



H. J. Blaß

M. Frese

Biegefestigkeit von Brett- schichtholz-Hybridträgern mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernla- mellen aus Nadelholz



H. J. Blaß, M. Frese

**Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern mit
Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz**

Titelbild: Querschnitt eines Hybridträgers

Band 6 der Reihe
Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau

Herausgeber
Universität Karlsruhe (TH)
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. J. Blaß

Biegefestigkeit von Brettschichtholz- Hybridträgern mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz

Die Arbeiten wurden gefördert aus Mitteln des Holzabsatzfonds, des Ministeriums für Ernährung und ländlichen Raum und der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.

von

H. J. Blaß

M. Frese

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe (TH)



universitätsverlag karlsruhe

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2006
Print on Demand

ISSN 1860-093X
ISBN 13: 978-3-86644-072-2
ISBN 10: 3-86644-072-3

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Material, Methoden und Ergebnisse	3
2.1	Allgemeine Hinweise	3
2.2	Buchenbretter	3
2.2.1	Herkunft und Untersuchung	3
2.2.2	Ergebnisse im Vergleich mit vorhandenen Daten	4
2.3	Nadelholzbretter	7
2.4	Hybridträger	8
2.4.1	Herstellung, Aufbau und Prüfung	8
2.4.2	Ergebnisse im Vergleich mit Werten von kombinierten Trägern	10
2.5	Keilzinkenverbindungen - Untersuchung und Ergebnisse im Vergleich mit vorhandenen Daten	13
3	Simulation der hybriden Versuchsträger mit dem Rechenmodell	19
3.1	Allgemeines	19
3.2	Vereinbarungen	19
3.3	Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Versuchsergebnissen	20
4	Vorschläge für Festigkeitsklassen	24
4.1	Festigkeitsklassen für kombinierte Brettschichtholzträger aus Buche	24
4.2	Festigkeitsklassen für Hybridträger aus Buche und Nadelholz	25
4.2.1	Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls mithilfe des Rechenmodells	25
4.2.2	Berechnungen mithilfe der Verbundtheorie	32
4.2.3	Biegebeanspruchung der Nadelholzlamellen	34
4.2.4	Vorschläge	36
5	Zusammenfassung	38
6	Literatur	39
7	Zitierte Normen	39
8	Bezeichnungen	40
	Anlagen	41

1 Einleitung

Es ist das Ziel dieser Forschungsarbeit, Bemessungsgrundlagen für die Biegefestigkeit und den Biege-Elastizitätsmodul von Hybridträgern aus Buche und Nadelholz zu entwickeln. Bei solchen Trägern werden nur in den Randbereichen Buchenlamellen verarbeitet. Im Kernbereich bestehen Sie aus Nadelholz-Lamellen, s. Bild 1-1 links.



Bild 1-1 Abschnitt eines hybriden (links) und eines kombinierten Trägers (rechts)

Die Herleitung der Bemessung von hybriden Trägern steht in einem engen Zusammenhang mit derjenigen von kombiniertem Brettschichtholz aus Buche, s. Bild 1-1 rechts. Dieses besteht vollständig aus Buche, wobei die Randlamellen eine höhere Zugfestigkeit besitzen als die Kernlamellen.

Zunächst wird daher auf die wesentlichen Ergebnisse folgender Arbeiten hingewiesen, in denen die Bemessung von kombiniertem Brettschichtholz aus Buche entwickelt wurde: Blaß et al. 2005 ermittelten anhand von Versuchen und mithilfe eines Rechenmodells für zwei visuelle und zwei maschinelle Sortierverfahren für Buchenbretter jeweils einen funktionalen Zusammenhang zwischen der charakteristischen Biegefestigkeit von kombiniertem Brettschichtholz und der charakteristischen Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen. Demnach sind mit den visuellen Sortierverfahren und charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeiten von 52 N/mm² bzw. 56 N/mm² die Festigkeitsklassen GL32 bzw. GL36 erreichbar. Der Nachweis, dass Keilzinkenverbindungen aus visuell sortierten Brettern diese Werte erfüllen, wurde experimentell erbracht. Für die zwei maschinellen Verfahren stellten sie unter Gewährleistung einer charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit von 66 N/mm² bzw. 69

N/mm² die Klassen GL44 bzw. GL48 in Aussicht. Über den Nachweis, dass die charakteristischen Werte für die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen aus maschinell sortierten Bretten tatsächlich erreichbar sind, wird in Blaß und Frese 2006/2007 und in dieser Arbeit berichtet. Eine von visuellen oder maschinellen Sortierverfahren unabhängige nichtlineare Bemessungsgleichung für die charakteristische Biegefestigkeit von kombiniertem Brettschichtholz wurde von Frese und Blaß 2005 veröffentlicht. Damit kann die charakteristische Biegefestigkeit von 600 mm hohen Trägern allein in Abhängigkeit von der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter und der charakteristischen Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen berechnet werden. Auf der Grundlage dieser Bemessung werden sechs Festigkeitsklassen GL28 bis GL48 für Brettschichtholz aus Buche vorgeschlagen, die in baurechtlichen Regelungen Anwendung finden können. Eine umfassende Darstellung der experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Laminierungseffekt bezüglich der Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche gibt Frese 2006.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird nun die Verwendung von Nadelholz statt Buchenholz im weniger biegebeanspruchten Kernbereich ($<2h/3$) von Brettschichtholz untersucht. Es wird anhand von Versuchen und mithilfe von numerischen Methoden gezeigt, dass sich mit solchen Hybridträgern hohe Festigkeitswerte und geringere Materialkosten als bei reinen Buchenträgern miteinander vereinen lassen. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass gegenwärtig für Brettschichtholz geeignetes Nadelholz kostengünstiger ist als entsprechendes Buchenholz. Es wird daher die Verwendung des gut verfügbaren und preiswerten Nadelholzes der Sortierklasse S10 im Kernbereich der Hybridträger angestrebt. In dieser Arbeit werden ausgehend von den bereits erbrachten Forschungsergebnissen Festigkeitsklassen für Hybridträger und entsprechende Anforderungen an Aufbau, Lamellen und Keilzinkenverbindungen vorgeschlagen.

2 Material, Methoden und Ergebnisse

2.1 Allgemeine Hinweise

Bei der Ausarbeitung einer Bemessung für die Biegefestigkeit von Hybridträgern ist es zunächst zweckmäßig, die experimentellen Forschungsergebnisse, welche an kombinierten Brettschichtholzträgern aus Buche erarbeitet wurden, soweit wie möglich mit einzubeziehen. Um den Einfluss der mechanischen Eigenschaften von Nadelholz als Kernlamellen auf die mechanischen Eigenschaften von hybriden im Vergleich mit kombinierten Trägern aufzuzeigen, werden bei den Darstellungen der Versuchsergebnisse auch die Daten der Arbeiten Blaß et al. 2005 sowie Frese 2006 dargestellt. Zunächst werden die Versuchsergebnisse für das Brettmaterial der beiden Trägerarten dargestellt, damit die Voraussetzungen für einen Vergleich zwischen den hybriden und kombinierten Trägern gegeben sind. In den darauf folgenden zwei Abschnitten wird dann die Biegefestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul von hybriden und kombinierten Trägern sowie die Keilzinken-Biegefestigkeit behandelt.

2.2 Buchenbretter

2.2.1 Herkunft und Untersuchung

Das in Nordhessen ansässige Sägewerk, in dem bereits ein Drittel des Brettmaterials für die Herstellung der kombinierten Träger entnommen wurde, lieferte die Buchenbretter für die Herstellung der Randlamellen in den Hybridträgern. Es handelte sich um unbesäumte Bretter, die im Sägewerk 2 ½ Jahre überdeckt an der freien Luft lagerten. Die Bretter wurden zuerst technisch getrocknet und dann parallel besäumt. Im Labor wurden sie für die Untersuchung und die Verwendung für Brettschichtholz vorbereitet. Die am Hirnholz zum Teil weit eingerissen Bretter wurden im Hinblick auf die Keilzinkung am Ende gekappt. Eine Mindestlänge von 1,50 m wurde eingehalten, um eine einwandfreie Verarbeitung in den Transporteinrichtungen beim Brettschichtholzhersteller zu gewährleisten. Dieser Bearbeitungsschritt hatte eine in den Grenzen von 1,50 m bis 4,0 m stark streuende Brettlänge zur Folge. Für die Herstellung der hybriden Versuchsträger standen abschließend insgesamt 187 (1,96 m³) sägeraue Buchenbretter zur Verfügung. Tabelle A-1 enthält Angaben bezüglich der Herstellung und Güteklasse. Im Labor wurden die Masse, die Querschnittsmaße, die Brettlänge und die Frequenz der Längsschwingung bestimmt. Mit diesen Werten wurde die Bruttohohdichte und der dynamische Elastizitätsmodul berechnet. Die Bretter wurden nach dem Schema in Tabelle 2-1 klassifiziert, um beim Aufbau der Hybridträger gezielt steifere Randlamellen mit besseren Festigkeitseigenschaften - vor allem in der Zugzone – vorsehen zu können. Die Ästigkeit wurde nach DIN 4074-5 bestimmt. Sie

wurde nur bei Brettern der Klassen 2 bis 5 ermittelt. Aus Erfahrung wurden Bretter der Klasse 1 aufgrund der geringen Festigkeit nicht in den Trägern verwendet.

Tabelle 2-1 Klassifizierung von Buchenbrettern

Klasse	Grenzen für den dynamischen Elastizitätsmodul N/mm ²
1	$E_{\text{dyn}} \leq 13000$
2	$13000 < E_{\text{dyn}} \leq 14000$
3	$14000 < E_{\text{dyn}} \leq 15000$
4	$15000 < E_{\text{dyn}} \leq 16000$
5	$16000 < E_{\text{dyn}}$

2.2.2 Ergebnisse im Vergleich mit vorhandenen Daten

Bild 2-1 a zeigt, dass das System von 5 Klassen bereits bei den 187 Brettern wirtschaftliche Ausbeuten innerhalb der höheren Klassen gewährleistete. In diesem Fall wird sogar deutlich, dass bei der relativ kleinen Entnahme aus einem einzigen Wuchsgebiet die Anteile in den 5 Klassen mit denjenigen des Vergleichsmaterials weitgehend übereinstimmen. Der große Anteil von 34% der astfreien Bretter beim Vergleichsmaterial kann bei den hier untersuchten Brettern nicht beobachtet werden. Er liegt nach Bild 2-1 b mit 14% deutlich darunter. Bild 2-2 zeigt erneut, dass für eine Sortierung nach DIN 4074-5 bezüglich der Ästigkeit die Begutachtung des Einzelastes hinreichend ist. In der Darstellung sind die Sortiergrenzen für LS7, LS10 und LS13 für den Einzelast und die Astansammlung durch Hilfslinien gekennzeichnet. Demnach würde die Sortierung nach der Astansammlung in keinem Fall eine niedrigere Sortierklasse ergeben. Bild 2-3 a zeigt den Zusammenhang zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und der Bruttoreohdichte für die 187 Bretter und das Vergleichsmaterial. Es zeigt sich, dass die hier untersuchten Bretter nicht in allen Bereichen des Vergleichsmaterials vertreten sind. Bild 2-3 b zeigt den Zusammenhang zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem größten DEB-Wert. Für diesen Vergleich mit den vorhandenen Daten ist es erforderlich, nur Bretter mit einem dynamischen Elastizitätsmodul >13000 N/mm² zu berücksichtigen, weil die Ästigkeit an Brettern der Klasse 1 in dieser Forschungsarbeit nicht ermittelt wurde. In der dargestellten Beziehung besteht eine sehr gute Übereinstimmung. Die beiden Regressionsgeraden sind nahezu deckungsgleich. In Bild A-1 sind die Häufigkeitsverteilungen des dynamischen Elastizitätsmoduls sowie der Bruttoreohdichte dargestellt. Angaben zur Ausbeute, Ästigkeit jeweils bezüglich der Brettklasse und zu den Abmessungen finden sich in Tabelle A-2 bis Tabelle A-4.

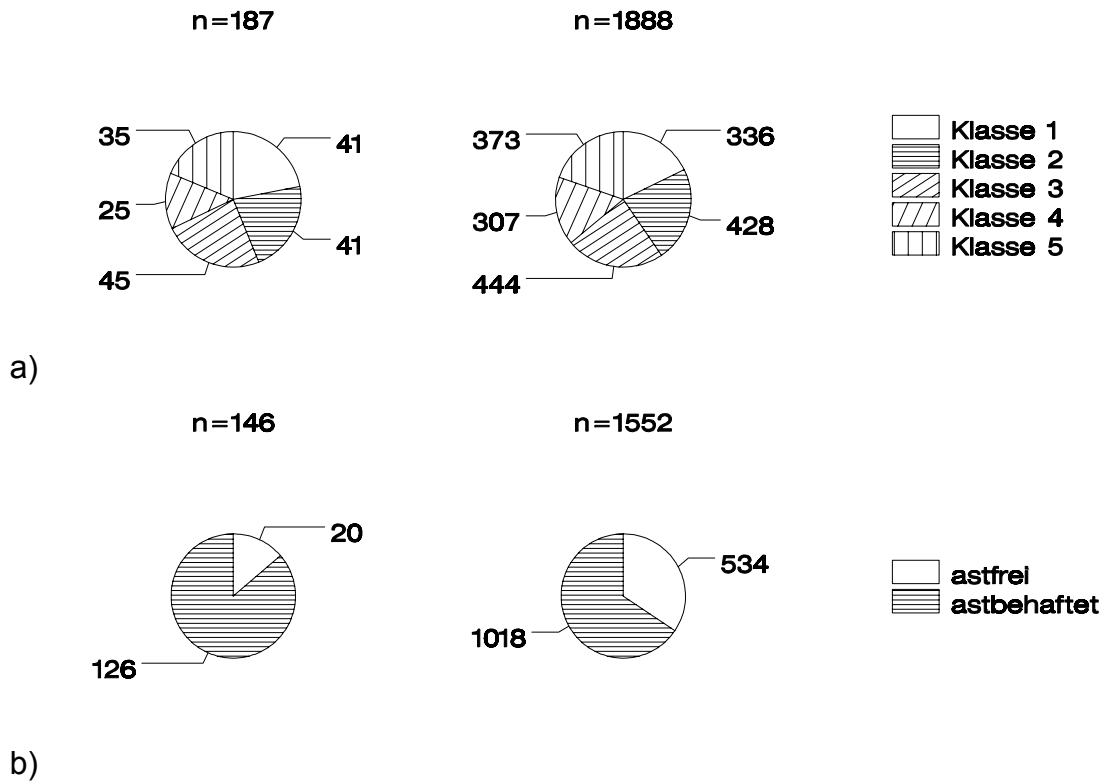


Bild 2-1 Ausbeute in den einzelnen Klassen (a) und Anteile der astfreien und astbehafteten Bretter (b) im Vergleich mit vorhandenen Daten; In Teilbild (b) werden nur Bretter der Klassen 2 bis 5 berücksichtigt.

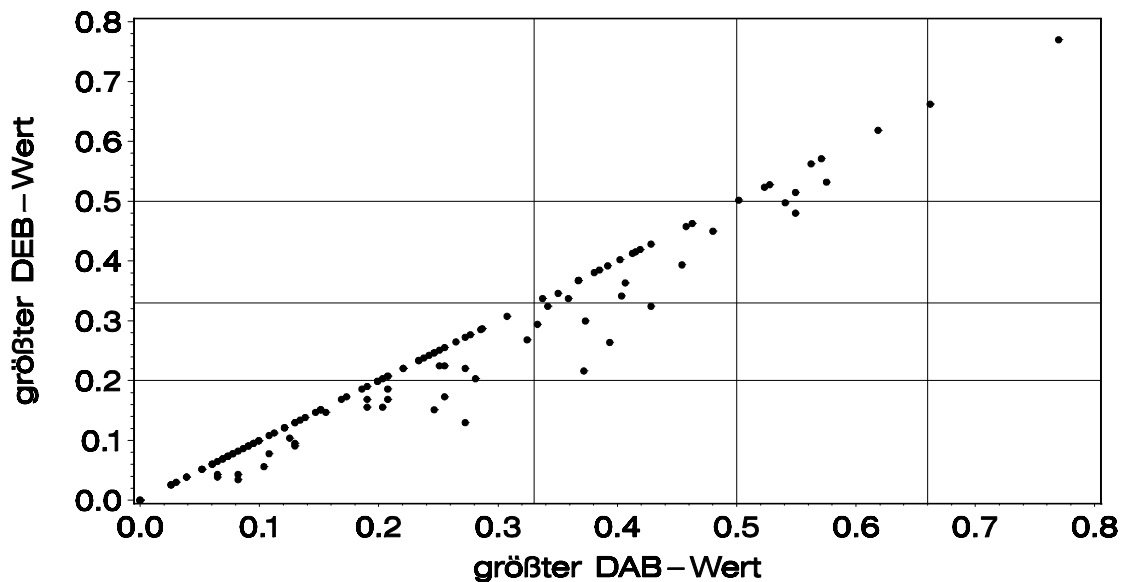
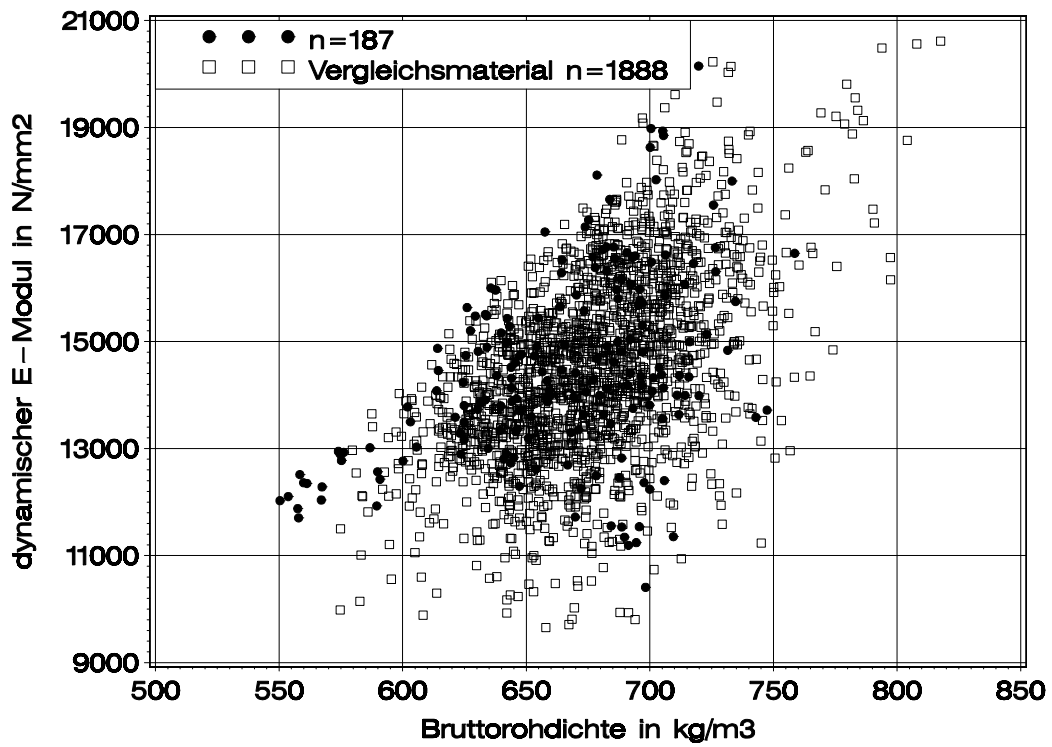
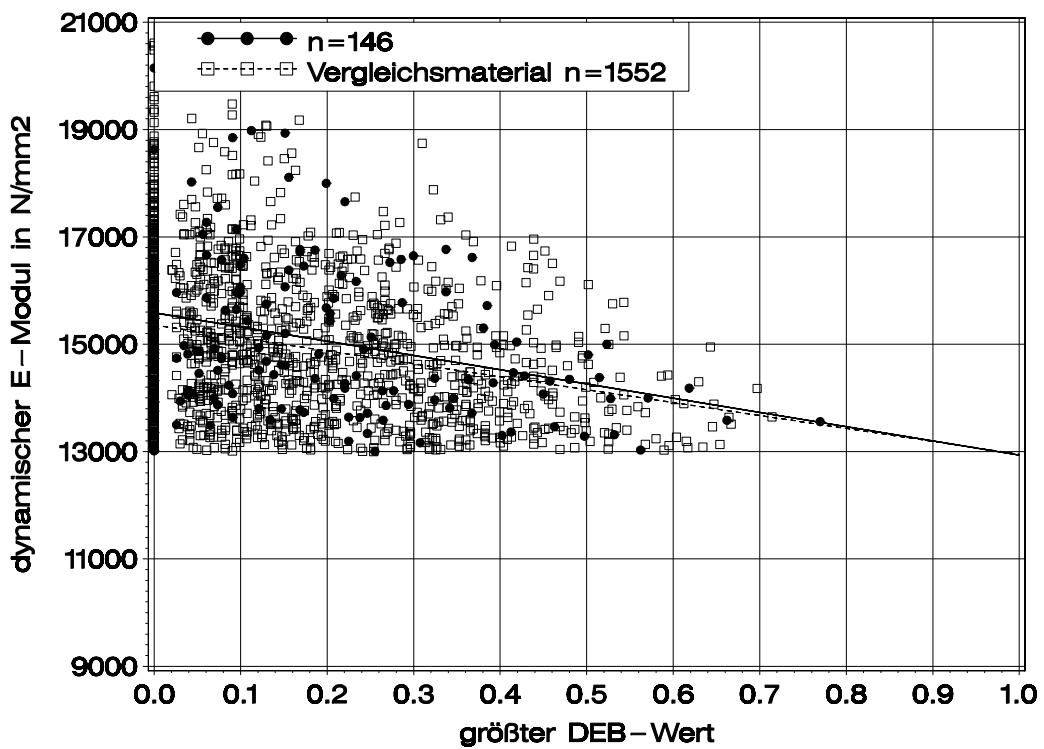


Bild 2-2 Größter DEB-Wert in Abhängigkeit vom größten DAB-Wert; Beide Werte müssen nicht im selben Brettabschnitt liegen.



a)



b)

Bild 2-3 Dynamischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Bruttordichte (a) und dem größten DEB-Wert (b)

2.3 Nadelholz Bretter

Für die Nadelholz-Kernlamellen der Hybridträger wurde die Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1 gewählt, weil Bretter dieser Klasse gut verfügbar und ein wirtschaftliches Ausgangsmaterial sind. Vor der Produktion der hybriden Träger wurden beim Brett-schichtholzhersteller zunächst Nadelholzbretter unbekannter Herkunft entnommen und 96 Stück, welche für die Kernbereiche erforderlich waren, in die Sortierklasse S10 sortiert. Die mittleren Querschnittsmaße betragen 116 x 38 mm und die mittlere Brettlänge lag bei 5 m. Für Vergleichsziecke wurde im Werk der dynamische Elastizitätsmodul ermittelt. Bild 2-4 zeigt den dynamischen Elastizitätsmodul über der Bruttorehdichte der 96 Bretter im Vergleich mit 502 Brettern aus Nadelholz der Sortierklasse S10. Demnach sind die 96 Bretter für S10 repräsentativ. Das Vergleichsmaterial stammt aus dem Forschungsvorhaben Blaß und Frese 2002.

