wisc.
- [71] Moody, R.C.; Bohannon, B. 1970: Large glued - laminated beams with AITC 301A - 69 grade tension laminations. U.S.D.A. Forest Service Research Paper FPL 146, Madison, Wisconsin.
- [72] 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.
- [73] Moody, R.C. 1977: Improved utilization of lumber in glued - laminated beams. USDA Forest Service, Research Paper FPL 292, Madison Wisc.
- [74] Newlin, J.A.; Trayer, G.W. 1924: Form factor of beams subjected to transverse load only. NACA Report No. 181
- [75] Pellerin, R.F.; Strickler, M.D. 1971: Tension proof loading of lam stock for laminated beams. Forest Products Journal 21(5): 50 - 55
- [76] Pellerin, R.F.; Strickler, M.D. 1972: Proof loading of tension laminations for large glued - laminated beams. Forest Products Journal 22(10): 24 - 30
- [77] Pellicane, P.J.; Stanfill-McMillan, K.; Tichy, R.J. 1987: Effects of knots near the fingers of finger - jointed dimension lumber. Forest Products Journal 35(5): 13 - 16
- [78] Radovic, B.; Rohlfing, H. 1986: Untersuchungen über die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen mit unterschiedlichem Verschwächungsgrad. Forschungsvorhaben I. 4 - 34701, FMPA, Stuttgart
- [79] Radovic, B. 1988: Träger aus Brettschichtholz mit Furnierschichtholz im Zugbereich. Forschungsbericht der FMPA Baden - Württemberg, Stuttgart
- [80] Richards, D.B. 1963: Improved tips for finger joints. Forest Products Journal 13(6): 250 - 251

- [81] Samson, M. 1985: Potential of finger-jointed lumber for machine stress-rated lumber grades. *Forest Products Journal* 35(7/8): 20 - 24
- [82] Selbo, M.L. 1963: Effect of geometry on the tensile strength of finger joints. *Forest Products Journal* 13(9): 390 - 400
- [83] Sexsmith, R.G.; Fox, S.P. 1978: Limit states design concepts for timber engineering. *Forest Products Journal* 28(5) : 49 - 54
- [84] 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
- [85] Steck, G. 1982: Die Zuverlässigkeit des Vollholzbalkens unter reiner Biegung. Dissertation der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe
- [86] Sterr, R. 1963: Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schichtholzbalken. *Holz als Roh- und Werkstoff* 21(2): 47 - 61
- [87] Strickler, M.D.; Pellerin, R.F. 1971: Tension proof loading of finger joints for laminated beams. *Forest Products Journal* 21(6): 19 - 24
- [88] Strickler, M.D. 1980: Finger-jointed dimension lumber - past, present and future. *Forest Products Journal* 30(9): 51 - 56
- [89] Weibull, W. 1939: A statistical theory of the strength of materials. *Ing. Vetensk. Akad. Handl. No. 151*
- [90] Wilson, T.R.C.; Cottingham, W.S. 1952: Tests of glued-laminated wood beams and column and development of principles of design. *US Forest Prod. Lab. Rep. R 1687*
- [91] Ylinen, A. 1942: Über den Einfluß der Probekörpergröße auf die Biegefestigkeit des Holzes. *Holz als Roh- und Werkstoff* 5(9): 299 - 305