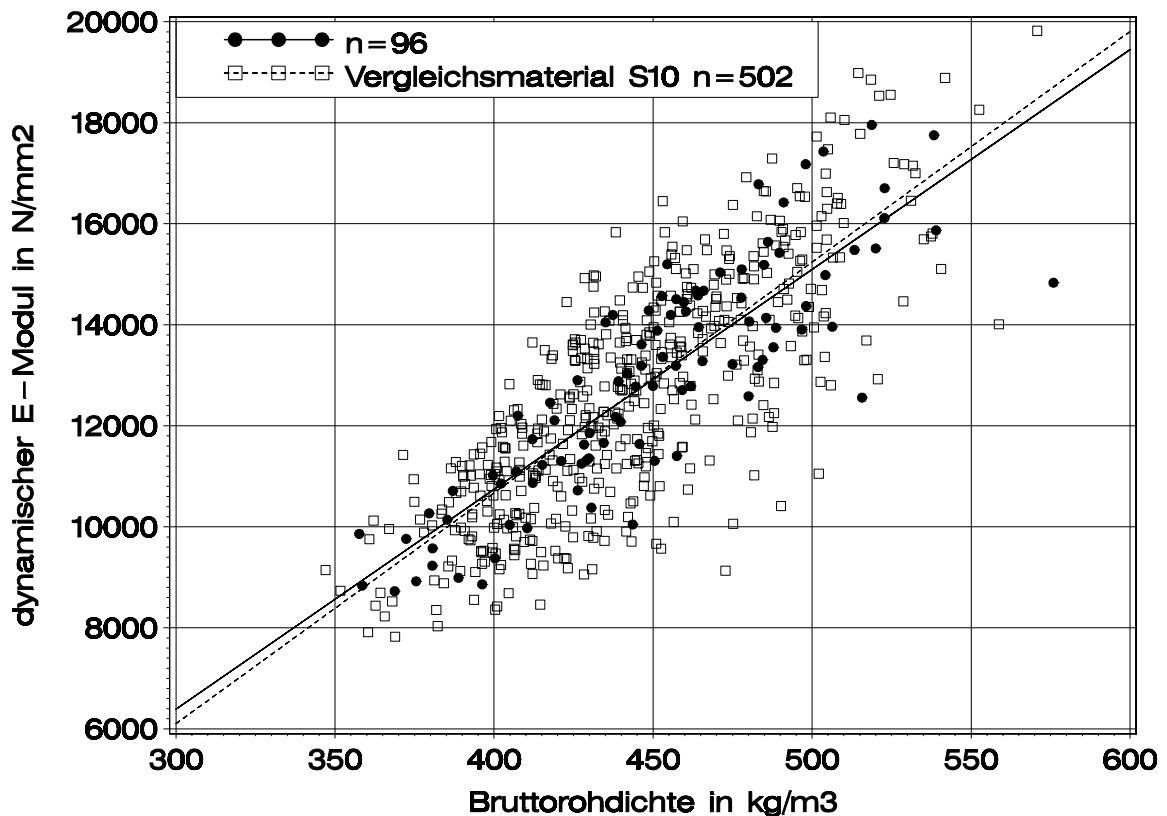


Bild 2-4 Dynamischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Bruttorehdichte; Regressionsgeraden jeweils für Versuchs- und Vergleichsmaterial

Mithilfe des Rechenmodells soll der Einfluss des Elastizitätsmoduls von Nadelholzbrettern, die im Kernbereich von Hybridträgern verwendet werden, auf die Biege-

randspannung in den Buchen-Randlamellen untersucht werden. Dabei soll die natürliche Streuung des Elastizitätsmoduls der Nadelholz Bretter wirklichkeitsnah berücksichtigt werden. Eine Verteilung für den Elastizitätsmodul von Nadelholz Brettern der Sortierklasse S10 lässt sich anhand des dynamischen Elastizitätsmoduls des Vergleichsmaterials ermitteln, das aufgrund des größeren Stichprobenumfangs die Parameter einer theoretischen Verteilung mit höherer statistischer Sicherheit beschreibt. Die gewählte Betaverteilung zeigt Bild 2-5. Eine Gegenüberstellung dieser Betaverteilung mit der empirischen Verteilung des Versuchsmaterials zeigt Bild A-2.

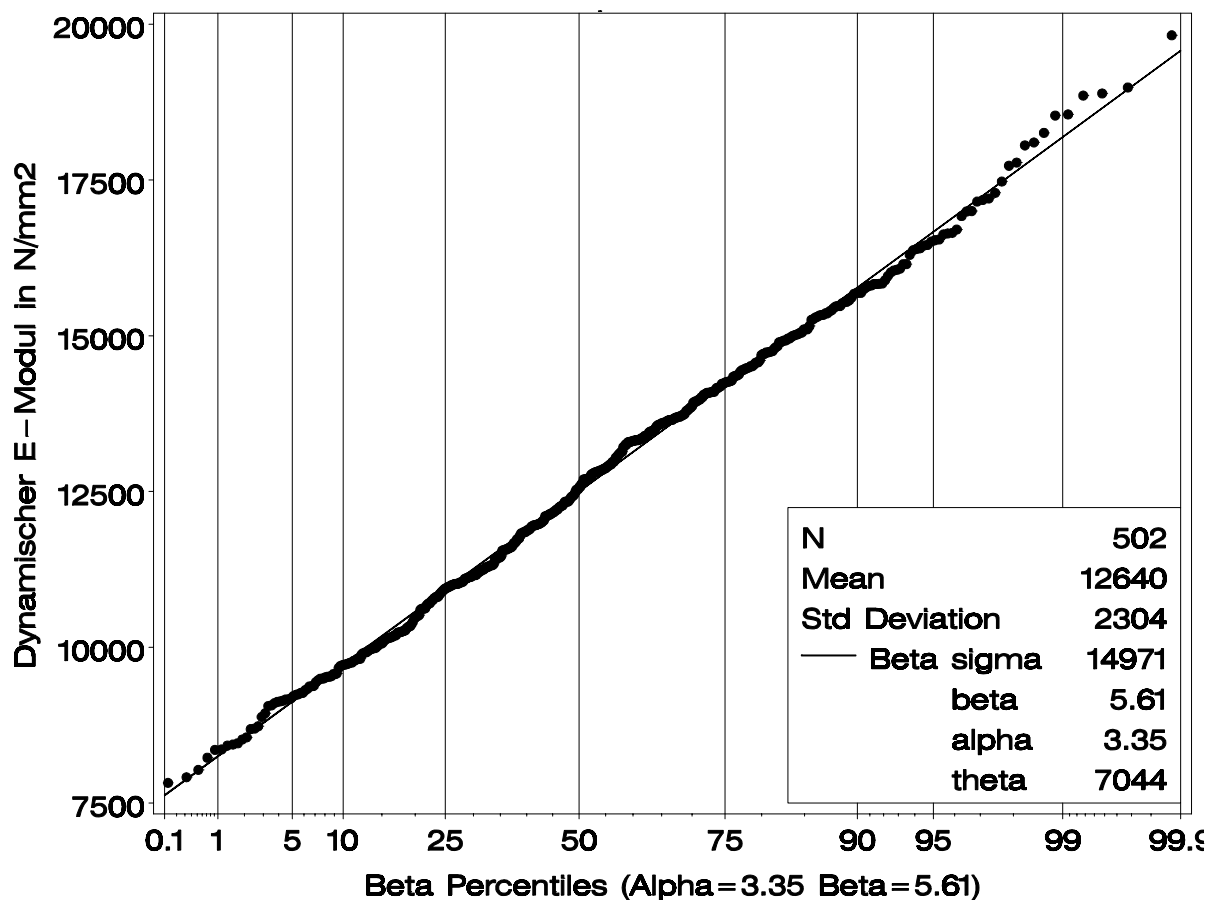


Bild 2-5 Verteilung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Nadelholz Brettern der Sortierklasse S10 (Vergleichsmaterial) und angepasste Betaverteilung

2.4 Hybridträger

2.4.1 Herstellung, Aufbau und Prüfung

Tabelle 2-2 zeigt den Aufbau der hybriden im Vergleich mit den kombinierten Trägern aus dem Forschungsvorhaben Blaß et al. 2005. Bedingt durch die kleine Anzahl der Buchenbretter in den Klassen 4 bis 5 und das Ziel, mindestens 12 Hybridträger her-

zustellen, konnten die zwei Randlamellen in der Druck- und Zugzone nicht durchweg aus Brettern einer Klasse hergestellt werden. Um bezüglich der Randlamellen dennoch einen ähnlichen Aufbau der hybriden wie bei den kombinierten Trägern zu verwirklichen, wurden beim Typ 10 nur die Decklamellen in der Zugzone aus Brettern der Klasse 5 und beim Typ 11 aus Brettern der Klasse 4 hergestellt. Aus Erfahrung ist bekannt, dass die Biegefestigkeit eines Brettschichtholzträgers hauptsächlich durch die Festigkeitseigenschaften der Decklamelle in der Zugzone bestimmt wird. Insofern können den Typen 10 und 11 die in Blaß et al. 2005 eingeführten Tagfähigkeitsklassen „sehr hoch“ und „hoch“ zugeordnet werden. Siehe hierzu Tabelle 2-3. Die Typen 10a und 10b bzw. 11a und 11b unterscheiden sich durch andere Brettclassen in der Druckzone und in der 2. Lamelle.

Alle Keilzinkenverbindungen wurden mit dem für Nadelholz gebräuchlichen Profil 15/3,8 gefertigt. Als Kleber wurde Kauramin®-Leim 681 flüssig und Kauramin®-Härter 686 flüssig verwendet. Die Biegeversuche wurden gemäß EN 408 durchgeführt. Genaue Angaben zum Versuch sind in Bild A-3 zu finden. Bild A-4 zeigt einen Hybridträger während des Versuchs.

Tabelle 2-2 Aufbau der hybriden im Vergleich mit den kombinierten Trägern

	hybride Träger				kombinierte Träger	
Höhe	300 mm				340 mm	
Stützweite	5400 mm				5400 mm	
Produktion	November 2004				Dezember 2003	
Typ ¹	10a	10b	11a	11b	1	2
Träger-Nr.	1 und 2	4 bis 7	3 und 8	9 bis 12	1-12	13-24
Druckzone	5	3	3	2	5	4
9. Lamelle	5	3	3	2	5	4
8. Lamelle	S10	S10	S10	S10	3	2
...	S10	S10	S10	S10	3	2
...	S10	S10	S10	S10	3	2
...	S10	S10	S10	S10	3	2
...	S10	S10	S10	S10	3	2
3. Lamelle	S10	S10	S10	S10	3	2
2. Lamelle	5	4/3	4/3	3	5	4
Zugzone	5	5	4	4	5	4

¹ Typennummerierung fortlaufend gemäß Forschungsvorhaben Blaß et al. 2005

Tabelle 2-3 Zuordnung in Tragfähigkeitsklassen

	hybride Träger	kombinierte Träger
Tragfähigkeitsklasse	Kurzbezeichnung	
sehr hoch (SH)	Typ 10 in SH-30-hyb	Typ 1 in SH-34-kom
hoch (H)	Typ 11 in H-30-hyb	Typ 2 in H-34-kom

2.4.2 Ergebnisse im Vergleich mit Werten von kombinierten Trägern

Bild 2-6 zeigt die Beziehung zwischen der Biegefestigkeit und dem Biege-Elastizitätsmodul für jede Tragfähigkeitsklasse. Den hybriden werden runde und den kombinierten Trägern sternförmige Symbole zugewiesen. Tabelle 2-4 enthält die Statistik der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls. Die entsprechenden Werte der kombinierten Träger sind zum Vergleich auch angegeben. Die Lastverformungskurven für die Hybridträger, auf denen die rechnerische Randspannung in Abhängigkeit von der Gesamtdurchbiegung in der Mitte der Trägeroberkante dargestellt ist, zeigt Bild A-6. Die Zuordnung der Träger-Nummer zu den Wertepaaren Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul zeigt Bild A-7. Die Beobachtungen an den Versuchsträgern nach dem Bruch sind in Tabelle A-5 zusammengestellt.

Die Kennwerte in Tabelle 2-4 in Ergänzung mit Bild 2-6 lassen die nachstehenden Schlussfolgerungen zu:

- Zwischen der Biegefestigkeit der hybriden und kombinierten Träger besteht in beiden Tragfähigkeitsklassen gute Übereinstimmung. Auch der Unterschied von 6,20 N/mm² zwischen der mittleren Biegefestigkeit der hybriden und kombinierten Träger in der Klasse „sehr hoch“ ist statistisch noch nicht signifikant.
- Unter Vernachlässigung des geringen Höhenunterschieds zwischen den hybriden und kombinierten Trägern sowie der unterschiedlichen Tragfähigkeitsklassen ist in Bild 2-7 die empirische Häufigkeitsverteilung aller Biegefestigkeitswerte und eine daran angepasste Betaverteilung dargestellt. Anhand dieser vergleichsweise großen Stichprobe lässt sich nun zeigen, dass die Klassifizierung von Buchenlamellen mit einem dynamischen Elastizitätsmodul > 15000 N/mm² eine charakteristische Biegefestigkeit von 47 N/mm² ermöglicht. Die 95%-Vertrauensgrenzen für das 5%-Quantil betragen unter Annahme normalverteilter Daten 40,4 N/mm² und 49,5 N/mm². Der Schätzwert für das 5%-Quantil aus der Betaverteilung liegt bei 47,5 N/mm². Für 600 mm hohe Träger beträgt das verteilungsfreie 5%-Quantil umgerechnet mit Gleichung (1) aus DIN 1052 und h=300 mm etwa 43 N/mm².

$$k_h = \left(\frac{600}{h} \right)^{0,14} \quad (1)$$

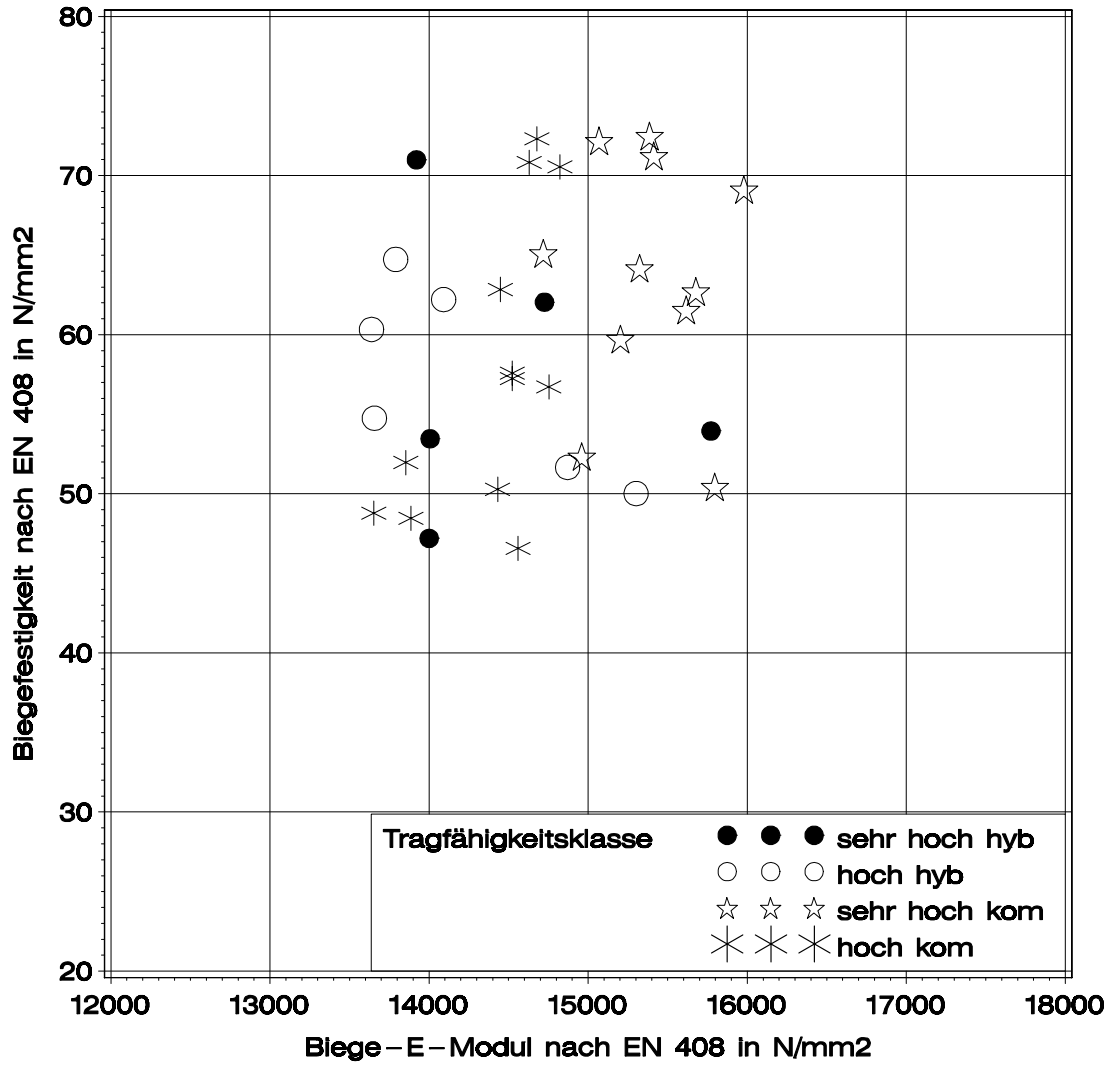


Bild 2-6 Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul

Tabelle 2-4 Statistik der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls

Tragfähigkeits- klasse		hybride Träger	kombinierte Träger	Verhältnis
	Höhe	300 mm	340 mm	
Biegefestigkeit N/mm ²				
sehr hoch	n	5 ¹	11 ¹	0,90
	\bar{x}	57,5	63,7	
	s	9,19	7,51	
	min	47,2	50,4	
hoch	n	6	12	0,99
	\bar{x}	57,3	57,8	
	s	6,00	9,32	
	min	50,0	46,6	
Biege-Elastizitätsmodul N/mm ²				
sehr hoch	n	6	12	0,93
	\bar{x}	14400	15500	
	s	735	490	
	min	13900	14700	
hoch	n	6	12	0,99
	\bar{x}	14200	14400	
	s	700	383	
	min	13600	13700	
¹ jeweils eine Beobachtung wegen schlecht verklebter Keilzinkenverbindung bei der Auswertung der Biegefestigkeit ausgeschlossen; bezüglich der Hybridträger s. Bild A-9				

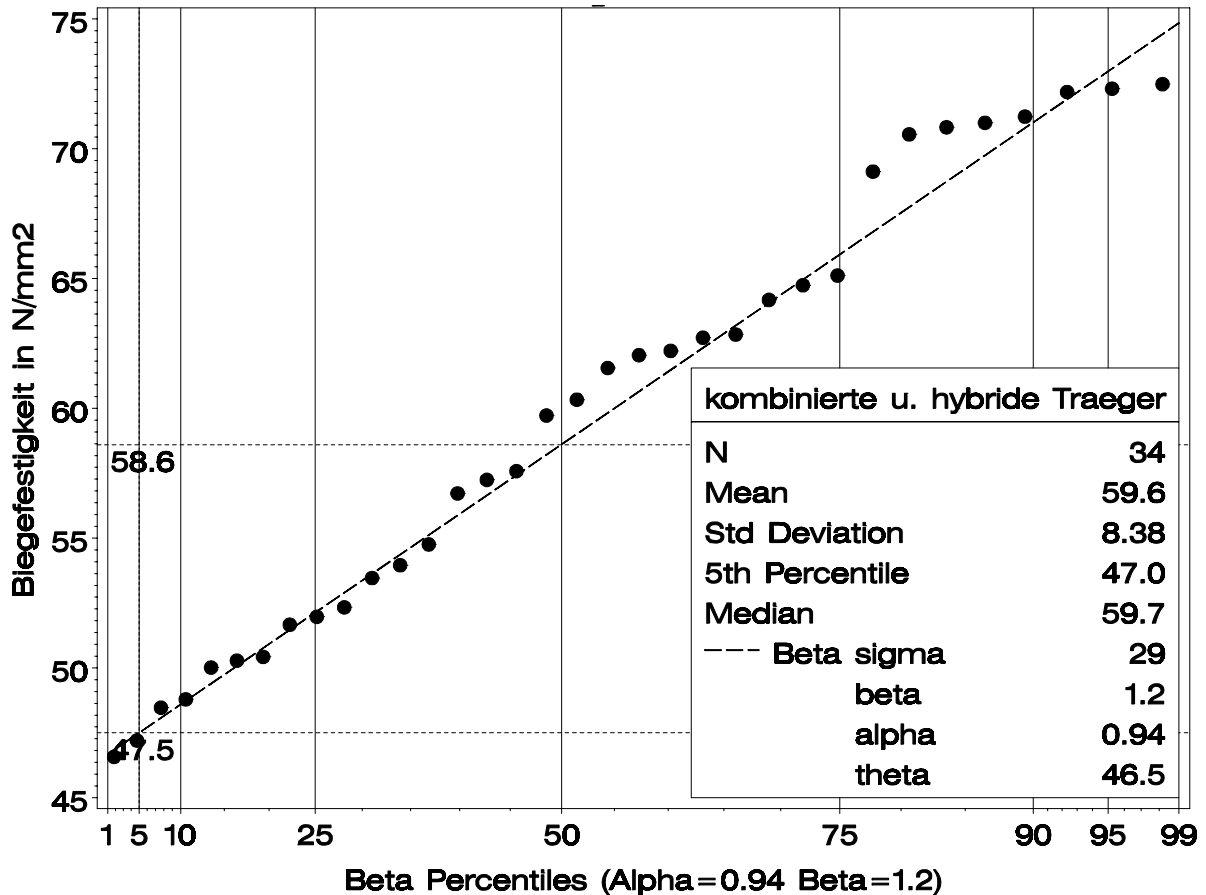


Bild 2-7 Empirische Verteilung der Biegefestigkeit von hybriden und kombinierten Trägern aus den Tragfähigkeitsklassen „sehr hoch“ und „hoch“ sowie eine angepasste Betaverteilung; Die horizontalen Hilfslinien kennzeichnen Median und 5%-Quantil aus angepasster Verteilung.

2.5 Keilzinkenverbindungen - Untersuchung und Ergebnisse im Vergleich mit vorhandenen Daten

Es wurde die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen in den Buchenlamellen der Hybridträger ermittelt. Dazu wurden aus den geprüften Trägern unbeschädigte Verbindungen ausgesägt und zu Proben verarbeitet. Für jeden Hybridträger lagen genaue Aufbauskiizen vor, in denen die Lage der Keilzinkenverbindungen und die Klasse gemäß Tabelle 2-1 der gestoßenen Bretter vermerkt war. Damit konnten die Keilzinkenverbindungen den Brettclassen eindeutig zugeordnet und klassifiziert werden.

Als Kontrollgröße für die Biegefestigkeit wurde von jeder Probe zusätzlich der dynamische Biege-Elastizitätsmodul anhand einer Biegeschwingung (1. Eigenform) in Dickenrichtung bestimmt. Das Verfahren beschreibt Görlacher 1984. Die Biegefestigkeit, die Rohdichte und die Holzfeuchte wurden jeweils nach EN 408 an jedem Brett-

Ende der Keilzinkenverbindungen ermittelt. Die Stützweite beim Biegeversuch betrug 15·d.

Bei der Untersuchung dieser Keilzinkenverbindungen wurde ebenso vorgegangen wie in der Arbeit von Blaß und Frese 2006/2007 bzw. Frese 2006. Darin wird bereits über den Einfluss der maschinellen Klassifizierung nach Tabelle 2-1 auf die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen berichtet. Die darin untersuchten Proben wurden den kombinierten Trägern, die für das Forschungsvorhaben Blaß et al. 2005 hergestellt wurden, entnommen. Tabelle 2-5 zeigt den Umfang der Proben aus den hybriden und für Vergleichszwecke aus den kombinierten Trägern sowie deren Querschnittsmaße.

Die Statistik der Holzfeuchte und Rohdichte ist in Tabelle A-6 und die der Biegefestigkeit in Tabelle A-7 zusammengestellt. Die Kennwerte für das Vergleichsmaterial sind mit angegeben. Bild 2-8 a verdeutlicht für die Keilzinkenverbindungen der Hybridträger die Beziehung zwischen der Biegefestigkeit und dem dynamischen Biege-Elastizitätsmodul. Die vier Klassen der gestoßenen Bretter sind durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet. Die quadratische Regressionskurve mit ihren 90% Vertrauensgrenzen wurde aus allen 60 Beobachtungen ermittelt. Bild 2-8 b zeigt diese 60 Proben im Vergleich mit denjenigen der kombinierten Träger. Die Regressionskurve im Teilbild b ist nur für das Vergleichsmaterial gültig. Beide Teilbilder lassen drei wesentliche Schlussfolgerungen zu:

- Die nichtlineare Beziehung zwischen der Biegefestigkeit und dem dynamischen Elastizitätsmodul wird anhand der 60 Proben erneut bestätigt. Mittelwert und 5%-Quantil streben im vorliegenden Fall auch gegen einen Grenzwert.
- Auffällig ist, dass die Regressionskurve der 60 Proben etwa 8 N/mm² über derjenigen des Vergleichsmaterials liegt. Ursachen dafür könnten die niedrigere Holzfeuchte und/oder die kleinere Dicke der Proben sein. Die mittlere Holzfeuchte (mittlere Dicke) der 60 Proben liegt mit 8,2% (28 mm) deutlich unter derjenigen des Vergleichsmaterials von 9,5% (32 mm). Denkbar als Ursache sind auch günstigere Produktionsbedingungen. Nach Angabe der Firma Schaffitzel, Schwäbisch Hall wurden die Keilzinken für die Hybridträger mit Fräsern aus hochwertigerem Stahl hergestellt als bei der Produktion der kombinierten Träger.
- Im Gegensatz zum Vergleichsmaterial werden bei den Proben der Hybridträger nur Festigkeitswerte über 70 N/mm² beobachtet!

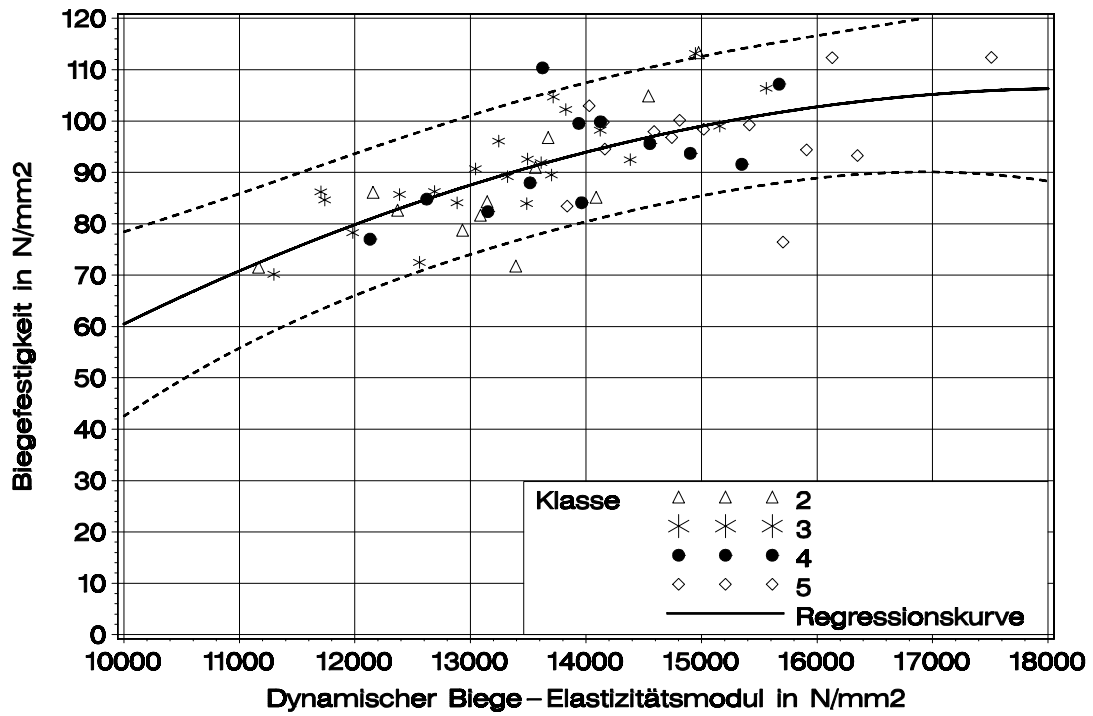
Zur Verdeutlichung des Einflusses einer maschinellen Sortierung auf die Festigkeit zeigt Bild 2-9 a für die 60 Proben, das Vergleichsmaterial und für alle Proben den Mittelwert sowie das 5%-Quantil der Keilzinken-Biegefestigkeit über der Brettklasse. Bei den Proben der Hybridträger wird für die Klassen 2, 4 und 5 statt des 5%-Quantils ersatzweise der Kleinstwert angegeben. Beide Kennwerte der 60 Proben liegen deutlich über den Werten des Vergleichsmaterials. Eine gemeinsame Auswer-

tung zeigt im Bezug auf das Vergleichsmaterial nur geringfügige Änderungen der Kurvenverläufe. Nach Bild 2-9 b zeigt der Mittelwert des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Klasse der Bretter für jede der beiden Stichproben und alle Proben einen ähnlichen Verlauf.

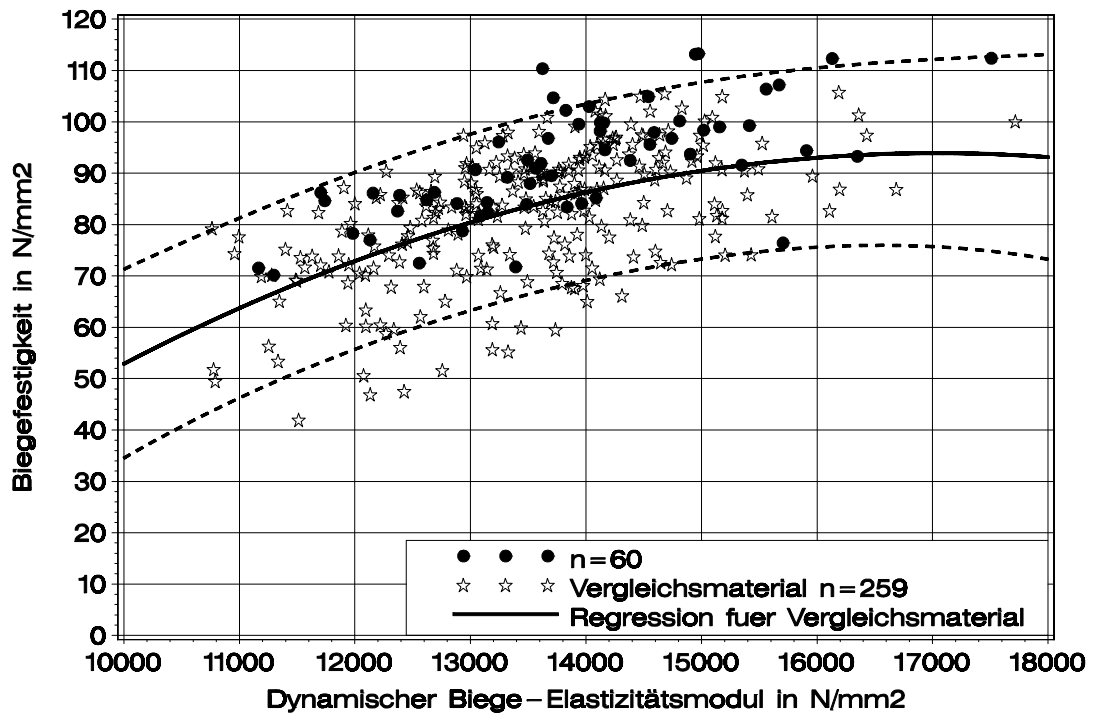
Die von Blaß und Frese 2006/2007 nachgewiesene charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit von 70 N/mm² für Buchenbretter der Klassen 4 und 5 mit einem dynamischen Elastizitätsmodul > 15000 N/mm² bleibt auch bei erweitertem Probenumfang von 153 erhalten. Siehe hierzu den Quantile-Quantile-Plot in Bild 2-10. Demnach beträgt das 5%-Quantil aus angepasster Lognormalverteilung nunmehr 70,7 N/mm². Die 95% Vertrauensgrenzen betragen 67,6 (66,5) N/mm² und 72,9 (72,2) N/mm². Sie wurden unter der Annahme einer Normalverteilung ermittelt. Die Werte in Klammern sind für das Vergleichsmaterial mit einem Stichprobenumfang von 127 Stück gültig.

Tabelle 2-5 Umfang und Querschnittsmaße der Keilzinkenproben

Klasse der Bretter	Proben aus Hybridträgern	Proben aus kombinierten Trägern	Summe
2	12	63	75
3	22	69	91
4	12	62	74
5	14	65	79
Summe	60	259	319
b in mm	100	100-110	
d in mm	28	29-34 ¹	
¹ Im Mittel 32 mm			

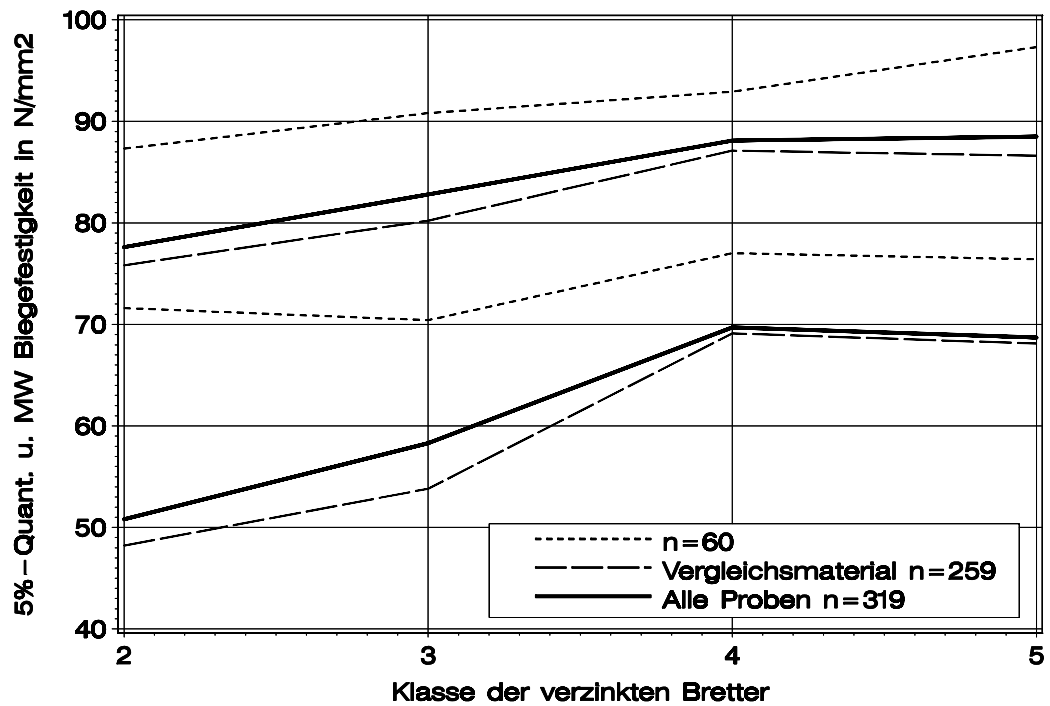


a)

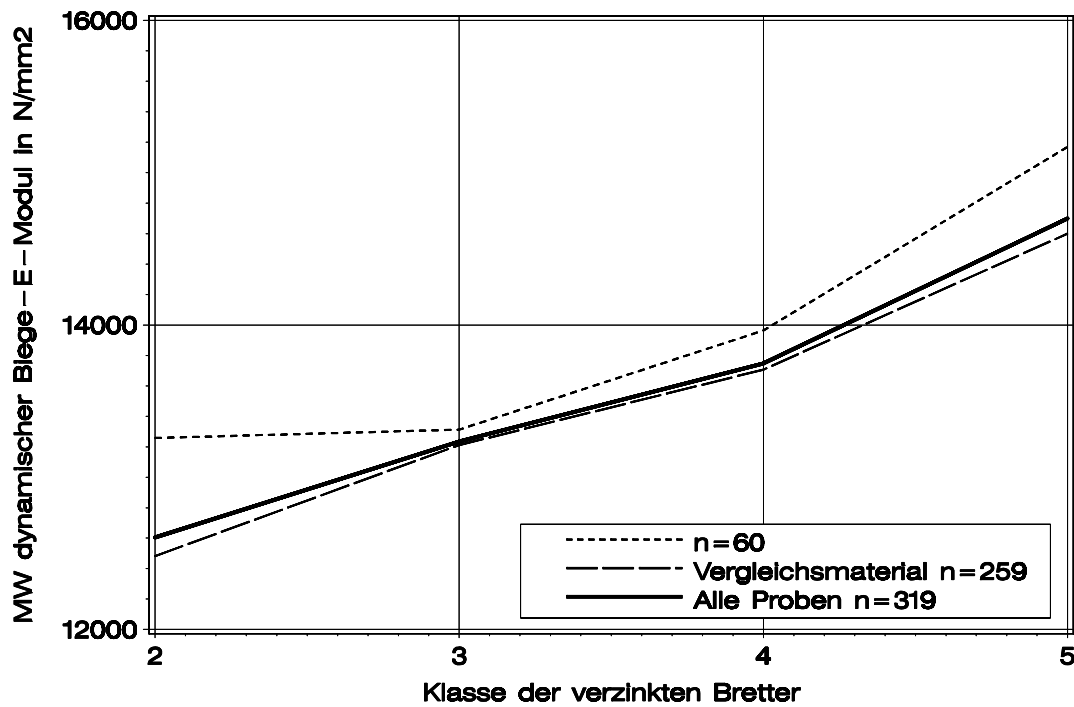


b)

Bild 2-8 Keilzinken-Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom dynamischen Biege-Elastizitätsmodul; Keilzinkenverbindungen der hybriden (a) und Keilzinkenverbindungen der hybriden im Vergleich mit denjenigen der kombinierten Träger (b)



a)



b)

Bild 2-9 Mittelwert (obere Linien) und 5%-Quantil bzw. Kleinstwert (untere Linien) der Keilzinken-Biegefestigkeit (a) und Mittelwert des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls (b) in Abhängigkeit von der Klasse der verzinkten Bretter

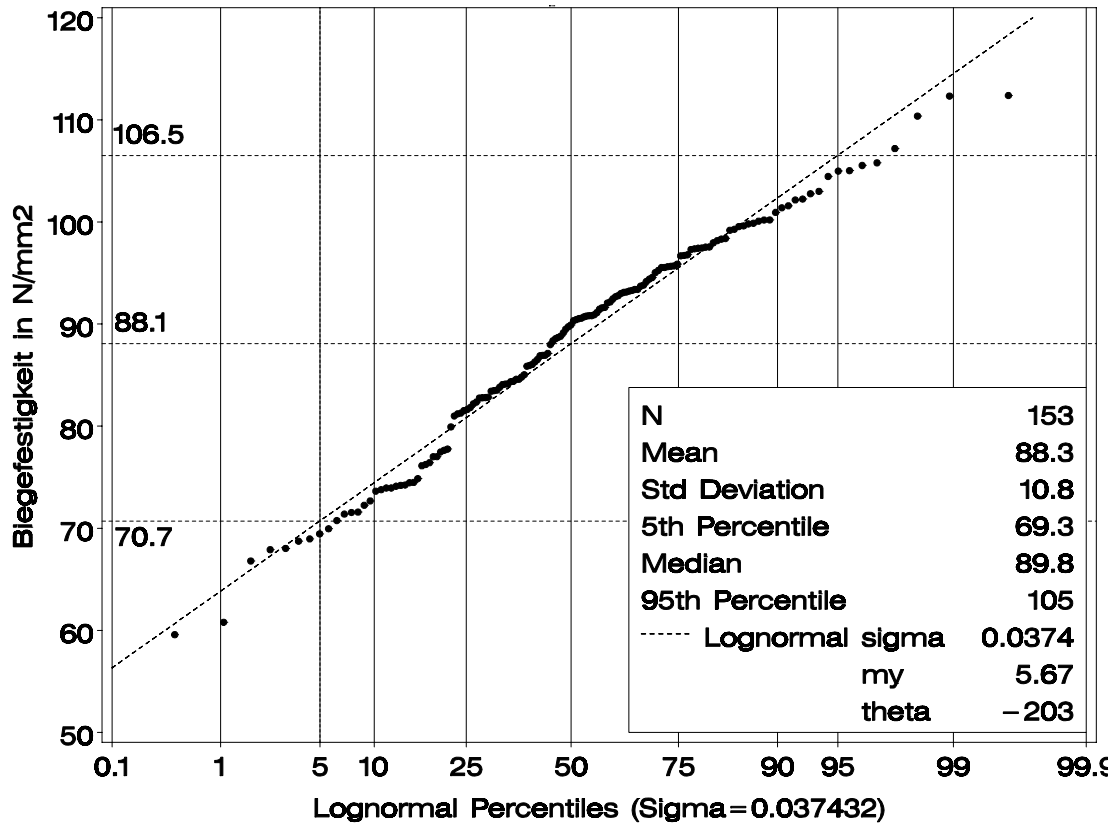


Bild 2-10 Empirische Verteilung und angepasste Lognormalverteilung der Keilzinken-Biegefestigkeit; Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Klassen 4 und 5 der hybriden und kombinierten Träger; Werte an den horizontalen Hilfslinien entsprechen dem 5%-, 95%-Quantil und dem Median aus der angepassten Lognormalverteilung.

3 Simulation der hybriden Versuchsträger mit dem Rechenmodell

3.1 Allgemeines

Der Vergleich der Biegefestigkeit von hybriden mit der von kombinierten Trägern in Abschnitt 2.4.2 zeigte zunächst, dass auch Hybridträger das Potenzial für hohe Biegefestigkeiten besitzen. Da aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs ($n=5$ und $n=6$) in den beiden Tragfähigkeitsklassen mit den Versuchswerten die mittlere und die charakteristische Biegefestigkeit nur näherungsweise abgeschätzt werden können, sind die Versuchswerte zur Ableitung von Bemessungsvorschlägen zu ungenau.

Beabsichtigt ist die Herleitung von Bemessungsvorschlägen für Hybridträger u.a. mithilfe des Rechenmodells später in Abschnitt 4.2.1. Daher soll zunächst gezeigt werden, dass das Rechenmodell auch zur Vorhersage der Biegefestigkeit von hybriden Trägern geeignet ist. Dazu werden die zwei Kollektive der Tragfähigkeitsklassen SH-30-hyb und H-30-hyb mit den natürlichen Streuungen der strukturellen und mechanischen Eigenschaften der Buchen- und Nadelholzbretter wirklichkeitsnah simuliert und die Biegefestigkeit sowie der Biege-Elastizitätsmodul berechnet. Bezüglich der Eignung des Rechenmodells und der grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Simulation und Berechnung der mechanischen Eigenschaften von kombinierten Versuchsträgern aus Buche sei auf die Arbeiten von Blaß et al. 2005 und Frese 2006 hingewiesen.

3.2 Vereinbarungen

In Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, dass die strukturellen Eigenschaften der Buchenbretter für die Hybridträger mit denjenigen des Vergleichsmaterials übereinstimmen. Bezüglich der Simulation der Buchenlamellen sind daher im Rechenmodell keine Änderungen vorzunehmen, weil die darin vorhandenen Simulations-Algorithmen auf den Eigenschaften des Vergleichsmaterials beruhen.

Folgende Modellannahmen waren jedoch bei der Simulation der Hybridträger im Rechenmodell noch zu berücksichtigen: Der unsymmetrische Querschnitt der Träger wurde gemäß Bild 3-1 modelliert. Dabei wurden die Klassenunterschiede bei den Buchenlamellen jeweils innerhalb der Druck- oder Zugzone nicht berücksichtigt, s. hierzu den Aufbau in Tabelle 2-2. Um den Einfluss des streuenden Elastizitätsmoduls der Nadelholzbretter geeignet zu erfassen, wird allen Elementen eines Nadelholzbrettes ein Wert aus der Betaverteilung in Bild 2-5 zugewiesen. Damit ist der Elastizitätsmodul in Brett längsrichtung konstant und es wird ausschließlich die Streuung innerhalb des Brettangebots berücksichtigt. Für Nadelholzelemente werden weder Risse noch Plastizität modelliert. Die Länge der Nadelholzbretter sei zwischen 4,5 m und 5 m gleichverteilt. Die simulierten Träger besitzen in Längsrichtung 36 Elemente von 150 mm Länge und 10 Lamellen mit einer Dicke von 30 mm.

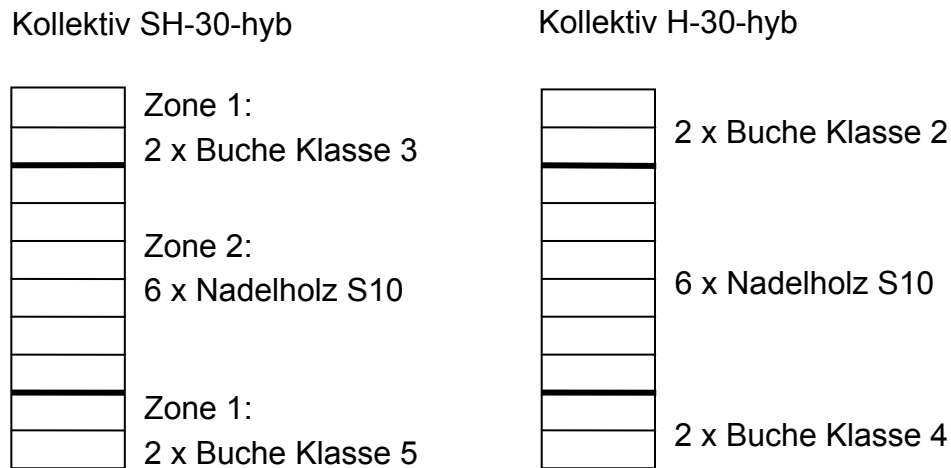


Bild 3-1 Aufbau der modellierten Hybridträger

3.3 Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Versuchsergebnissen

Bild 3-3 zeigt für 500 Simulationen je Kollektiv den Zusammenhang zwischen der simulierten Biegefestigkeit und der Nummer des Elements, in dem vom Rechenmodell der erste Riss registriert wurde. Die Teilbilder a und b entsprechen den Simulationsergebnissen der Kollektive SH-30-hyb und H-30-hyb. Auf der x-Achse sind die Elementnummern als Abfolge der ersten drei Lamellen aufgetragen. Die Elementkategorie – Holz oder Keilzinkung – ist durch Symbole gekennzeichnet. Entsprechend der getroffenen Vereinbarung werden in der dritten Lamelle aus Nadelholz (Elemente 73 bis 108) keine Risse modelliert. Erwartungsgemäß nehmen die mittlere (gestrichelte Linie oben) sowie die charakteristische Biegefestigkeit (gestrichelte Linie unten) und der Anteil des Keilzinkenversagens mit abnehmender Brettklasse in der Zugzone ab. Die vorherrschende Bedeutung der Randlamelle und der darin vorhandenen Äste sowie Keilzinkenverbindungen für die charakteristische Biegefestigkeit wird deutlich: Die Werte unterhalb des charakteristischen Werts werden ausschließlich von Trägern bestimmt, die in der Randlamelle der Zugzone in den Elementen 13 bis 24 den ersten Riss aufweisen. Während die dickeren vertikalen Linien jeweils den Trägeranfang bzw. das Trägerende kennzeichnen, entsprechen die dünneren der Lasteinleitung in den Drittelpunkten. Folgerichtig werden die Risse vorwiegend in denjenigen Elementen modelliert, die zwischen den Lasteinleitungspunkten bzw. im Bereich des maximalen Biegemoments liegen.

In Tabelle 3-1 a und b werden die Versuchs- den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. In der rechten Spalte ist das Verhältnis aus Simulations- durch Versuchsergebnis angegeben. Das Verhältnis bezüglich der mittleren Biegefestigkeit beträgt in der Tragfähigkeitsklasse SH-30-hyb 1,11. Der Grund für diese größere Abweichung ist sehr wahrscheinlich der kleine Stichprobenumfang von 5 Trägern, für

den der Mittelwert noch keine statistisch gesicherte Größe ist. Die Übereinstimmung beim Mittelwert ist in der Tragfähigkeitsklasse H-30-hyb sehr gut. In beiden Kollektiven ist die Standardabweichung der Biegefestigkeit bei den Simulationen höher als bei den Versuchen. Dementsprechend sind bei den Simulationen Minimalwerte kleiner und Maximalwerte größer. Der Mittelwert des Biege-Elastizitätsmoduls lässt sich anhand der Simulationsrechnungen gut bestätigen.

Bild 3-2 zeigt abschließend eine Gegenüberstellung der Versuchs- und Simulationsergebnisse, welche die prinzipielle Übereinstimmung zwischen den beiden Ergebnissen verdeutlicht. Durch die Simulationsergebnisse wird zusätzlich der Unterschied zwischen der mittleren und der charakteristischen Biegefestigkeit im Kollektiv SH-30-hyb und H-30-hyb erwartungsgemäß wiedergegeben. Weil dieser Unterschied mit den wenigen Versuchswerten nicht belegt werden kann, zeigt sich hier die Leistungsfähigkeit des Rechenmodells, mit dem Tendenzen sachlogisch aufgezeigt werden können. Es wird daher angenommen, dass mit dem Rechenmodell, das zur Simulation von Hybridträgern programmtechnisch angepasst wurde, zuverlässig die Biegefestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul vorhergesagt werden können.

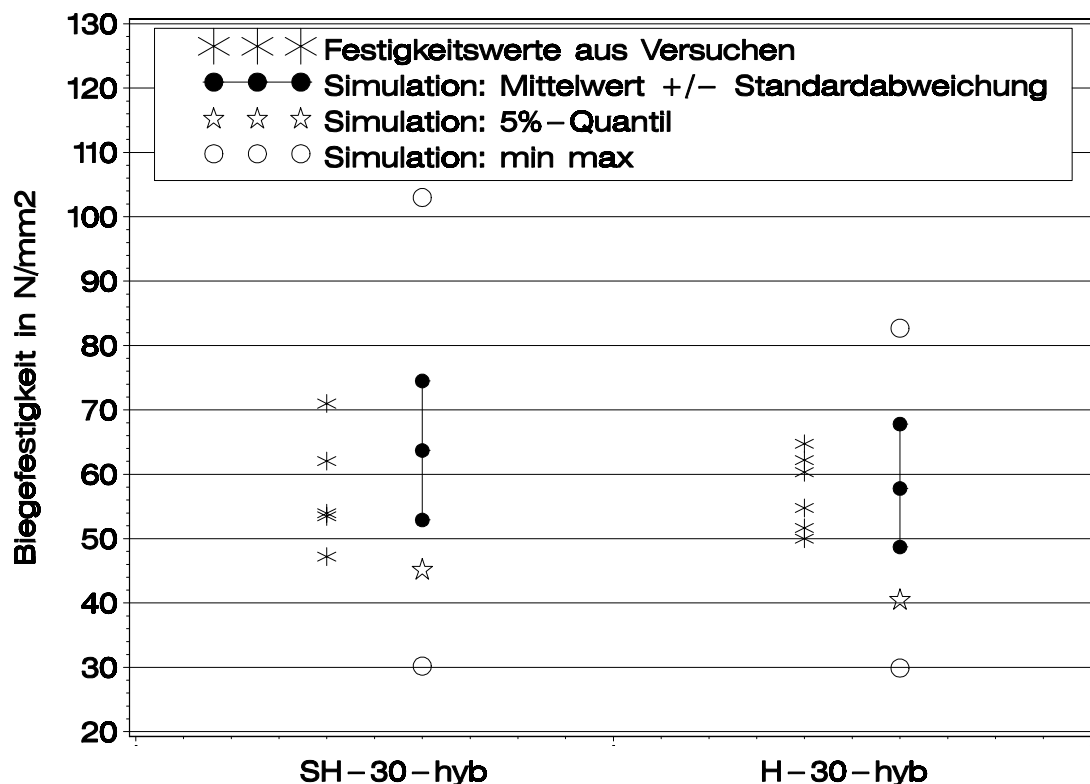


Bild 3-2 Biegefestigkeit der hybriden Versuchsträger gruppiert nach Tragfähigkeitsklasse und zugehörige Simulationsergebnisse

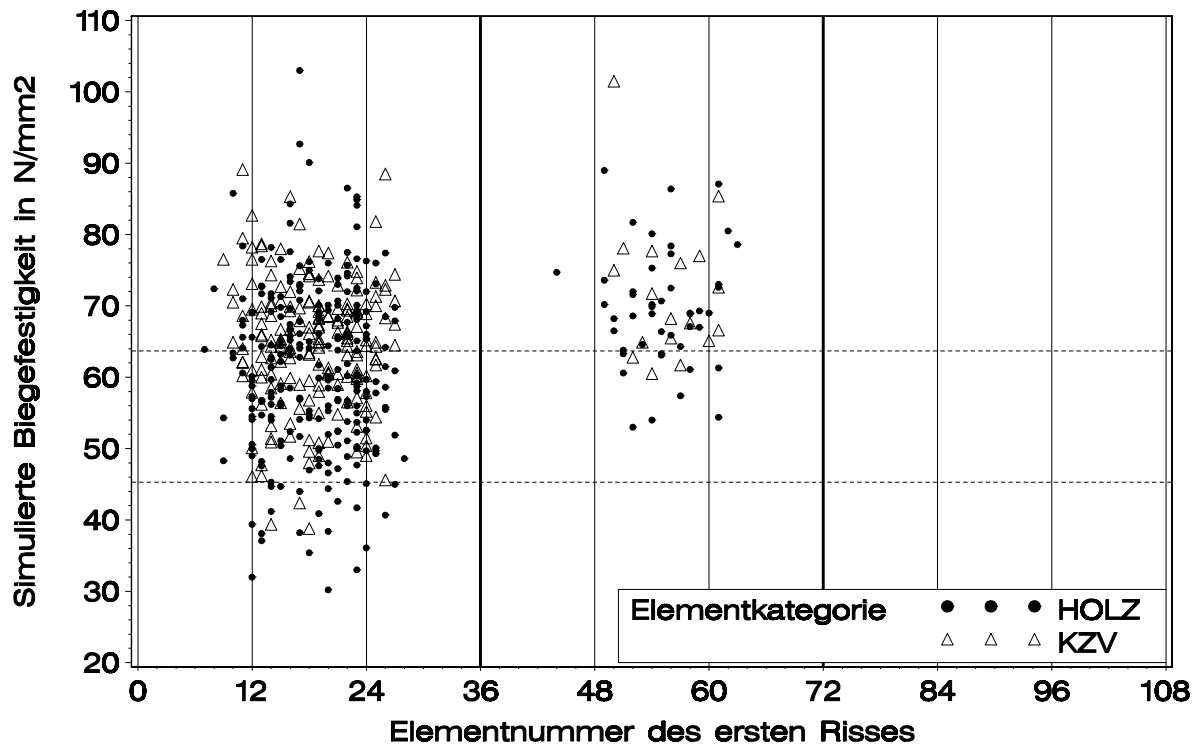


Bild 3-3 a Simulierte Biegefestigkeit des Kollektivs SH-30-hyb über der Elementnummer des ersten Risses

Tabelle 3-1 a Versuchs- und Simulationsergebnisse Kollektiv SH-30-hyb

		Versuch	Simulation	Verhältnis
Biegefestigkeit N/mm ²	n	5	500	-
	\bar{x}	57,5	63,7	1,11
	s	9,19	10,8	1,18
	$\tilde{x}_{0,05}$	42,4 ¹	45,3	1,07
	min	47,2	30,2	0,64
	max	70,6	103	1,46
E-Modul N/mm ²	\bar{x}	14400	14200	0,99
	s	735	456	0,62
	min	13900	13000	0,94
	max	15800	15500	0,98

¹ hilfsweise aus angepasster Normalverteilung

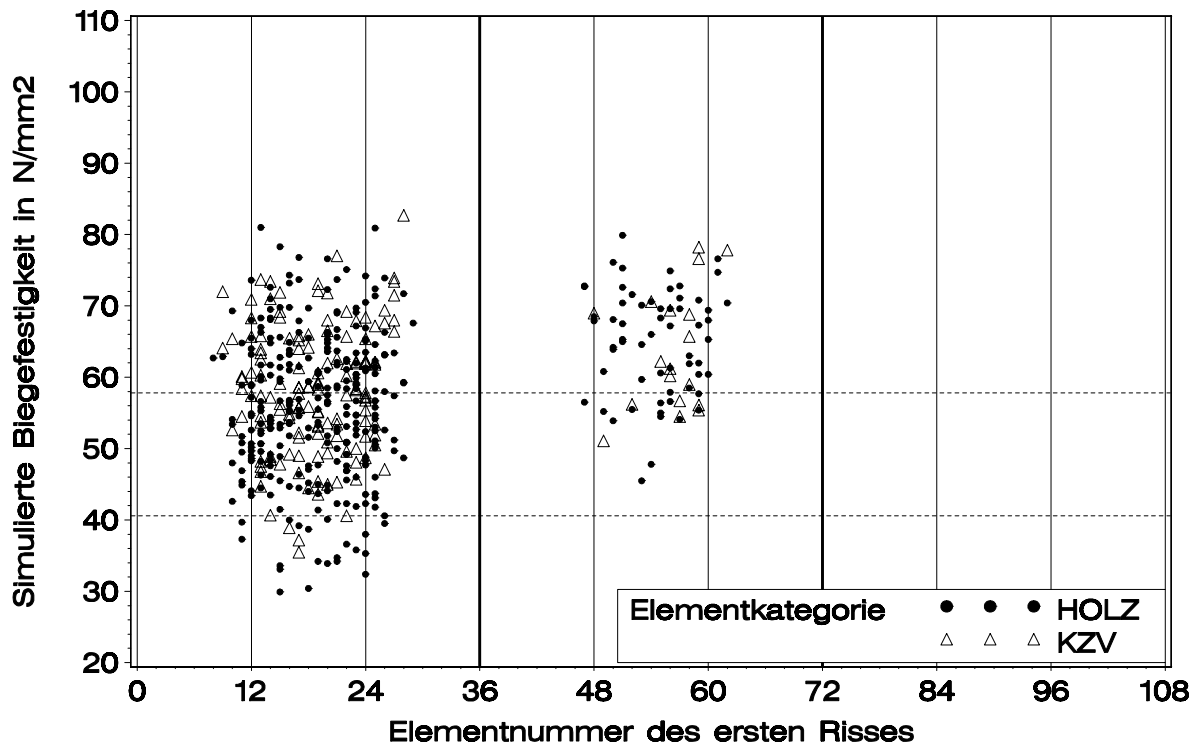


Bild 3-3 b (Forts.) Simulierte Biegefestigkeit des Kollektivs H-30-hyb über der Elementnummer des ersten Risses

Tabelle 3-1 b (Forts.) Versuchs- und Simulationsergebnisse Kollektiv H-30-hyb

		Versuch	Simulation	Verhältnis
Biegefestigkeit N/mm ²	n	6	500	-
	\bar{x}	57,3	57,8	1,01
	s	6,00	9,96	1,66
	$\tilde{x}_{0,05}$	47,4 ¹	40,6	0,86
	min	50,0	29,9	0,60
	max	64,6	82,7	1,28
E-Modul N/mm ²	\bar{x}	14200	13300	0,94
	s	700	369	0,53
	min	13600	12200	0,90
	max	15300	14500	0,95

¹ hilfswise aus angepasster Normalverteilung

4 Vorschläge für Festigkeitsklassen

4.1 Festigkeitsklassen für kombinierte Brettschichtholzträger aus Buche

In Tabelle 4-1 sind als Basis für die weiteren Überlegungen Vorschläge für Festigkeitsklassen für kombinierte Träger aus Buche aufgeführt. Sie wurden in dieser Form von Frese 2006 veröffentlicht. Die Bemessungsgleichung für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter und der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit lautet dazu:

$$f_{m,g,k} = -2,87 + 0,844 \cdot f_{m,j,k} - 0,0103 \cdot f_{m,j,k}^2 - 0,192 \cdot f_{t,\ell,k} - 0,0119 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,0237 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (2)$$

Tabelle 4-1 Rechenwerte für charakteristische Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte; Anforderungen Lamellen und Keilzinkenverbindungen

	GL28c	GL32c	GL36c	GL40c	GL44c	GL48c
Festigkeitskennwerte in N/mm ²						
$f_{m,g,k}$	28	32	36	40	44	48
Steifigkeitskennwerte in N/mm ²						
$E_{0,mean}$	13500	13500	13500	14300 ¹	15100	15100
$E_{0,05}$	12700	12700	12700	13700 ¹	14700	14700
Rohdichtekennwerte in kg/m ³						
ρ_k	620	620	620	620	620	620
Anforderungen an die Randlamellen ($\geq h/6$)						
DEB	$\leq 0,33$	$\leq 0,20$	$\leq 0,042$	- ²	$\leq 0,20$	$\leq 0,042$
E_{dyn}	-	-	-	- ²	>15000	>15000
$f_{t,\ell,k}$	22	27	32	36 ¹	40	48
$f_{m,j,k}$	≥ 46	≥ 51	≥ 56	≥ 62 ¹	≥ 67	≥ 70
Anforderungen an die Kernlamellen ($\leq 2/3h$)						
DEB	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$	- ²	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$
E_{dyn}	-	-	-	- ²	>14000	>14000
Charakteristische Biegefestigkeit in N/mm ² nach Gleichung (2)						
$f_{m,g,k}$	28,1	32,1	36,2	40,3	44,1	48,6
¹ Werte interpoliert; ² Grenzwerte für den DEB-Wert und den dynamischen Elastizitätsmodul werden hier nicht angegeben, weil die Anforderungen an die charakteristische Festigkeit der Bretter und Keilzinkenverbindungen nur durch Interpolation festgelegt wurden.						

4.2 Festigkeitsklassen für Hybridträger aus Buche und Nadelholz

4.2.1 Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls mithilfe des Rechenmodells

Über die in Tabelle 4-1 angegebenen Anforderungen an die Rand- und Kernlamellen sind zugleich die Elastizitätsmoduln im Verbundquerschnitt von kombinierten Trägern festgelegt, welche für die Verteilung der Biegespannungen in den Zonen 1 und 2 entscheidend sind. Dazu sind in Bild 4-1 die mittleren dynamischen Elastizitätsmoduln angegeben, die in den zwei Zonen von kombinierten Brettschichtholzträgern von fünf aus Tabelle 4-1 ausgewählten Festigkeitsklassen vorliegen. Diese Aufbauten waren u.a. die Grundlage für die numerische Herleitung von Gleichung (2) (Frese 2006). Insofern ist diese Bemessungsgleichung zunächst nur für die Steifigkeitsverhältnisse der kombinierten Träger in Bild 4-1 gültig, deren Anteil der Randlamellen jeweils $4/20=20\%$ beträgt. Bei den Festigkeitsklassen GL28c bis GL36c, die eine visuelle Sortierung der Bretter voraussetzen, liegt nur aufgrund der höheren Grenze für den DEB-Wert der Kernlamellen kein ausgeprägter Unterschied zwischen den Elastizitätsmoduln der Bretter in den Zonen 1 und 2 vor. Anders ist es bei den Klassen GL44c und GL48c. Hier sind wegen der unterschiedlichen Grenzen für den Elastizitätsmodul – bedingt durch eine maschinelle Sortierung – die Unterschiede ausgeprägter.

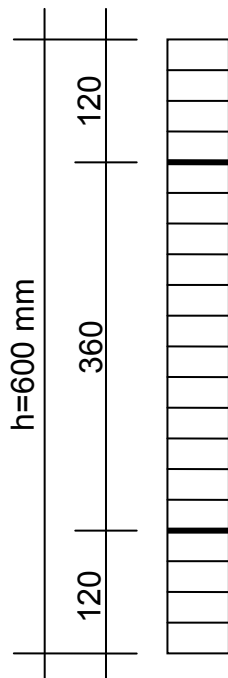
	GL28	GL32	GL36	GL44 u. GL48
	Zone 1 ($h/5 > h/6$):			
	14800	14900	15100	16400
Zone 2 ($3/5h < 2/3h$):				
für Buche bei kombinierten Trägern:				
	14500	14500	14500	14500
für Nadelholz S10 bei Hybridträgern:				
			12640	
Zone 1 ($h/5 > h/6$):				
	14800	14900	15100	16400

Bild 4-1 Mittelwerte des dynamischen Elastizitätsmoduls in N/mm^2 der Buchen- und Nadelholzbretter, die bei kombinierten bzw. alternativ bei hybriden Trägern der ausgewählten Festigkeitsklassen vorliegen

Über Simulationsrechnungen lässt sich nun der Einfluss des im Mittel kleineren Elastizitätsmoduls von Nadelholzlamellen der Sortierklasse S10, die im Kernbereich ersatzweise für Buche eingesetzt werden sollen, auf die charakteristische Biegefestigkeit ermitteln. Dafür werden in der Zone 2 für die Klassen GL32, GL36, GL44 und GL48 Nadelholzlamellen der Sortierklasse S10 statt der zu Grunde gelegten Buchenlamellen simuliert. Die charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen wird entsprechend der Werte in Tabelle 4-1 simuliert. Die Simulationsergebnisse, je Klasse 500 Berechnungen, sind in Bild 4-2 a bis d dargestellt. Vereinbarungsgemäß werden in den Elementen der 5. Lamelle – also in den Nadelholzbrettern – keine Risse modelliert. Es ist offensichtlich, dass diese Vereinfachung ohne Einfluss auf die charakteristische Biegefestigkeit bleibt. In den Teilbildern unten sind die Verteilungen der simulierten Biegefestigkeit und angepasste Normalverteilungen dargestellt. Die folgende Tabelle 4-2 verdeutlicht den moderaten Einfluss der veränderten Steifigkeitsverhältnisse auf die mechanischen Eigenschaften der Brettschichtholzträger, wenn ersatzweise Nadelholzlamellen im Kernbereich verwendet werden. Bedingt durch die Zunahme der Biegerandspannung in den Buchenlamellen werden die Werte der charakteristischen Biegefestigkeit in den einzelnen Festigkeitsklassen geringfügig unterschritten. Die Anforderungen liegen bis zu 3% über den simulierten Werten.

Tabelle 4-2 Charakteristische Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul bei hybriden Trägern; Anteil der Randlamellen jeweils 20%

	GL32	GL36	GL44	GL48
$f_{m,g,k}$ N/mm ²	31,5 ¹ (1,02 %) ²	34,9 ¹ (1,03 %) ²	42,9 ¹ (1,03 %) ²	47,6 ¹ (1,01 %) ²
$E_{0,mean}$ N/mm ²	13200	13200	14700	14700
$E_{0,05}$ N/mm ²	12400	12400	14200	14200
¹ 5%-Quantilen aus den Legenden in Bild 4-2 a bis d				
² geforderte charakteristische Biegefestigkeit geteilt durch simulierte in %				

Abweichend vom Aufbau gemäß Bild 4-1 werden zum Vergleich Simulationsrechnungen für einen hybriden Aufbau mit 18 statt 20 Lamellen durchgeführt, bei dem der Anteil der Randlamellen nur 3/18=16,7% der Höhe beträgt. Dieser Aufbau entspricht der Mindestforderung an den Anteil der Randlamellen in EN 1194. Die entsprechen-

den Simulationsergebnisse sind im Anhang in Bild A-10 a bis d dargestellt. Die mechanischen Eigenschaften enthält Tabelle 4-3. Erwartungsgemäß fallen alle Ergebnisse etwas geringer aus als in Tabelle 4-2. Die Verringerung des Anteils der Randlamellen von 20% auf 16,7% macht sich in einer weiteren Abnahme der simulierten charakteristischen Biegefestigkeit bemerkbar.

Tabelle 4-3 Charakteristische Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul bei hybriden Trägern; Anteil der Randlamellen jeweils 16,7 %

	GL32	GL36	GL44	GL48
$f_{m,g,k}$ N/mm ²	31,3 ¹ (1,02%) ²	34,8 ¹ (1,03%) ²	42,4 ¹ (1,04%) ²	44,6 ¹ (1,08%) ²
$E_{0,mean}$ N/mm ²	13000	13100	14400	14400
$E_{0,05}$ N/mm ²	12300	12300	13900	13900

¹ 5%-Quantilen aus den Legenden in Bild A-10 a bis d

² geforderte charakteristische Biegefestigkeit geteilt durch simulierte in %

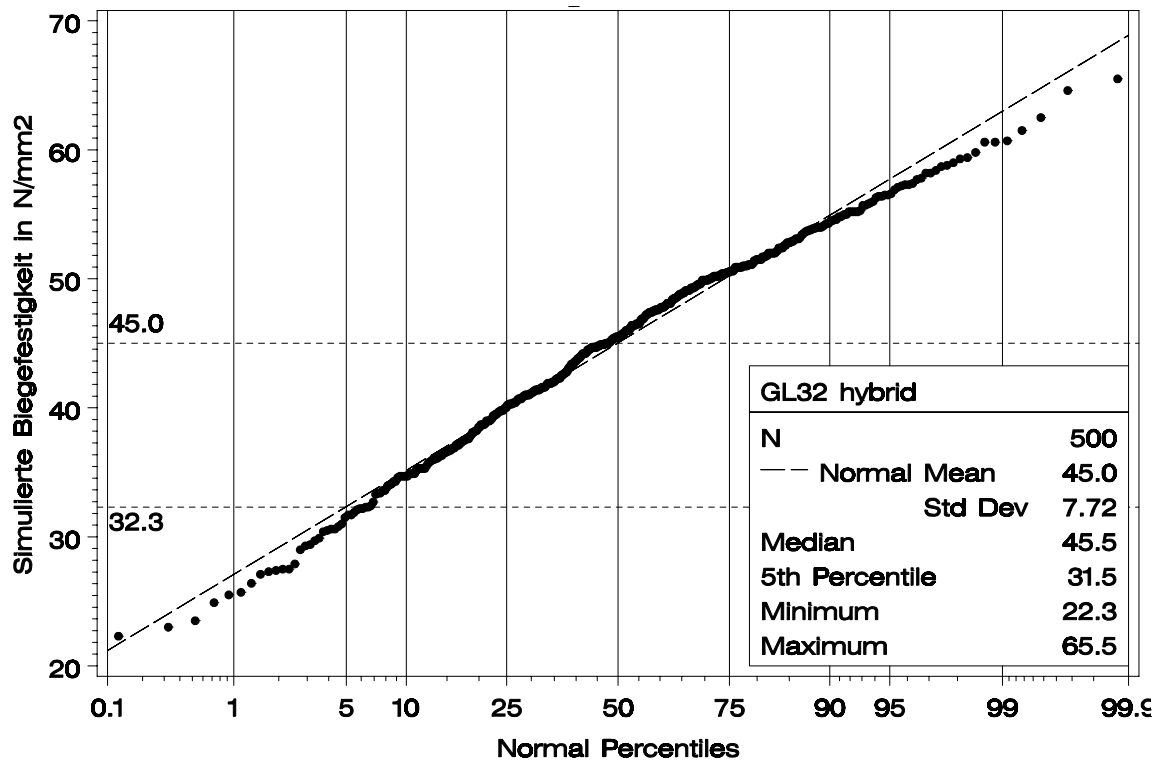
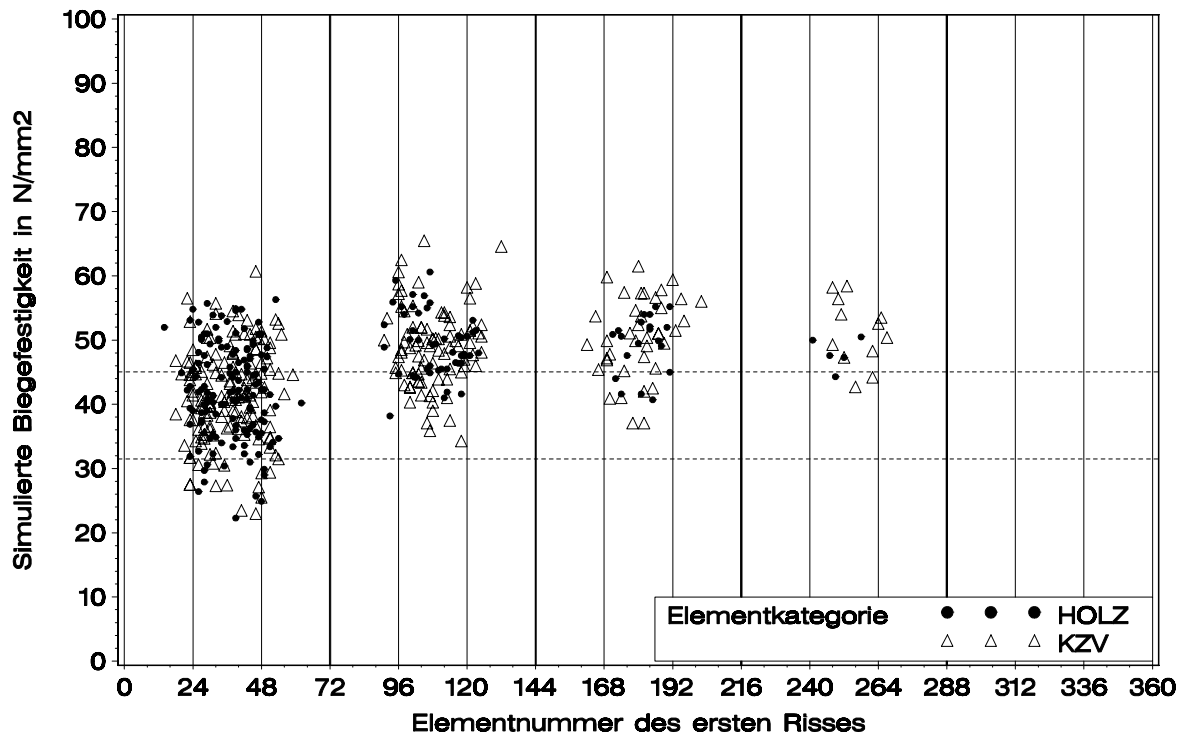


Bild 4-2 a Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL32 hybrid mit Aufbau in Bild 4-1; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

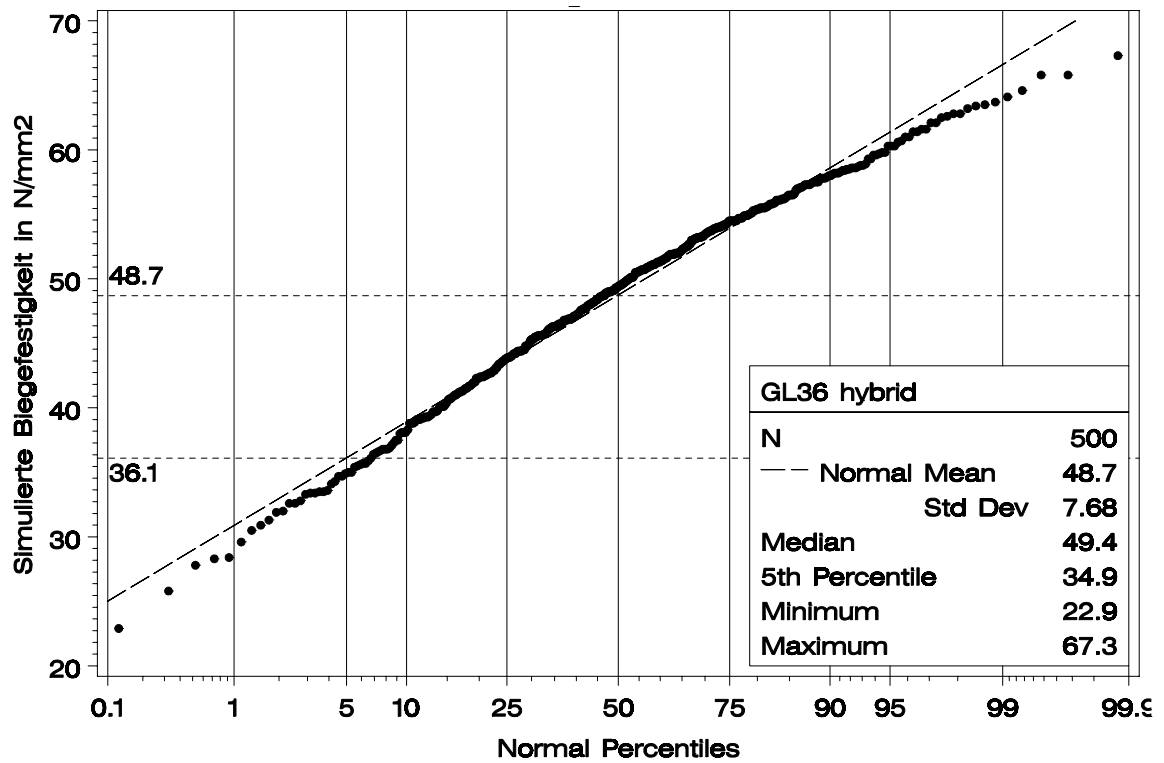
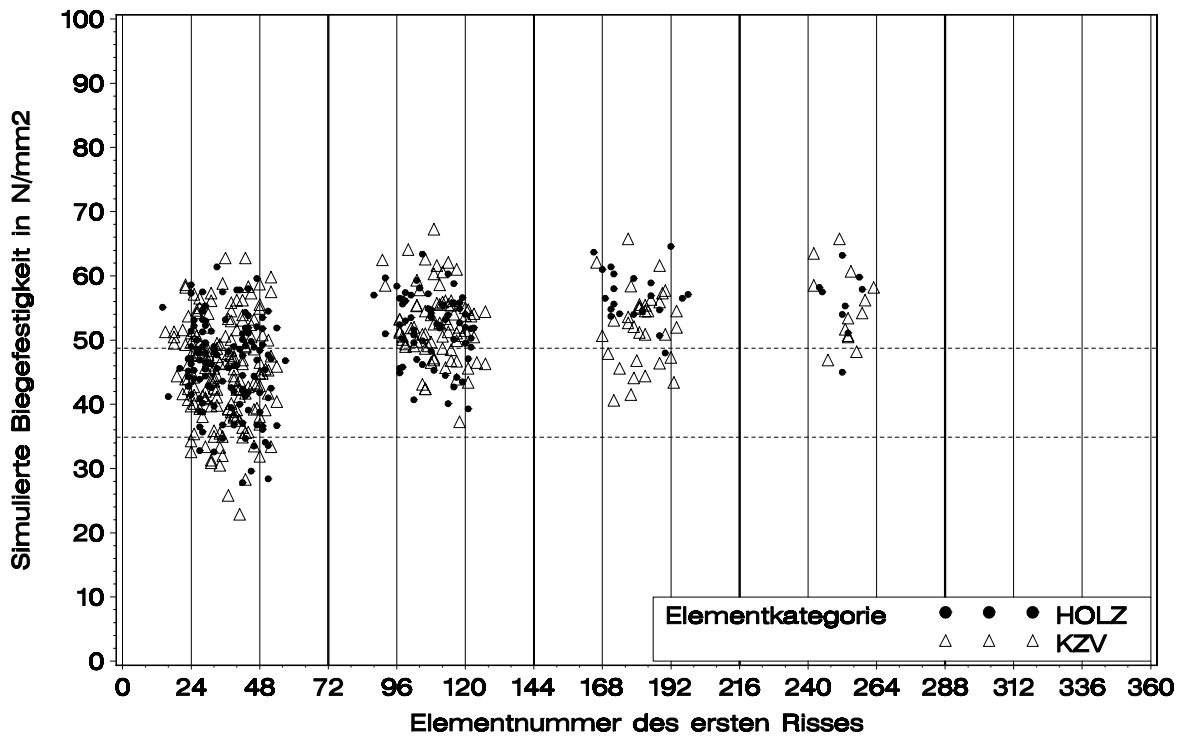


Bild 4-2 b (Forts.) Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL36 hybrid mit Aufbau in Bild 4-1; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

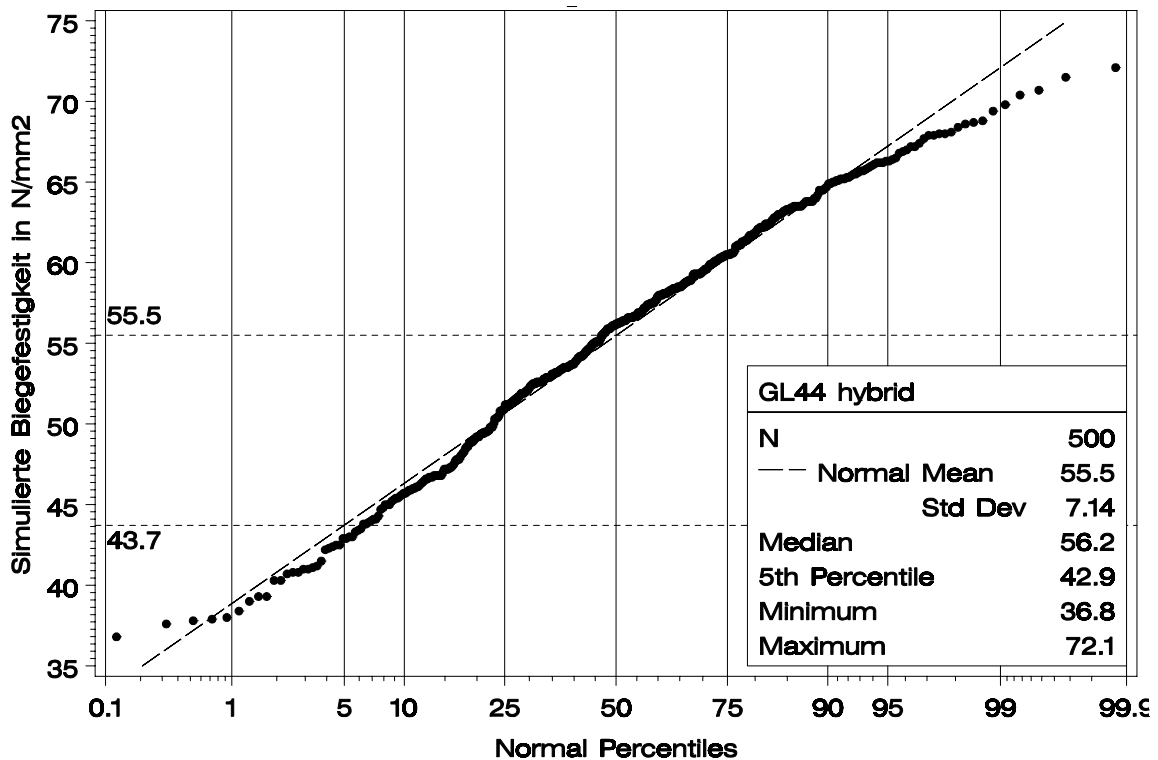
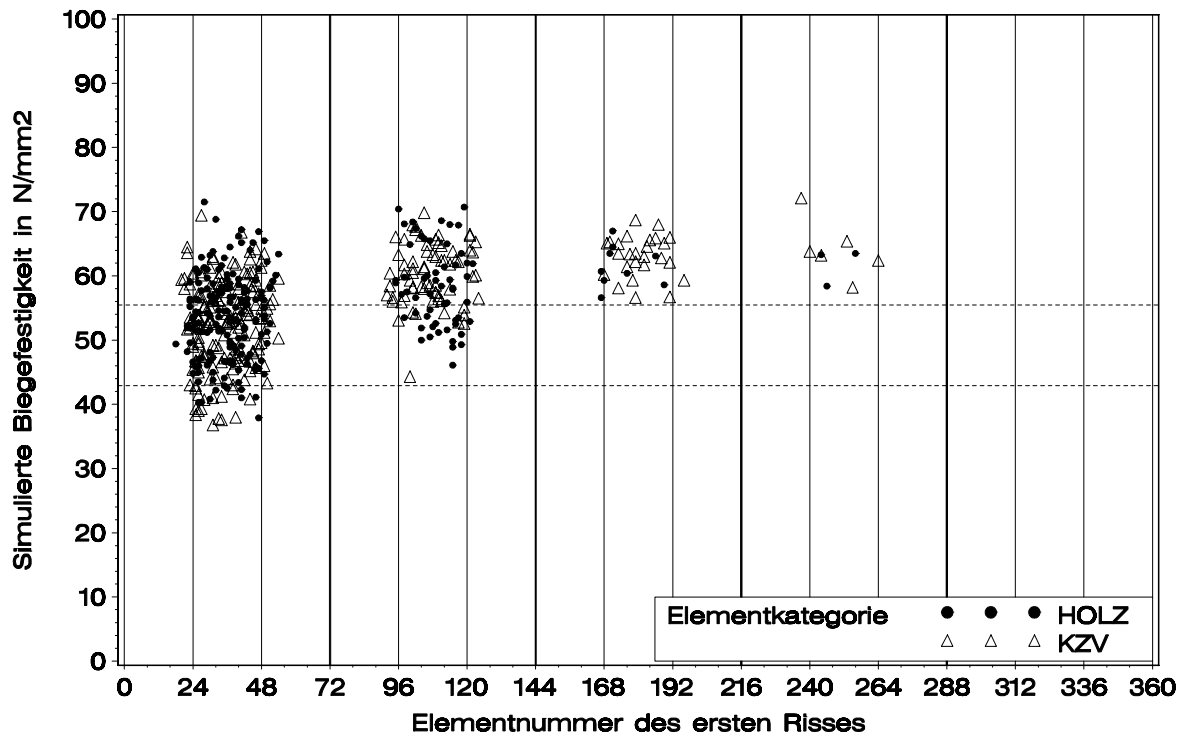


Bild 4-2 c (Forts.) Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL44 hybrid mit Aufbau in Bild 4-1; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

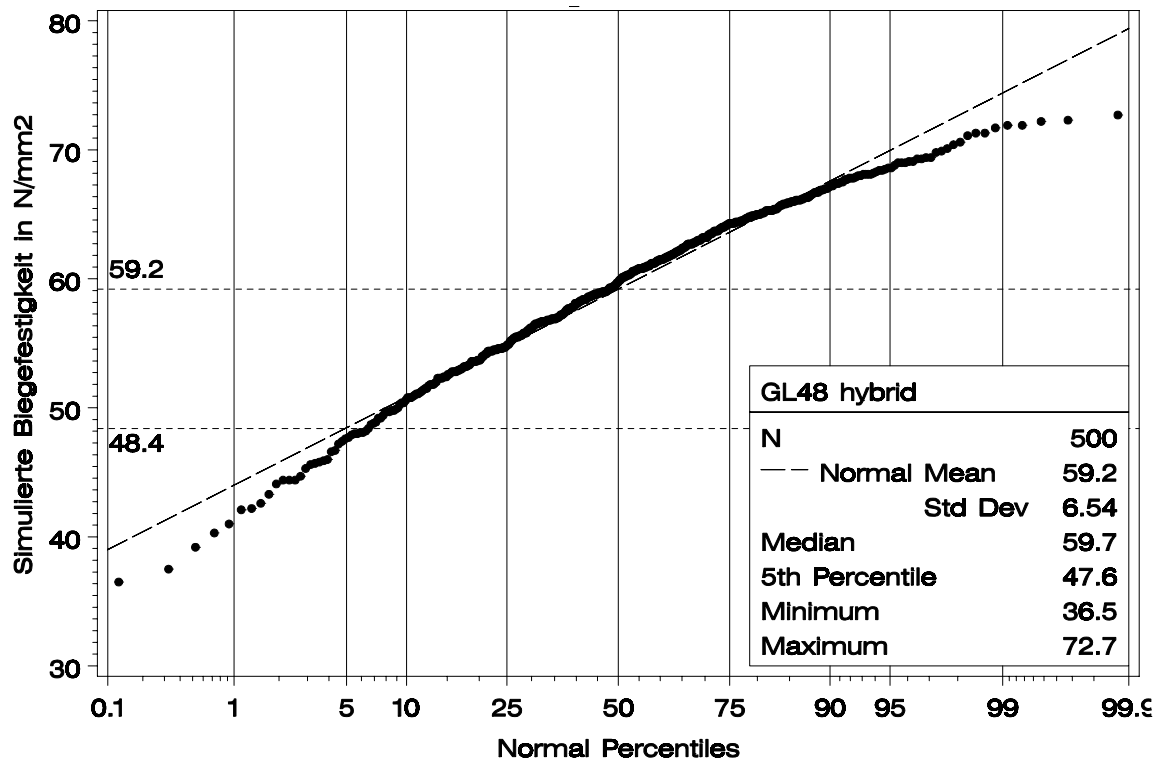
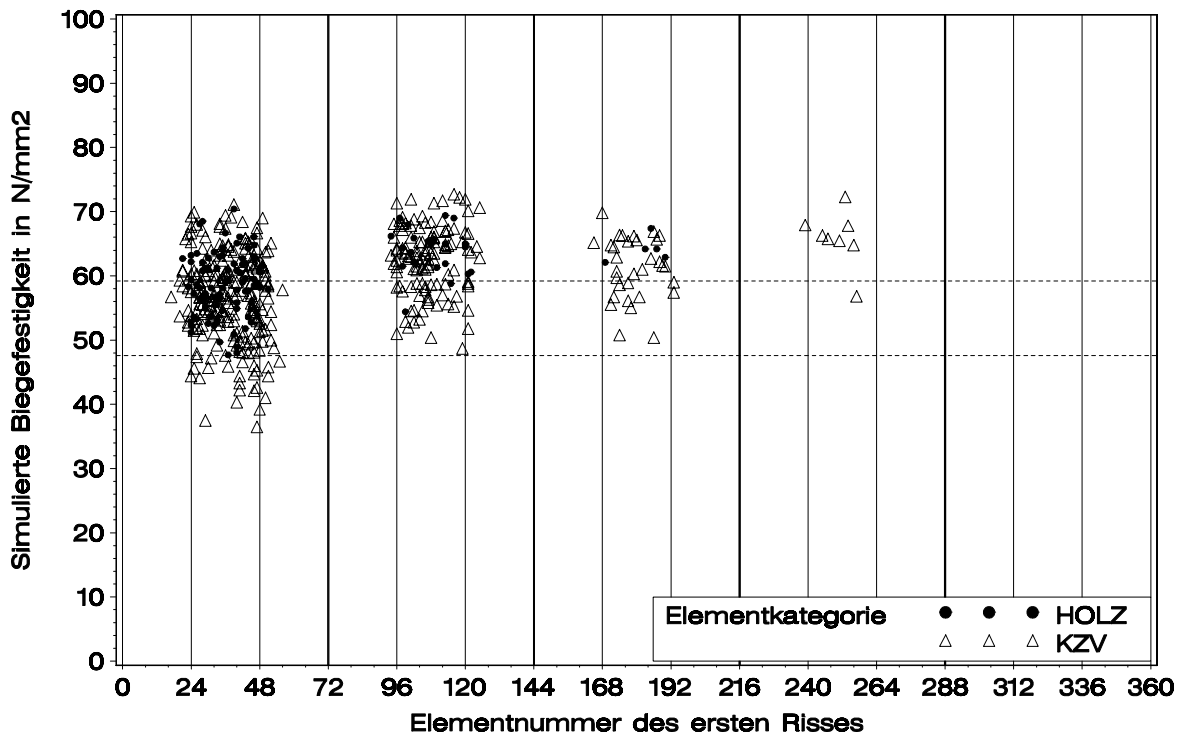


Bild 4-2 d (Forts.) Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL48 hybrid mit Aufbau in Bild 4-1; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

4.2.2 Berechnungen mithilfe der Verbundtheorie

Anhand der Simulationsergebnisse wurde in Abschnitt 4.2.1 gezeigt, dass die geforderte charakteristische Biegefestigkeit nicht erreicht wird, wenn im Kern Nadelholz statt Buchenlamellen verwendet werden. Dieses Ergebnis soll mithilfe der Verbundtheorie überprüft werden: Danach werden die Biegespannungen eines Verbundquerschnitts nach Gleichung (3) berechnet. Anhand der mittleren dynamischen Elastizitätsmoduln, die in Bild 4-1 den zwei Zonen von kombinierten oder hybriden Trägern zugeordnet sind, und anhand der daraus berechneten mittleren effektiven Biegesteifigkeiten, kann die Spannungserhöhung in den Buchen-Randlamellen bei hybriden im Vergleich mit den kombinierten Trägern ermittelt werden. Dazu sind die Spannungserhöhungsfaktoren η in Tabelle 4-4 berechnet.

$$\sigma_i = \frac{M}{(EI)_{ef}} \cdot z_i \cdot E_i \quad (3)$$

Tabelle 4-4 Spannungserhöhung η ermittelt aus den effektiven Biegesteifigkeiten von kombinierten und hybriden Trägern in Bild 4-1; Trägerbreite 100 mm

		GL28	GL32	GL36	GL44	GL48
$(EI)_{ef}$	hybrid	25,80	25,94	26,22	28,06	28,06
MNm	kombiniert	26,52	26,66	26,95	28,78	28,78
	$\eta = \frac{(EI)_{ef,kom}}{(EI)_{ef,hyb}}$	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03

Demnach führt die alternative Verwendung von Nadelholz im Kernbereich zu einer Spannungserhöhung in den Buchen-Randlamellen von durchweg 3%. Da bei den Simulationsrechnungen die Anforderungen um bis zu 3% über der simulierten charakteristischen Biegefestigkeiten liegen, besteht zwischen Simulation und Verbundtheorie Übereinstimmung. Offensichtlich spielt die Streuung des Elastizitätsmoduls innerhalb des Brettangebots, die bei den Simulationen für das Nadelholz abgebildet wird, für die Ermittlung der Spannungserhöhung keine Rolle.

Die Faktoren in Tabelle 4-4 sind jedoch nur für die Aufbauten gemäß Bild 4-1 streng gültig. Darin ist festgelegt, dass der Anteil der Kernlamellen stets 60% und derjenige der Randlamellen jeweils 20% beträgt. Dieser Wert übersteigt die noch wirtschaftlichere Mindestforderung $h/6=16,7\%$ nach EN 1194. Es wird daher bei den Hybridträgern der Einfluss eines veränderlichen Anteils β an Kernlamellen aus Nadelholz auf die Spannungserhöhung ermittelt. Diese kann in Abhängigkeit von β nach Gleichung (4) berechnet werden. Darin wird die effektive Biegesteifigkeit eines kombinierten

Trägers durch die entsprechende eines Hybridträgers geteilt. In Bild 4-3 ist dazu eine erläuternde Skizze dargestellt. Gleichung (4) wird für die Aufbauten der fünf Festigkeitsklassen ausgewertet. Dabei werden für den Anteil α bei den kombinierten Trägern 0,60 und für die Elastizitätsmoduln die Mittelwerte in Bild 4-1 eingesetzt. Der Spannungserhöhungsfaktor η kann dann in Abhängigkeit vom veränderlichen Anteil β in Form von vier Kurven dargestellt werden, s. Bild 4-4. Für GL44 und GL48 sind die Kurven deckungsgleich, weil die Elastizitätsmoduln bei den kombinierten bzw. hybriden Aufbauten identisch sind. Bild 4-4 zeigt, dass bei einem Verhältnis $\beta = 0,667$ (rechte vertikale Hilfslinie) die Spannungserhöhung bereits zwischen 1,04 und 1,05 liegt und die Verhältnisse der Simulationsergebnisse aus Tabelle 4-3 bestätigt. Das bedeutet für Hybridträger eine Verringerung der charakteristischen Biegefestigkeit von bis zu 5%. Die Schnittpunkte zwischen den vier Kurven und der linken vertikalen Hilfslinie bei $\beta = 0,60$ entsprechen erwartungsgemäß den Faktoren aus Tabelle 4-4.

Für die Klassen GL40 und GL48 ist $\eta < 1,00$ für $\beta \rightarrow 0$, weil sich der hybride Aufbau einem homogenen Träger nur aus hochwertigen Buchenlamellen angleicht. In diesem Fall dürfte die charakteristische Biegefestigkeit sogar um 2,5 % angehoben werden. Aufgrund des wenig ausgeprägten Unterschieds der mittleren Elastizitätsmoduln in den Zonen 1 und 2 bei den Festigkeitsklassen GL28 bis GL36 fällt diese Anhebung entsprechend gering aus und beträgt höchstens 1% für $\beta = 0$.

$$\eta = \frac{(EI)_{\text{ef,kom}}}{(EI)_{\text{ef,hyb}}} = \frac{(E_{2,\text{kom}} - E_{1,\text{kom}}) \cdot \alpha^3 + E_{1,\text{kom}}}{(E_{2,\text{hyb}} - E_{1,\text{hyb}}) \cdot \beta^3 + E_{1,\text{hyb}}} \quad (4)$$

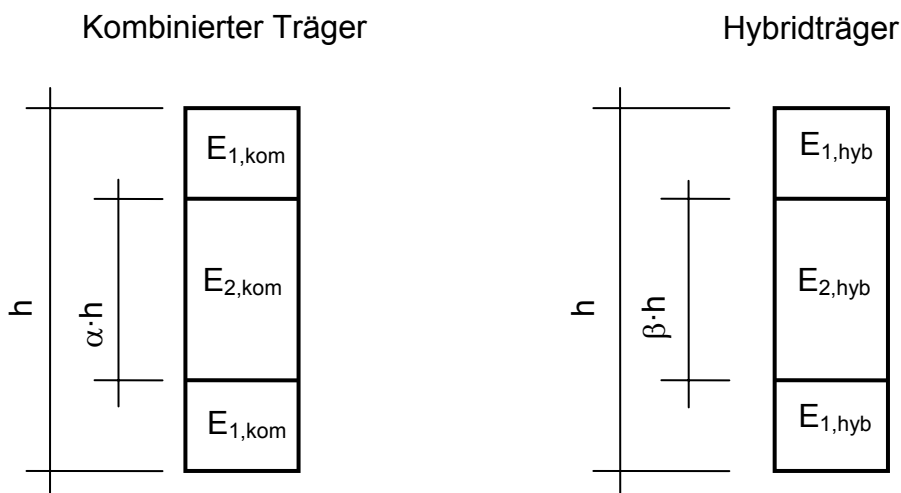


Bild 4-3 Darstellung des Anteils α und β sowie Zuordnung der Elastizitätsmoduln bei kombinierten (links) bzw. hybriden Trägern (rechts) für Gleichung (4)

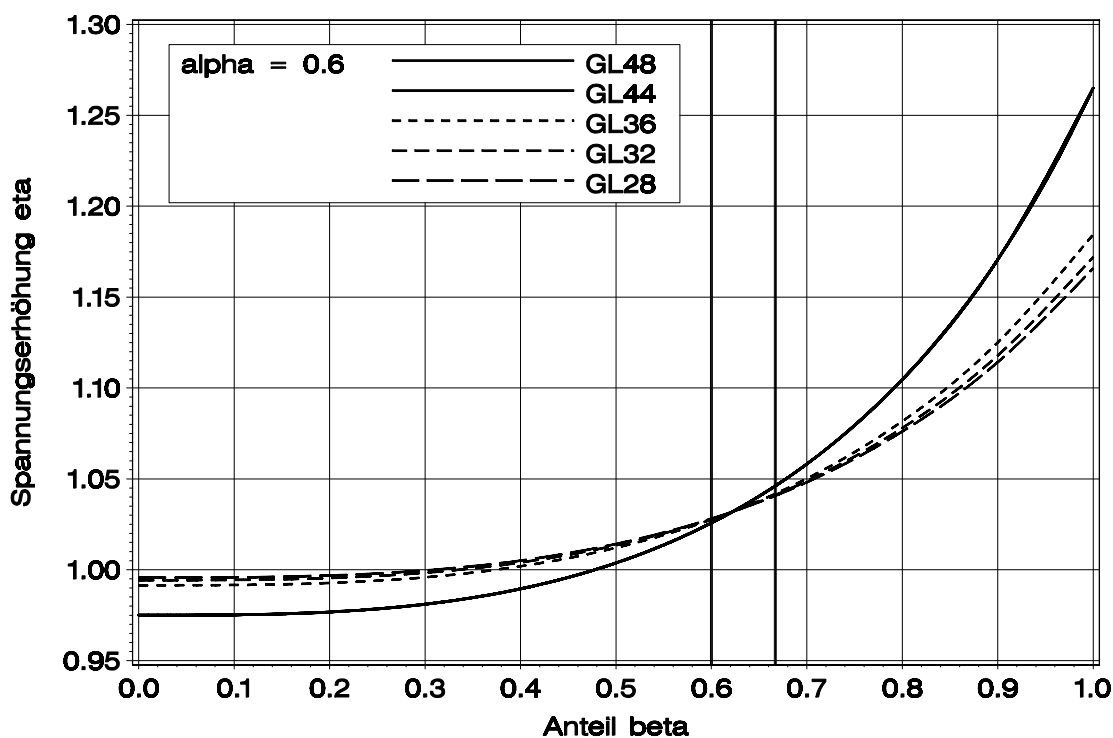


Bild 4-4 Spannungserhöhungsfaktor η für die Randspannung in Abhängigkeit vom Anteil der Kernlamellen aus Nadelholz β

4.2.3 Biegebeanspruchung der Nadelholzlamellen

Bisher blieb unberücksichtigt, dass die Nadelholzlamellen im Kernbereich eine endliche charakteristische Biegefestigkeit besitzen. Es ist daher nachzuweisen, dass die Verbundwirkung nicht zu Überbeanspruchungen im Nadelholz führt. Bei der folgenden Überlegung dazu bleiben Sicherheits- und Modifikationsbeiwerte unbeachtet. Bild 4-5 zeigt die idealisierten Spannungsverläufe der vier näher untersuchten Festigkeitsklassen für den Zustand, wenn die charakteristische Biegespannung in den Randlamellen beim Tragfähigkeitsnachweis am ideellen homogenen Querschnitt voll ausgenutzt wird. Für den Verbundquerschnitt bedeutet das eine in Wirklichkeit höhere Biegerandspannung als der Wert der Festigkeitsklasse. Insofern sind die vier Randspannungen stets höher als der entsprechende Wert. Mit den Verhältnissen aus Tabelle 4-5 ergeben sich dann in der Klebefuge zwischen den Buchen- und Nadelholzlamellen die entsprechenden Spannungssprünge. Sie zeigen, dass die charakteristische Biegefestigkeit von 24 N/mm^2 des Kerns aus Nadelholz der Sortierklasse S10 stets eingehalten wird. Das bezieht sich auf Träger, bei denen jeweils 20 % der Trägerhöhe mit Randlamellen ausgestattet sind. Für genau $1/6$ der Trägerhöhe beträgt nach Gleichung (5) die Biegerandspannung in der Festigkeitsklasse GL48 im

Nadelholz bereits 26,5 N/mm² und liegt damit um 10 % höher als der charakteristische Wert für GL24. Die in Gleichung (5) angegebene Randspannung von 51,5 N/mm² beträgt das 1,073 fache von 48 N/mm². Dieser Faktor entspricht dem Quotienten aus den Spannungserhöhungsfaktoren für $\beta = 0,667$ und $\beta = 0$ für GL48 nach Bild 4-4. Siehe hierzu auch Gleichung (6).

$$\sigma_{\text{NH},z=2h/6} = \sigma_{\text{BU},z=h/2} \cdot \frac{2h/6 \cdot E_{\text{NH}}}{h/2 \cdot E_{\text{BU}}} = 51,5 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{2h/6}{h/2} \cdot 0,771 = 26,5 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

$$\frac{\eta_{\beta=0,667} = 1,046}{\eta_{\beta=0} = 0,975} = 1,073 \quad \sigma_{\text{BU},z=h/2} = 1,073 \cdot 48 \text{ N/mm}^2 = 51,5 \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

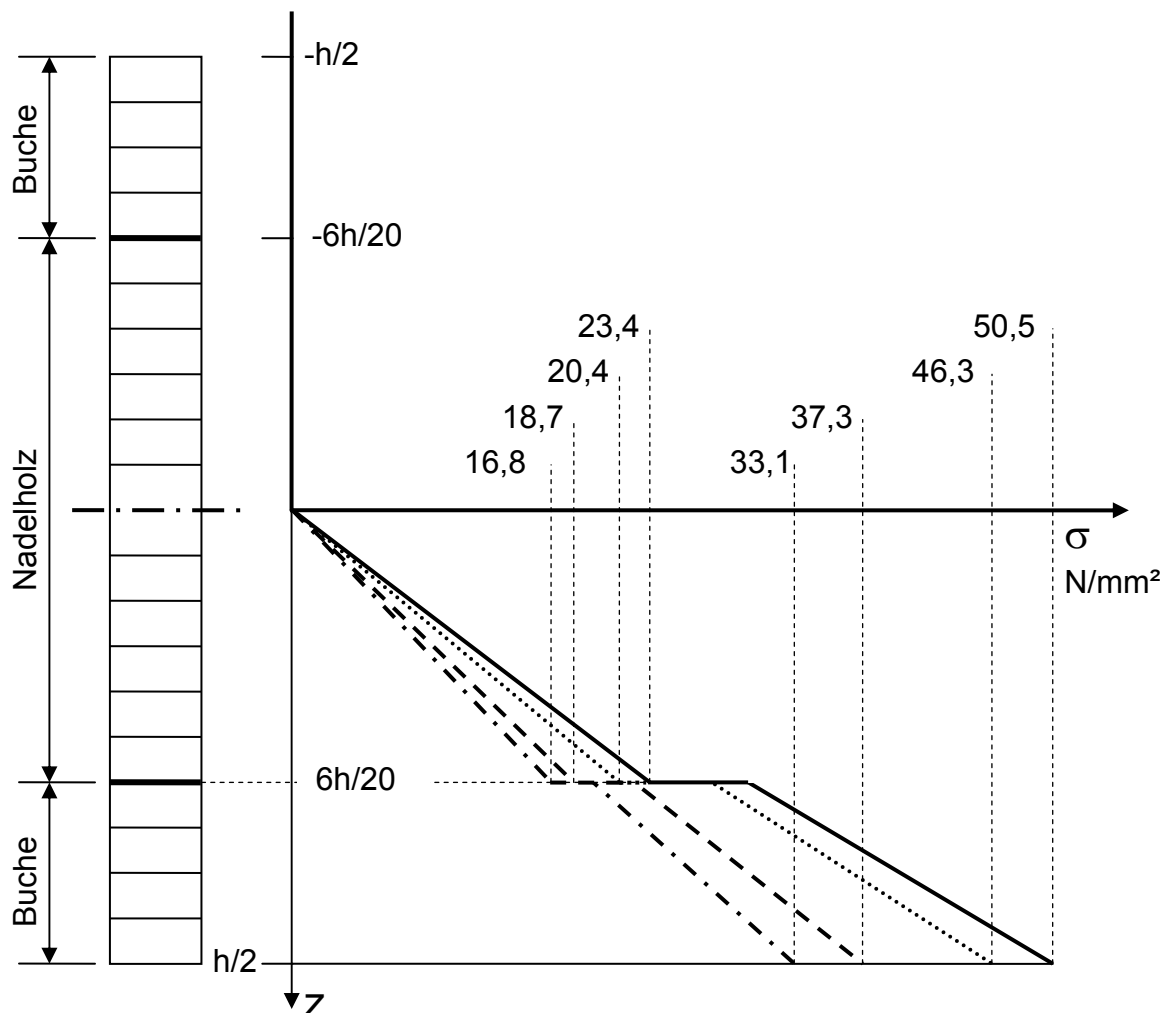


Bild 4-5 Spannungsverteilung im Hybridquerschnitt für die untersuchten Festigkeitsklassen GL32, GL36, GL44 und GL48

Tabelle 4-5 Verhältnisse der mittleren dynamischen Elastizitätsmoduln in N/mm² in den Verbundquerschnitten

	Festigkeitsklasse			
	GL32	GL36	GL44	GL48
Nadelholz	12640	12640	12640	12640
Buchenholz	14900	15100	16400	16400
Verhältnis	0,848	0,837	0,771	0,771

4.2.4 Vorschläge

In den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 wurde anhand von zwei voneinander unabhängigen Methoden – Simulationsrechnungen und Verbundtheorie - gezeigt, dass in den vier Festigkeitsklassen GL32, GL36, GL44 und GL48 aufgrund der Spannungserhöhung in den Buchen-Randlamellen die Anforderungen an die charakteristische Biegefestigkeit um etwa 3% verfehlt werden, wenn in einem Kernbereich von 60% der Höhe Nadelholz der Sortierklasse S10 statt Buche verwendet wird. Wird der Kernbereich auf 66% erweitert, damit für die Randlamellen aus Buche 16,7% der Trägerhöhe verbleiben, werden vor allem bei den hohen Festigkeitsklassen die Anforderungen an die charakteristische Biegefestigkeit um bis zu 5% verfehlt und es ist mit einer zu hohen Biegebeanspruchung des Nadelholzes zu rechnen.

Zum Ausgleich der Spannungserhöhung in den Buchen-Randlamellen mit der Folge von geringeren charakteristischen Biegefestigkeiten bei hybriden als bei kombinierten Trägern wird folgende Lösung vorgeschlagen: Es erscheint zunächst angemessen, bei Hybridträgern den Kernbereich auf höchstens 60% der Trägerhöhe auszudehnen. Da dann eine Rückstufung um volle 4 N/mm² in die nächst kleinere Festigkeitsklasse zu konservativ ist, besteht die Möglichkeit die Anforderungen an die charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit der Buchenlamellen und/oder an die charakteristische Zugfestigkeit der Buchenbretter anzuheben. Zumal in dieser Forschungsarbeit gezeigt wird, dass unter gegebenen Produktionsbedingungen die geforderten charakteristischen Festigkeitswerte für Keilzinkenverbindungen zuverlässig eingehalten werden. Höhere Anforderungen an die charakteristische Zugfestigkeit der Buchenbretter würden neue Sortiermodelle erfordern. Solche Überlegungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht angestellt, können aber prinzipiell umgesetzt werden.

In Tabelle 4-6 sind entsprechende Vorschläge für Festigkeitsklassen für hybride Brettschichtholzträger aus Buche und Nadelholz aufgeführt, für welche die Anforderungen an die charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit angepasst wurden. Mit

diesen Werten und der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter ergeben sich dann mit Gleichung (2) etwa 3% höhere charakteristische Biegefestigkeiten als es der Zahlenwert der Festigkeitsklasse erfordern würde. Diese sind in der letzten Zeile der Tabelle 4-6 aufgeführt. Damit wäre dann die Spannungserhöhung in den Randlamellen, bedingt durch die Verbundwirkung beim Hybridquerschnitt, ausgeglichen.

Tabelle 4-6 Festigkeitsklassen für Hybridträger: Rechenwerte für charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte; Anforderungen an die Lamellen und Keilzinkenverbindungen

	GL28hyb	GL32hyb	GL36hyb	GL40hyb	GL44hyb	GL48hyb
Festigkeitskennwerte in N/mm ²						
$f_{m,g,k}$	28	32	36	40	44	48
Steifigkeitskennwerte in N/mm ²						
$E_{0,mean}$	13200	13200	13200	14000 ¹	14700	14700
$E_{0,05}$	12400	12400	12400	13300 ¹	14200	14200
Anforderungen an die Randlamellen aus Buche ($\geq h/5$)						
DEB	$\leq 0,33$	$\leq 0,20$	$\leq 0,042$	- ²	$\leq 0,20$	$\leq 0,042$
E_{dyn}	-	-	-	- ²	>15000	>15000
$f_{t,\ell,k}$	22	27	32	36 ¹	40	48
$f_{m,j,k}$	≥ 48	≥ 54	≥ 59	≥ 65 ¹	≥ 71	≥ 72
Anforderungen an die Kernlamellen aus Nadelholz ($\leq 3h/5$)						
Sortierung nach DIN 4074-1	S10	S10	S10	S10	S10	S10
erhöhte charakteristische Biegefestigkeit in N/mm ² nach Gleichung (2)						
$f_{m,g,k}$	28,9	33,3	37,4	41,5	45,6	49,7
¹ Werte interpoliert; ² Grenzwerte für den DEB-Wert und den dynamischen Elastizitätsmodul werden hier nicht angegeben, weil die Anforderungen an die charakteristische Festigkeit der Bretter und Keilzinkenverbindungen nur durch Interpolation festgelegt wurden.						

5 Zusammenfassung

Es wurden 12 Biegeversuche nach EN 408 an Hybridträgern aus Buchen- und Nadelholz durchgeführt. Die Biegefestigkeiten betragen über 47 N/mm². Die 300 mm hohen Träger mit einer Stützweite von 5400 mm waren in der Druck- und Zugzone aus jeweils zwei maschinell nach dem dynamischen Elastizitätsmodul sortierten Buchen-Randlamellen und sechs Kernlamellen aus Nadelholz der Sortierklasse S10 aufgebaut. Sowohl die Buchen- als auch Nadelholzlamellen besaßen Keilzinkenverbindungen. Die Werte der Biegefestigkeit der Hybridträger unterscheiden sich aus experimenteller Sicht nicht signifikant von den Festigkeitswerten vergleichbarer kombinierter Versuchsträger, die in einem vorangegangenen Forschungsvorhaben zur Biegefestigkeit von kombiniertem Brettschichtholz aus Buche geprüft wurden.

Für Simulationsrechnungen von Hybridträgern wurde das bislang für kombinierte Träger ausgelegte Rechenmodell angepasst. Anhand von Simulationsergebnissen und mithilfe der Verbundtheorie wurde gezeigt, dass die Verwendung von Nadelholzlamellen der Sortierklasse S10 im Kern von Hybridträgern im Vergleich mit kombinierten Trägern zu einer Spannungserhöhung in den Buchen-Randlamellen von etwa 3% führt, wenn der Kernbereich aus Nadelholzlamellen maximal 60 % der Höhe beträgt. Damit geht eine Abnahme der charakteristischen Biegefestigkeit von etwa 3% einher. Diese Abnahme kann ausgeglichen werden, wenn die Anforderungen an die charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit der Randlamellen aus Buche geringfügig angehoben werden. Insofern lassen sich hybride Träger in die gleichen Festigkeitsklassen einstufen wie kombinierte. Dementsprechend sind die Klassen GL28 bis GL48 auch für Hybridträger erreichbar. Entsprechende Vorschläge für Festigkeitsklassen von Hybridträgern und Anforderungen an die Lamellen und Keilzinkenverbindungen werden in dieser Forschungsarbeit gegeben.

6 Literatur

Blaß HJ, Denzler JK, Frese M, Glos P, Linsenmann P (2005). Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Band 1. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Universitätsverlag Karlsruhe 2005

Blaß HJ, Frese M (2002). Entwicklung eines Sortierverfahrens für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau. Karlsruhe, Universität (TH)

Blaß HJ, Frese M (2006/2007). Die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Buche (*fagus silvatica L.*). Manuskript zur Veröffentlichung bei Holz als Roh- und Werkstoff eingereicht.

Frese M (2006). Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt. Karlsruhe, Universität (TH). Dissertation

Frese M, Blaß HJ (2005). Beech Glulam Strength Classes. CIB-W18/38-6-2. Karlsruhe, Germany

Görlacher R (1984). Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 42:219-222

7 Zitierte Normen

EN 408, Ausgabe April 1996. Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

DIN 1052, Ausgabe August 2004. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau

EN 1194, Ausgabe Mai 1999. Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte

DIN 4074-1, Ausgabe Juni 2003. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Teil 1: Nadelschnittholz

DIN 4074-5, Ausgabe Juni 2003. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Teil 5: Laubschnittholz

8 Bezeichnungen

Angaben in Klammern beziehen sich auf Histogramme und Quantile-Quantile-Plots.

a	Abstand zwischen den Lasteinleitungsstellen beim Biegeversuch
b	Breite
d	Dicke
f	Gesamtdurchbiegung
$f_{m,g,k}$	charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholz
$f_{m,j,k}$	charakteristische Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen
$f_{t,\ell,k}$	charakteristische Zugfestigkeit von Brettern
h	Höhe
k_h	Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit
ℓ	Stützweite; Prüflänge
ℓ_1	Messlänge im Biegeversuch
max	größter Wert (Maximum)
min	kleinster Wert (Minimum)
n	Anzahl der Versuchswerte (N)
s	Standardabweichung (Std Deviation)
w	Relativedurchbiegung
\bar{x}	arithmetisches Mittel (Mean)
\tilde{x}_α	empirisches α -Quantil
	($\tilde{x}_{0,05} \hat{=} 5\text{th Percentile}$, $\tilde{x}_{0,5} \hat{=} \text{Median}$, $\tilde{x}_{0,95} \hat{=} 95\text{th Percentile}$)
z	Achse in Richtung der Querschnittshöhe
DAB	Ästigkeit A für die Astansammlung nach DIN 4074-5
DEB	Ästigkeit A für den Einzelast nach DIN 4074-5
E	Elastizitätsmodul
$E_{0,05}$	Charakteristischer Wert des Elastizitätsmoduls
$E_{0,\text{mean}}$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls
E_{dyn}	Elastizitätsmodul eines Brettes bei dynamischer Beanspruchung in Längsrichtung
$(EI)_{\text{ef}}$	effektive Biegesteifigkeit
F	Kraft
I	Flächenmoment 2. Grades
M	Biegemoment
α	Hilfsgröße; Formparameter (alpha) der Betaverteilung
β	Hilfsgröße; Formparameter (beta) der Betaverteilung
η	Spannungserhöhungsfaktor
θ	untere Schranke (theta) für die Lognormal- und Betaverteilung
μ	Formparameter (my) der Lognormalverteilung
ρ_k	charakteristische Rohdichte
σ	Spannung; Spannweite (sigma) der Betaverteilung; Formparameter (sigma) der Lognormalverteilung

Anlagen

Tabelle A-1 Allgemeine Angaben zu den Buchenbrettern

Wuchsgebiet	Ostwestfalen, Nordhessen
Einschlag	Januar 2001
Güteklassen gemäß Verordnung über gesetzliche Handelsklassen für Rohholz	Vorwiegend C und geringer Anteil an B
Kriterien	Äste
Einschnitt	April 2001 bis Mai 2001
Stammteile	Vorwiegend Mittelstämme und geringer Anteil an Erdstämmen und Zopfstücken
Durchmesser	Keine Angabe
Einschnittart	Scharfschnitt unbesäumt
Freilufttrocknung	Ca. 2,5 Jahre
Technische Trocknung	Ca. 14 Tage
verwendete Bretter	Herz-, Mittel- und Seitenbretter
Weitere mögliche Verwendung	Keilgezinkte Leimholzplatten

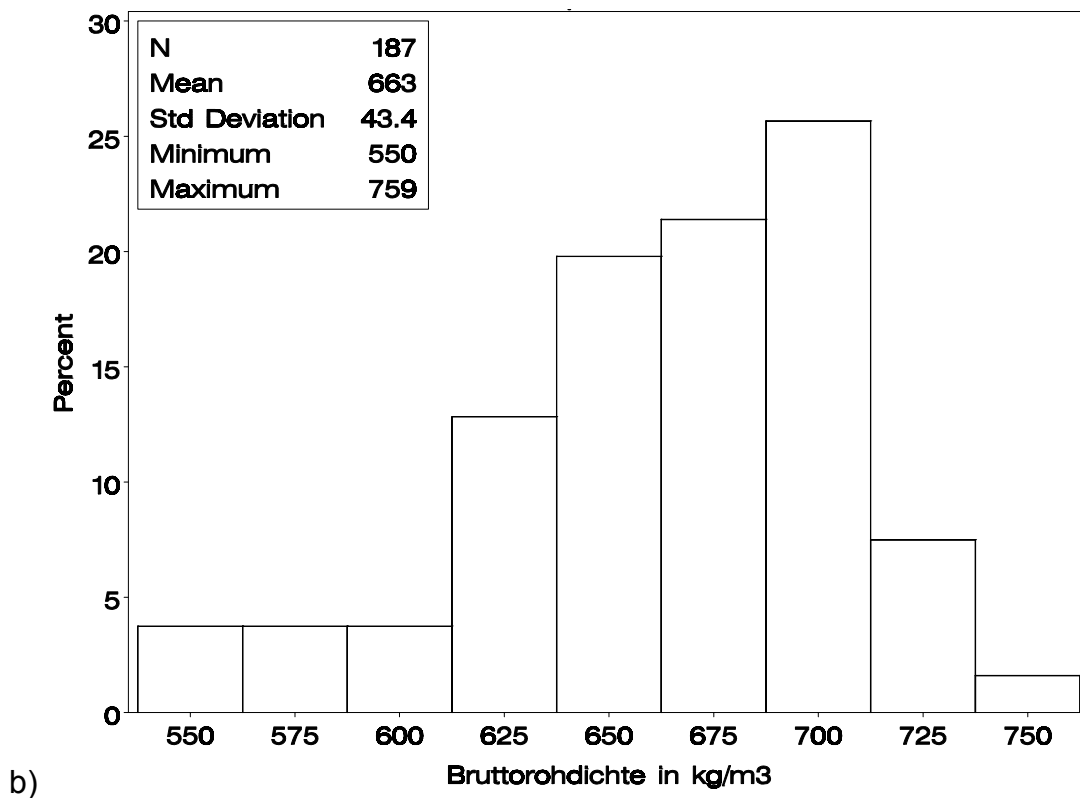
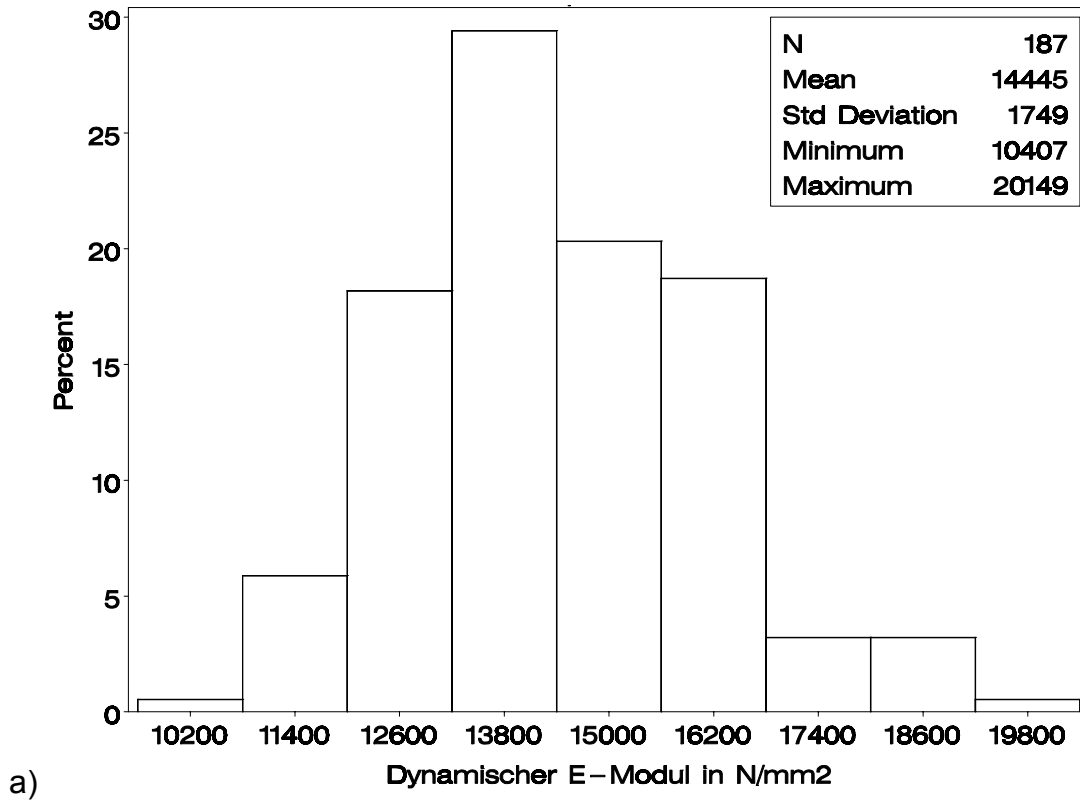


Bild A-1 Häufigkeitsverteilung des dynamischen Elastizitätsmoduls (a) und der Bruttorohdichte (b) der Buchenbretter

Tabelle A-2 Ausbeute in den 5 Klassen

Klasse	Anzahl Stk.	Brettlänge m	Brettlänge %
1	41	91,6	21,4
2	41	95,3	22,2
3	45	102	23,8
4	25	59,7	13,9
5	35	79,9	18,6
1 bis 5	187	428,5	100

Tabelle A-3 Ästigkeit der Buchenbretter

Klasse	mit Ästen Stk.	ohne Äste Stk.	mit Ästen %	ohne Äste %	max DEB ¹ \bar{x}	max DEB ¹ s
1	- ²	- ²	- ²	- ²	- ²	- ²
2	36	5	88	12	0,296	0,185
3	41	4	91	9	0,227	0,173
4	20	5	80	20	0,193	0,117
5	29	6	83	17	0,163	0,0881
2-5	126	20	-	-	-	-

¹ nur astbehaftete Bretter berücksichtigt

² Ästigkeit von Brettern der Klasse 1 nicht ermittelt

Tabelle A-4 Abmessungen der Buchenbretter

	b mm	d mm	L mm
\bar{x}	116	39,4	2290
s	0,366	1,09	458
min	115	36,3	1260
max	117	42	2970

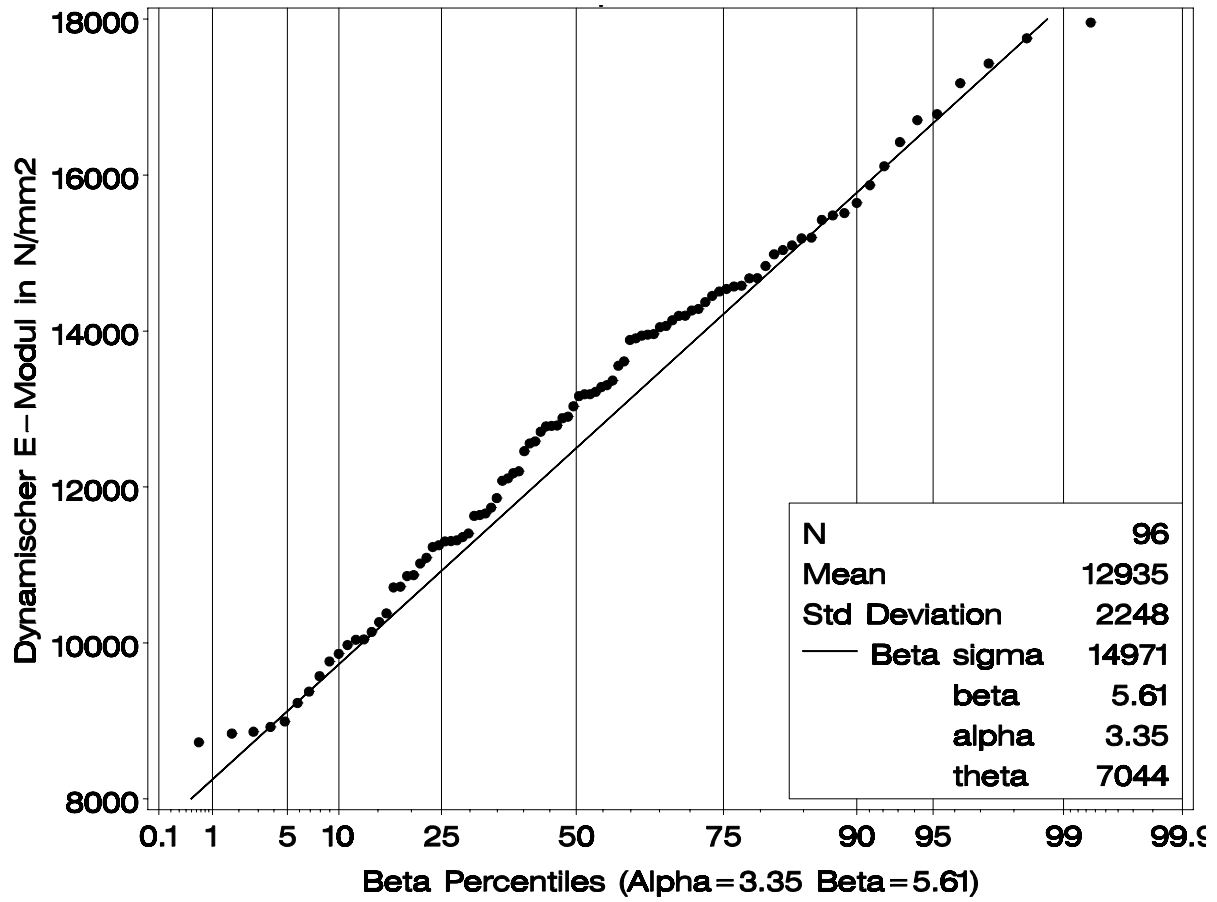


Bild A-2 Empirische Verteilung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Nadelholz Brettern der Sortierklasse S10 (Versuchsmaterial) und gewählte Beta-Verteilung (aus Anpassung an Vergleichsmaterial in Bild 2-5)

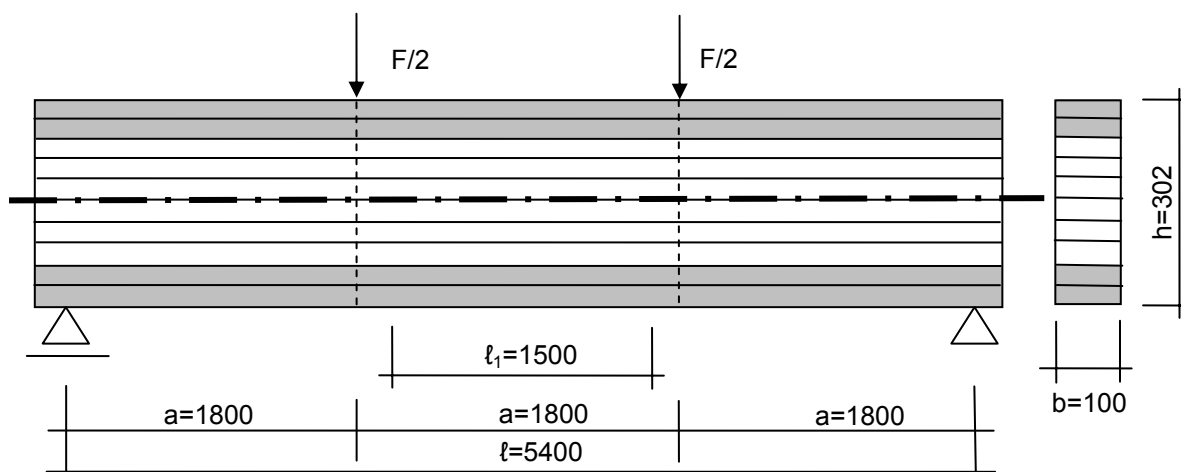


Bild A-3 Versuchsaufbau mit Durchbiegungsmessung nach EN 408; Maße in mm; grau=Buche, weiß=Nadelholz



Bild A-4 Träger Nr. 7 während des Biegeversuchs nach EN 408 mit Kippaussteifung

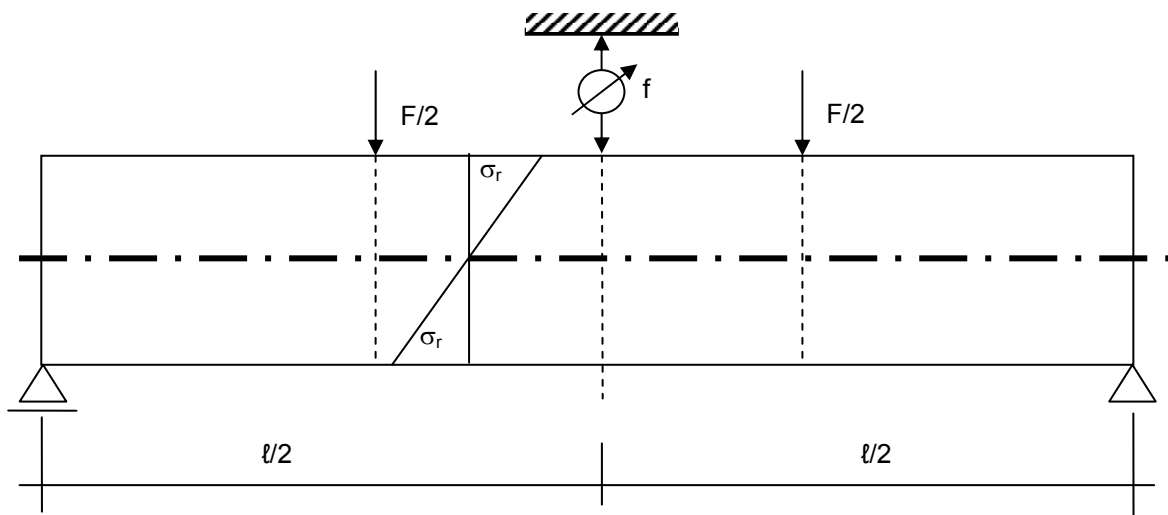


Bild A-5 Darstellung der rechnerischen Randspannung σ_r und Durchbiegungsmessung f in der Mitte der Trägeroberkante

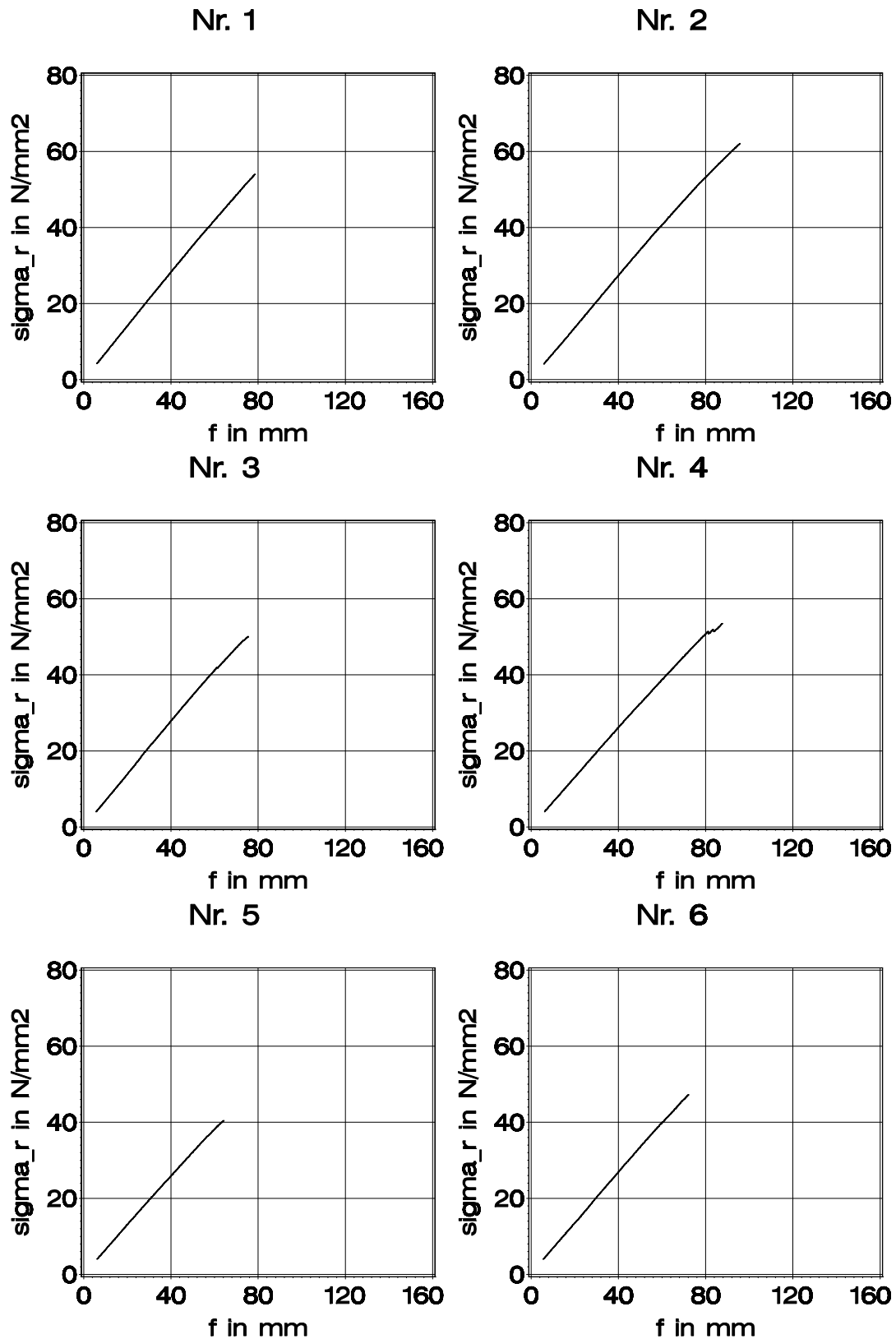


Bild A-6 Rechnerische Randspannung σ_r in Abhängigkeit von der Durchbiegung f in der Mitte der Trägeroberkante, vgl. Bild A-5

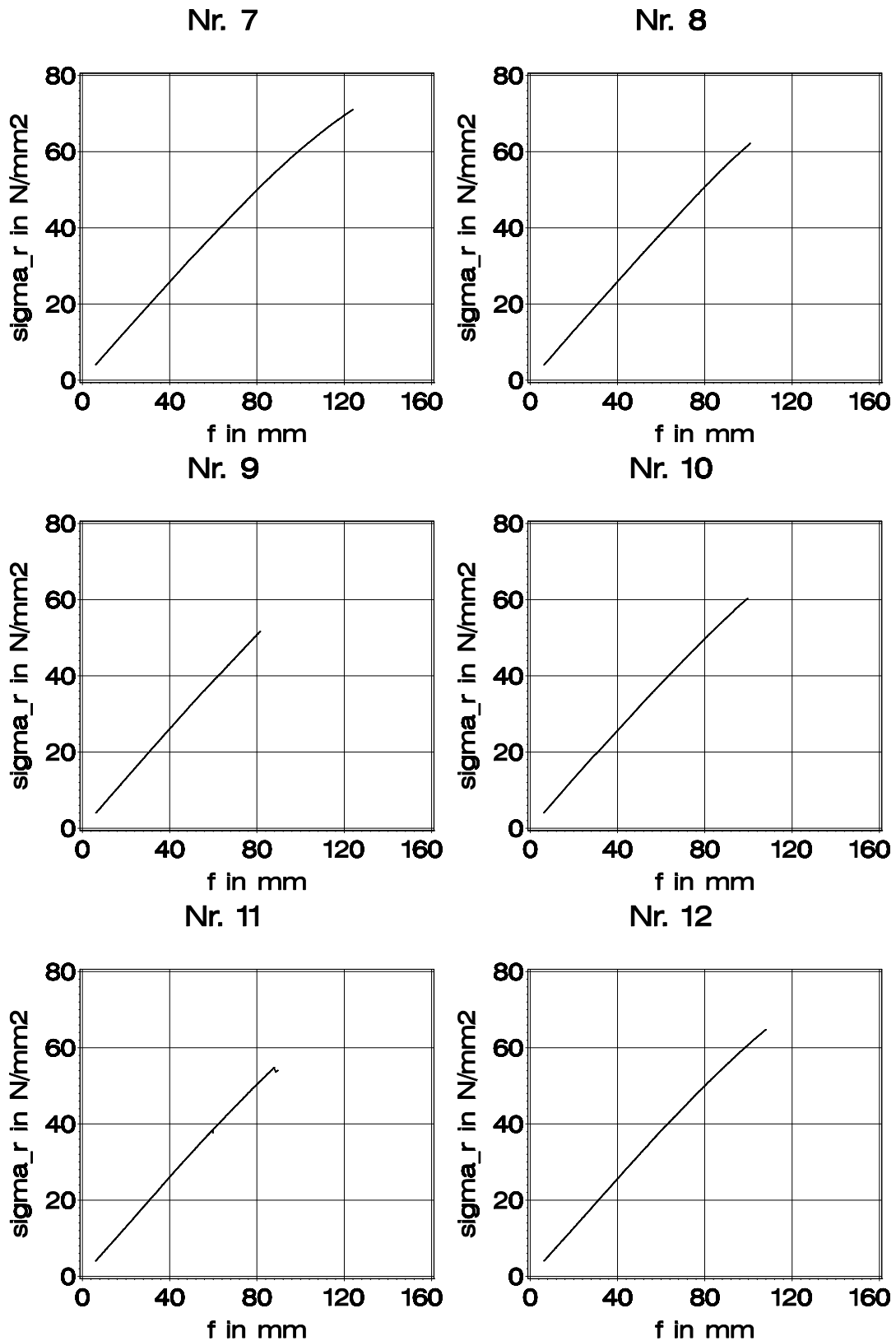


Bild A-6 (Forts.) Rechnerische Randspannung σ_r in Abhängigkeit von der Durchbiegung f in der Mitte der Trägeroberkante, vgl. Bild A-5

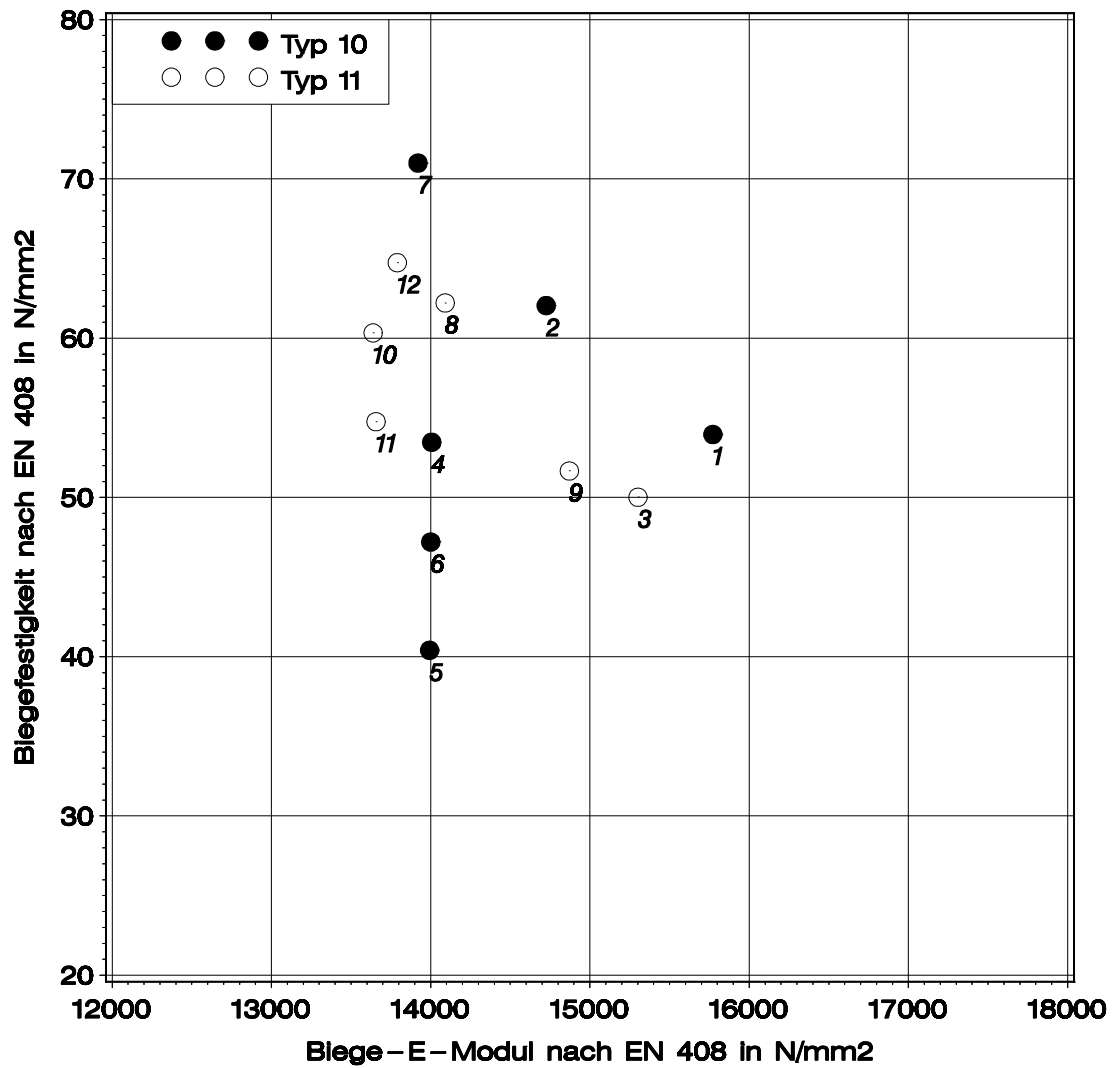


Bild A-7 Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul;
Die Trägernummern stehen rechts unten am Symbol.

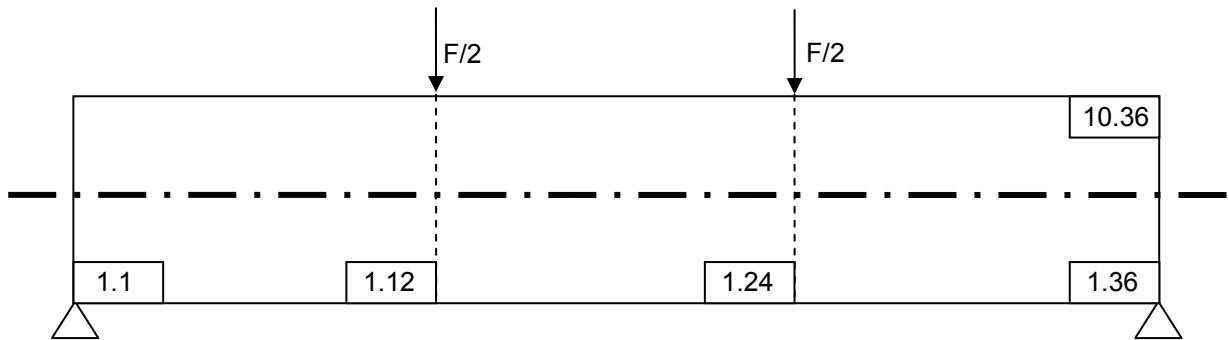


Bild A-8 Rasterung der Versuchsträger und ausgewählte Elemente für die Zuordnung der Beobachtungen aus Tabelle A-5; Elementlänge 150 mm

Tabelle A-5 Rechnerische Bruchspannung und Beobachtungen an der Bruchstelle unter Angabe der Elementnummer

Träger-Nr.	rechnerische Bruchspannung N/mm ²	Beobachtungen
1	54,0	Ast-Versagen in 1.19 und Querriss bis 1.22
2	62,0	Schubversagen in Klebefuge zwischen Buchen- und Nadelholzlamellen
3	50,0	eindeutiges Ast-Versagen in 1.19
4	53,5	Querriss von 1.24 bis 1.27
5	40,4	KZV-Versagen in 1.30; vgl. Bild A-9
6	47,2	Ast-Anriss in 1.26 und Querriss bis 1.18
7	71,0	KZV-Anrisse in 1.18 und 1.5; evtl. auch Schubversagen im Nadelholzholz
8	62,2	Querriss von KZV in 1.18 bis 1.21
9	51,7	KZV-Anrisse in 1.26 und 2.24 sowie Holz-Versagen in 1.17 und 1.18
10	60,3	Ast-Versagen in 2.14 und Holz-Versagen in 1.12
11	54,8	Querriss von 1.16 bis 1.23
12	64,7	Astanriss in 1.11 und KZV-Versagen in 1.13

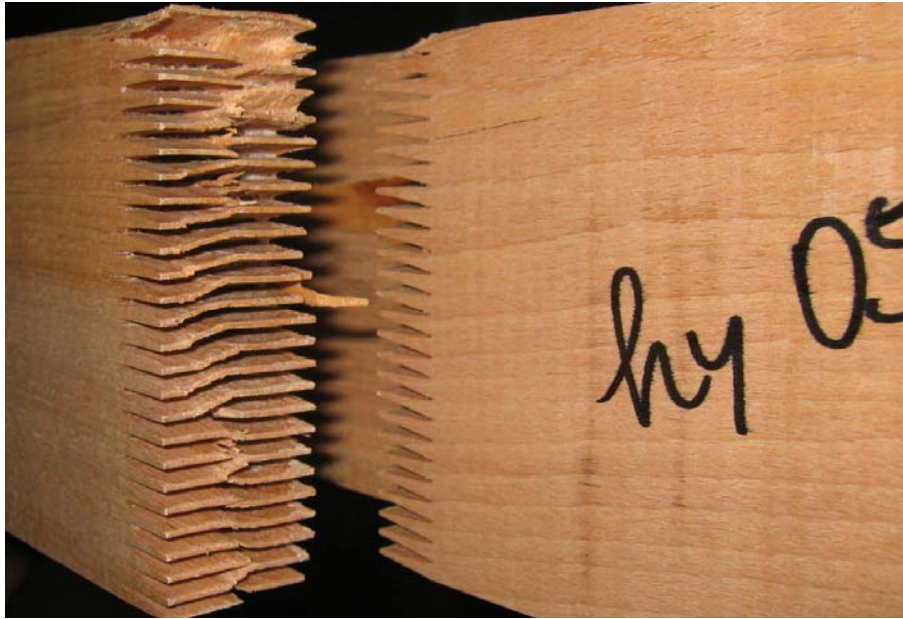


Bild A-9 Offensichtlich schlecht verklebte Keilzinkenverbindung im Element 1.30 der Randlamelle; Die effektive Biegrandspannung in dieser Keilzinkenverbindung betrug aufgrund der Lage zwischen Lasteinleitung und Auflager nur etwa $0,5 \cdot 40,4 \text{ N/mm}^2 = 20 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle A-6 Statistik der Holzfeuchte und Rohdichte nach EN 408 ermittelt an den Brett-Enden von Keilzinkenverbindungen aus den hybriden und kombinierten Trägern

		Holzfeuchte %	Rohdichte kg/m^3
Proben aus Hybridträgern	n	120 ¹	120 ¹
	\bar{x}	8,24	672
	s	0,228	38,9
	min	7,69	588
	max	8,85	786
Proben aus kombinierten Trägern	n	518 ²	518 ²
	\bar{x}	9,47	678
	s	0,707	35,3
	min	7,98	583
	max	12,1	817

¹ 120 Brett-Enden von 60 Prüfkörpern
² 518 Brett-Enden von 259 Prüfkörpern

Tabelle A-7 Statistik der Biegefestigkeit in N/mm² der Keilzinkenprüfkörper

		Klasse				
		2	3	4	5	4+5
Proben aus Hybridträgern	n	12	22	12	14	26
	\bar{x}	87,3	90,8	92,9	97,3	95,3
	s	12,5	10,6	10,2	9,47	9,87
	$\tilde{x}_{0,05}$	-	70,4 ¹	-	-	76,6 ²
	min	71,6	70,2	77,0	76,4	76,4
	max	113	113	110	112	112
Proben aus kombinierten Trägern	n	63	69	62	65	127
	\bar{x}	75,8	80,2	87,1	86,6	86,8
	s	12,9	12,5	10,2	10,8	10,5
	$\tilde{x}_{0,05}$	48,2 ³	53,8 ⁴	69,1 ⁵	68,1 ⁶	68,8 ⁷
	min	42	49,5	60,8	59,6	59,6
	max	94	101	106	106	106
Alle Proben	n	75	91	74	79	153
	\bar{x}	77,6	82,8	88,1	88,5	88,3
	s	13,4	12,9	10,4	11,3	10,8
	$\tilde{x}_{0,05}$	50,8 ⁸	58,3 ⁹	69,7 ¹⁰	68,7 ¹¹	69,3 ¹²
	min	42	49,5	60,8	59,6	59,6
	max	113	113	110	112	112

95% Vertrauensgrenzen für das 5%-Quantil unter der Annahme normalverteilter Daten:

¹ [64,3-79,0] ² [71,3-83,9]

³ [48,9-58,9] ⁴ [54,4-63,6] ⁵ [65,7-73,7] ⁶ [64,2-72,4] ⁷ [66,5-72,2]

⁸ [50,2-59,7] ⁹ [57,0-65,3] ¹⁰ [66,8-74,2] ¹¹ [65,6-73,4] ¹² [67,6-72,9]

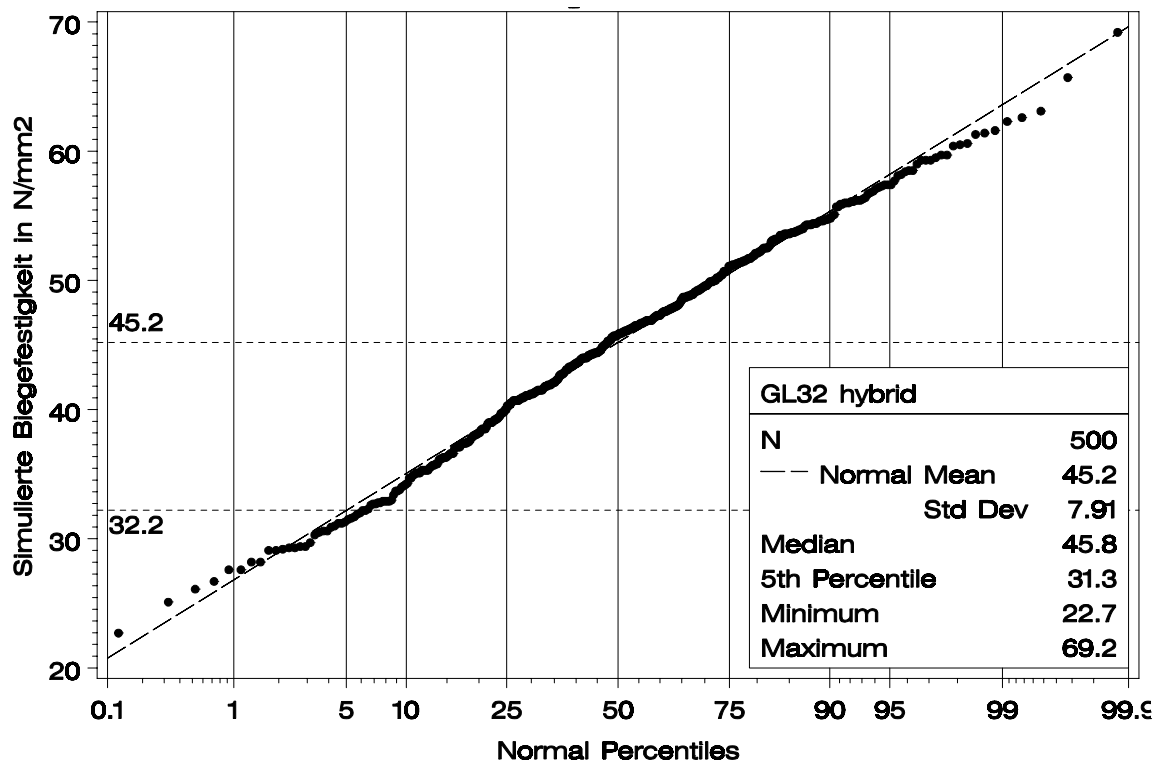
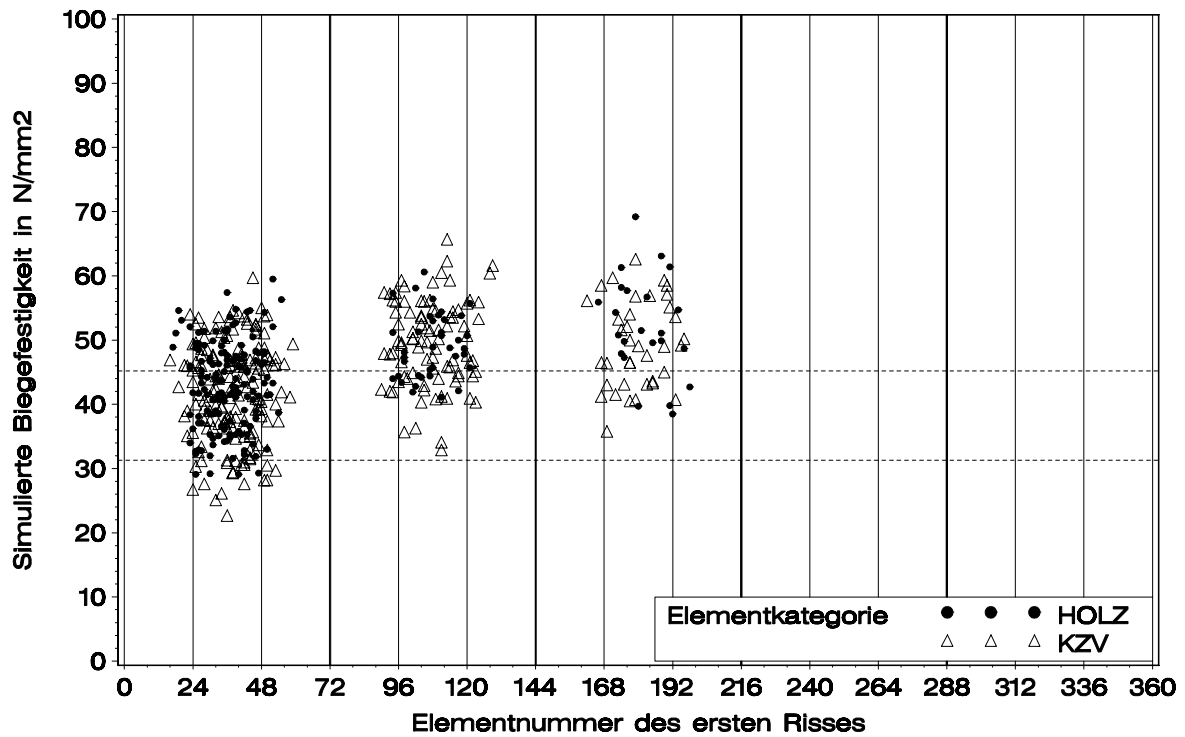


Bild A-10 a Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL32 hybrid mit jeweils drei Randlamellen aus Buche; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

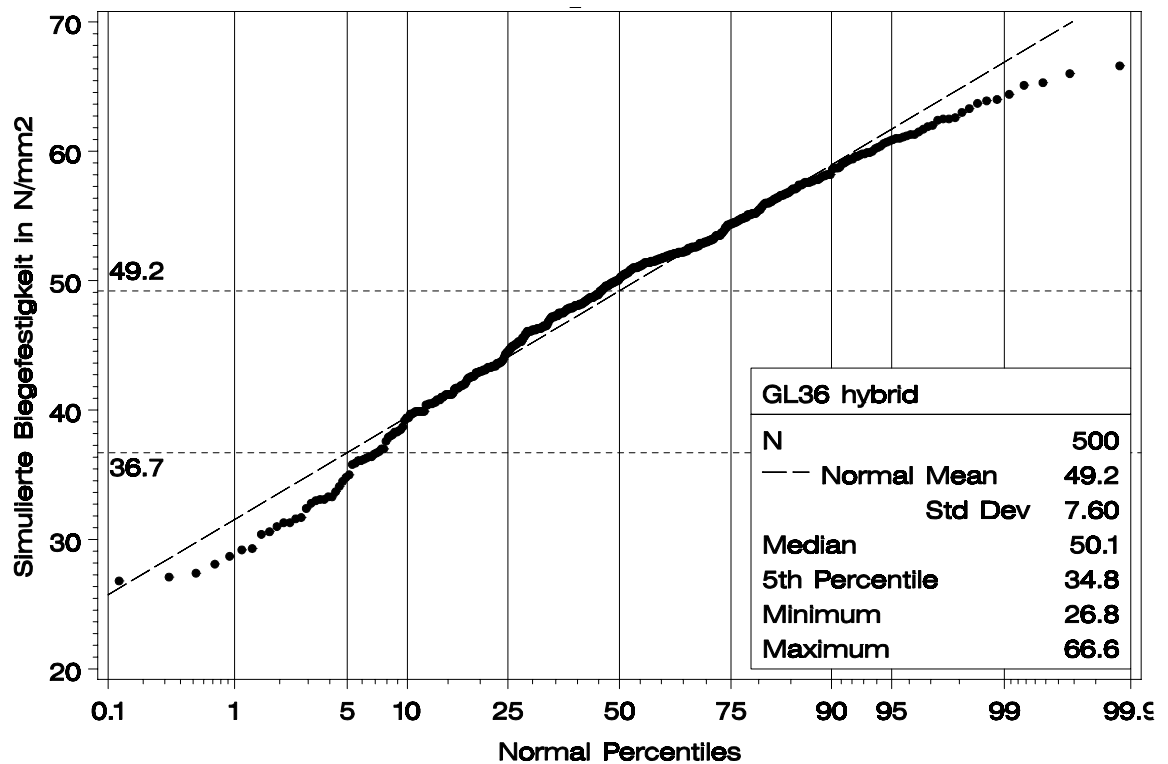
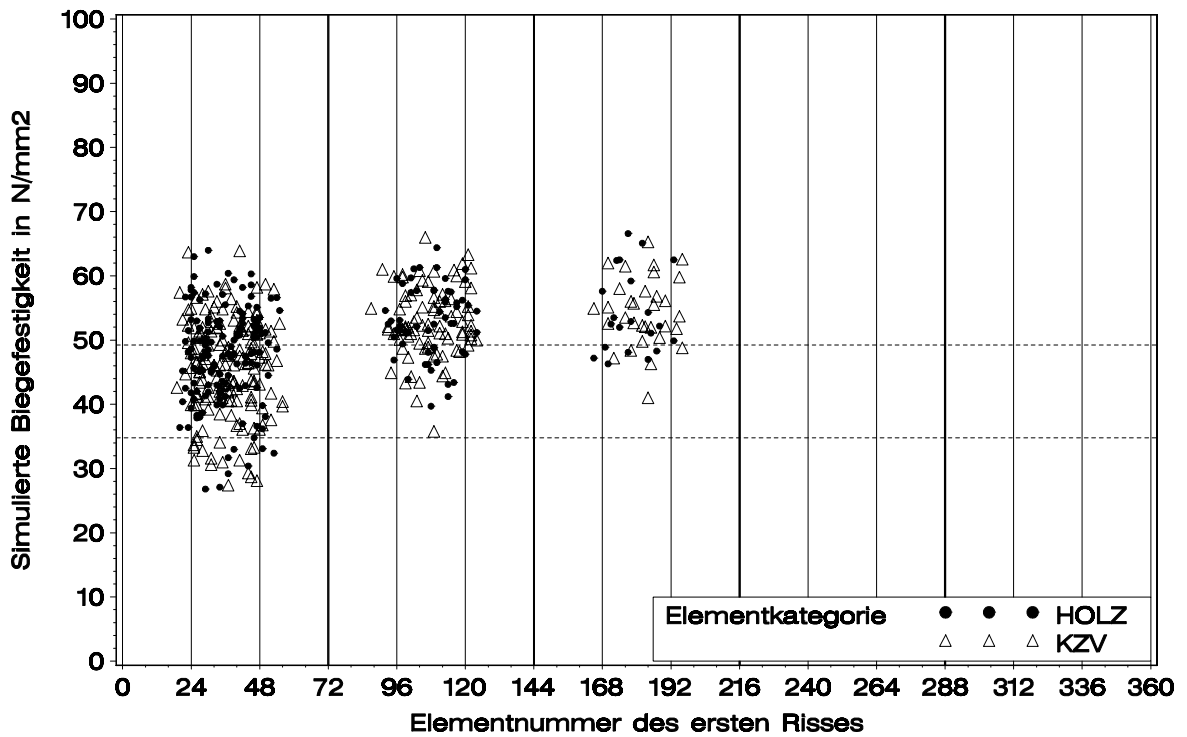


Bild A-10 b (Forts.) Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL36 hybrid mit jeweils drei Randlamellen aus Buche; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

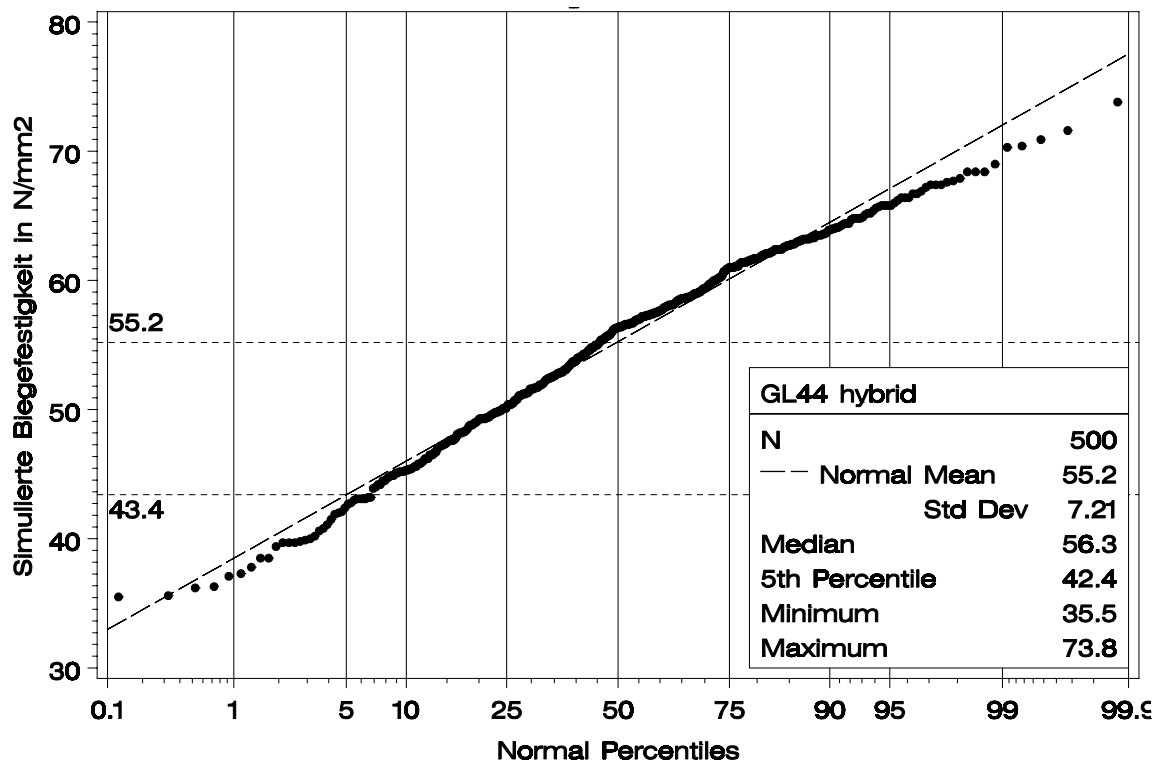
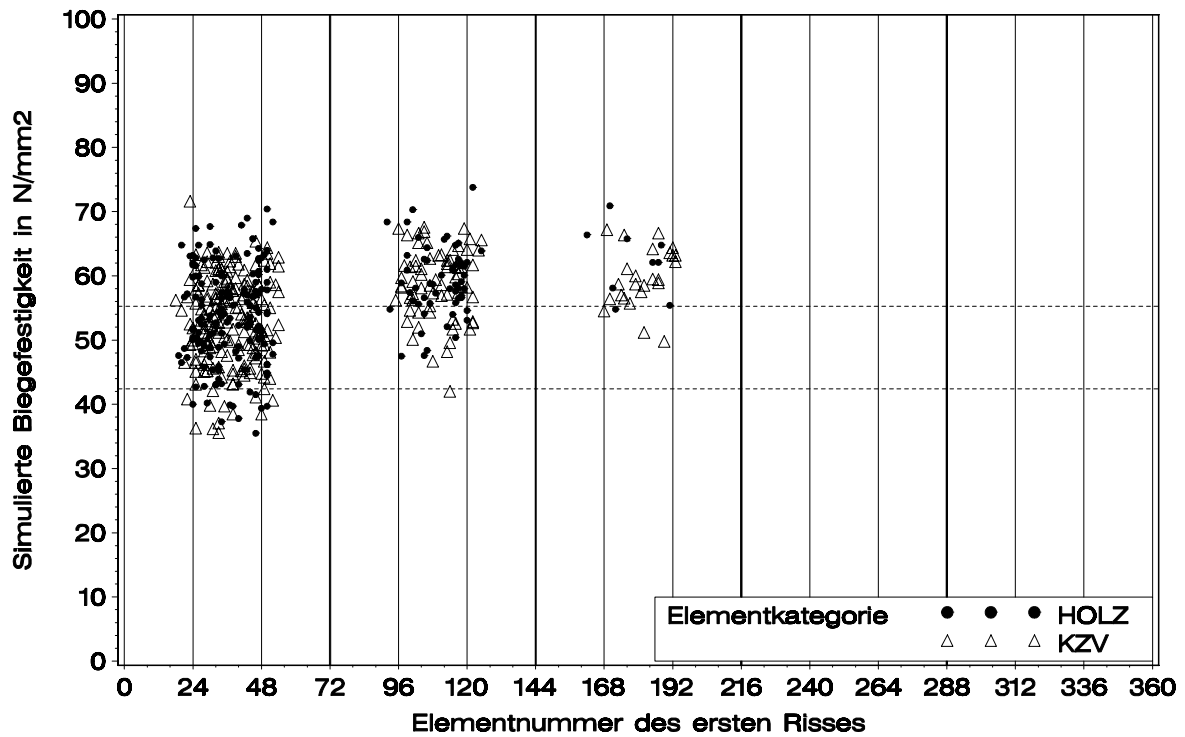


Bild A-10 c (Forts.) Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL44 hybrid mit jeweils drei Randlamellen aus Buche; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

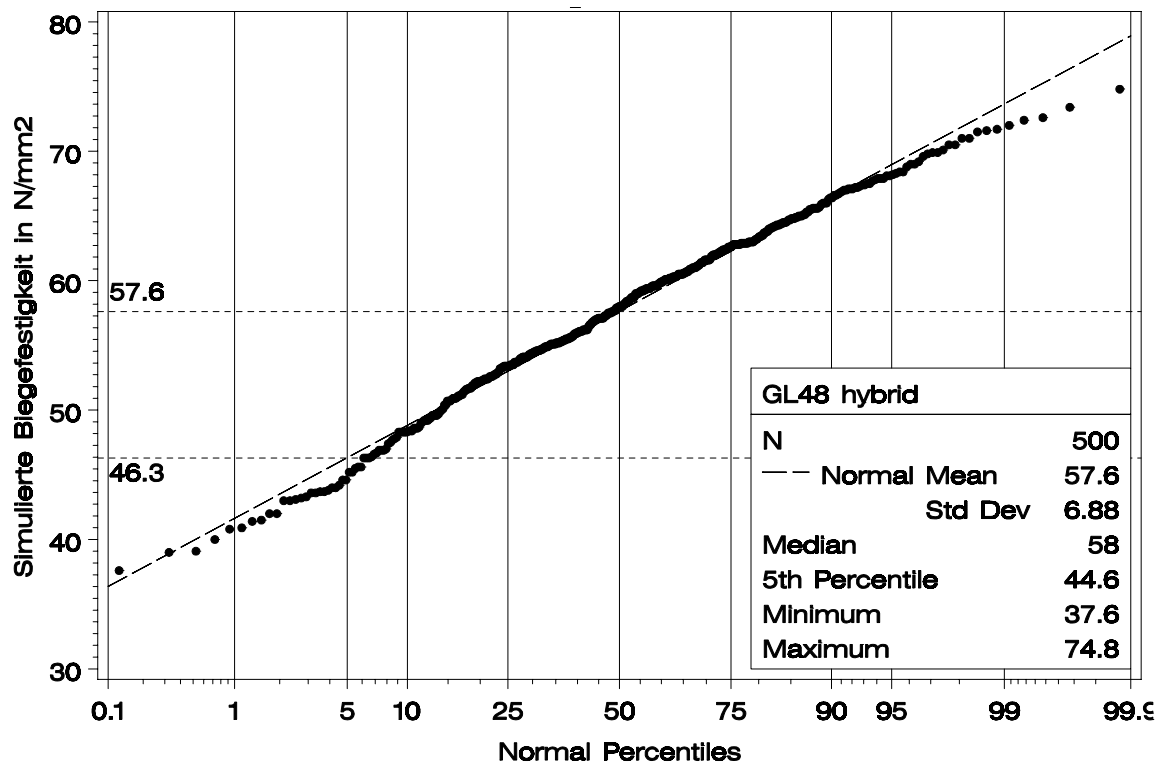
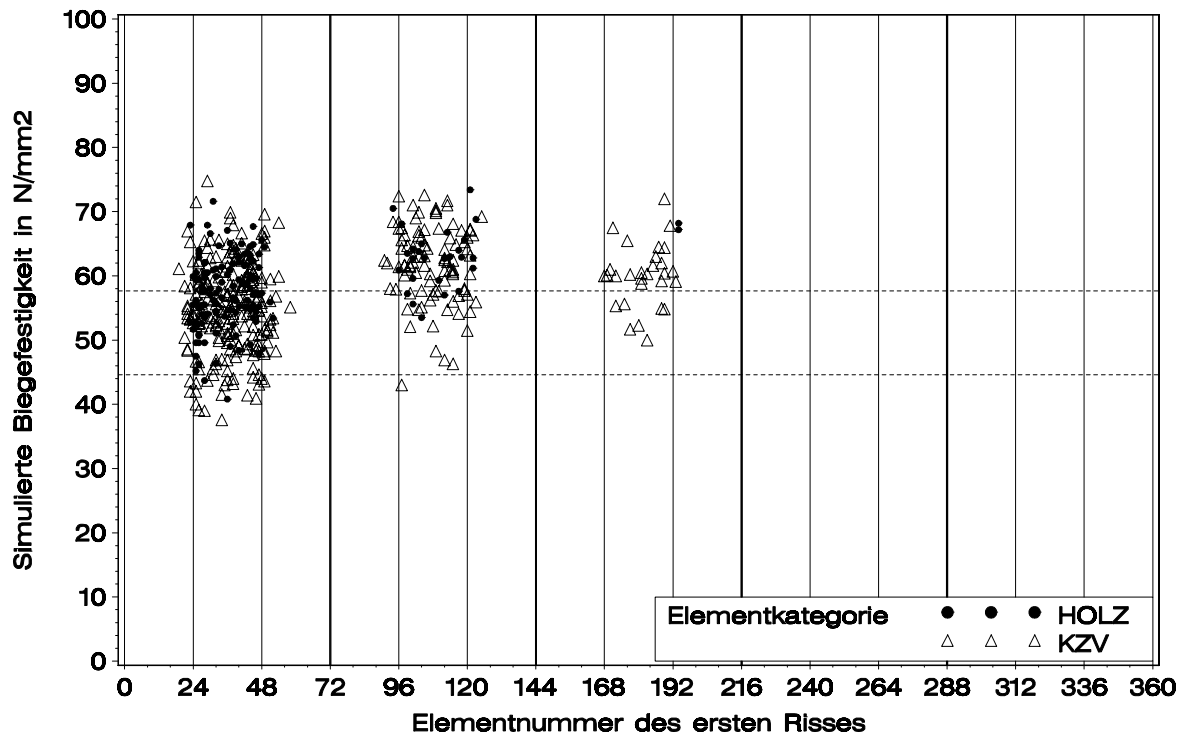


Bild A-10 d (Forts.) Simulierte Träger der Festigkeitsklasse GL48 hybrid jeweils drei Randlamellen aus Buche; Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses (oben) und Verteilung der Biegefestigkeit sowie angepasste Normalverteilung (unten)

Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche ist deutlich höher als diejenige von Brettschichtholz aus Nadelhölzern wie z.B. Fichte oder Tanne. Dieser Vorteil wird gegenwärtig durch den wesentlich höheren Preis von Buchenholz nicht ausreichend genutzt. Einen Kompromiss stellen so genannte Hybridträger dar, bei denen in den hoch beanspruchten Randbereichen Buchenholz- und im weniger beanspruchten Kernbereich Nadelholzlamellen angeordnet werden.

Anhand von Versuchen und theoretischen Methoden wird gezeigt, dass sich mit diesen Hybridträgern sowohl hohe Festigkeitswerte als auch geringere Materialkosten als bei reinen Buchenträgern miteinander vereinen lassen. Die Biegefestigkeit von Hybridträgern unterscheidet sich nicht signifikant von der Biegefestigkeit vergleichbarer Brettschichtholzträger, die ausschließlich aus Buche aufgebaut sind.

Ausgehend von bereits erbrachten Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Biegefestigkeit von Buchenbrettschichtholz werden in dieser Arbeit Festigkeitsklassen für Hybridträger und entsprechende Anforderungen an Aufbau, Lamellen und Keilzinkenverbindungen vorgeschlagen. Demnach ist für Hybridträger – so wie bei Brettschichtholz ausschließlich aus Buche – eine charakteristische Biegefestigkeit bis 48 N/mm^2 erreichbar. Dabei müssen nur 40% des Trägers aus Buchenholz aufgebaut sein. Der Rest kann aus preisgünstigerem Nadelholz bestehen.

ISSN: 1860-093X

ISBN-13: 978-3-86644-072-2

ISBN-10: 3-86644-072-3