

Einfluß der Querschnittshöhe auf die
Biegefestigkeit von Fichtenschnittholz
mit kleinen Querschnitten

T 2605

T 2605

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Vergleichende Betrachtungen europäischer Bauprodukten-Normen
mit
nationalen Bestimmungen

Teilprojekt

**Einfluß der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit
von Fichtenschnittholz mit kleinen Querschnitten**

Bericht 91508

Abschlußbericht an das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin
(Projekt - Nr. E - 92/7b)

P. Glos und D. Henrici

München

1993

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung	3
2. Versuchsprogramm	4
3. Materialauswahl und Herstellung der Prüfkörper	5
4. Untersuchungsmethoden	6
4.1 Bestimmung der allgemeinen Holzeigenschaften	6
4.2 Durchführung der Biegeprüfung	6
5. Ergebnisse	7
5.1 Allgemeine Holzeigenschaften	7
5.2 Allgemeine Ergebnisse der Biegeprüfung	7
5.3 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Querschnitts- höhe nach Versuchsergebnissen	8
5.3.1 Multiple Regression für die Biegefestigkeit	9
5.3.2 Ermittlung des Exponenten s des Höhenfaktors	10
5.3.3 Ermittlung der 5%-Fraktile der Biegefestigkeit	11
5.4 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Querschnitts- höhe nach Literatur- und Datenbankwerten	14
5.4.1 Ergebnisse von Graf (1938)	14
5.4.2 Ergebnisse von Egner und Kolb (1962)	15
5.4.3 Ergebnisse aus früheren eigenen Versuchen	16
5.5 Vergleich der Ergebnisse	17
6. Zusammenfassung	18
7. Schrifttum	19
Anlagen:	
Tabelle 1 bis 6 (Anlage 1 bis 5)	21
Bild 1 bis 20 (Anlage 6 bis 25)	26

1. Problemstellung

Im Rahmen der laufenden europäischen Holzbau-Normung wird derzeit der Einfluß der Querschnittsabmessungen auf die Biegefestigkeit von Bauholz diskutiert. Insbesondere wird die Frage, ob dieser Einfluß in den einschlägigen Bemessungsnormen berücksichtigt werden soll, unterschiedlich gewertet.

Während aufgrund angloamerikanischer Untersuchungen beispielsweise ein Abfall der Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe des Holzes angenommen wird ¹, wird ein solcher Einfluß in den deutschen Vorschriften bisher nicht berücksichtigt.

Die unterschiedlichen Auffassungen lassen sich im wesentlichen darauf zurückführen, daß der unstrittig vorhandene und durch die Theorie von Weibull (1939) zumindest für spröde Materialien erklärte Größeneinfluß durch eine Reihe von holzspezifischen Einflüssen in Abhängigkeit von den Sortierungsregeln mehr oder weniger überlagert wird.

So weisen beispielsweise aus sogenanntem Schwachholz eingeschnittene kleinere Holzquerschnitte vielfach geringere Rohdichten und infolgedessen geringere Festigkeitswerte auf als aus herkömmlichem sogenanntem Starkholz eingeschittene Querschnitte.

Daraus kann gefolgert werden, daß Bauholz mit kleinen Abmessungen aus Schwachholzeinschnitt nicht unbedingt höhere Festigkeitswerte aufweisen muß als herkömmlich eingeschnittenes Holz mit großen Abmessungen.

Insofern liegt der im Eurocode 5 (ENV 1995-1-1) unterbreitete aktuelle Vorschlag, die charakteristische Biegefestigkeit (5%-Fraktile) von Bauholz auf eine Höhe von 150 mm zu beziehen und die Festigkeitswerte für kleinere Querschnittshöhen h mit dem Faktor

¹ Vergleiche hierzu die Hinweise bei Freas u. Selbo (1954), Timber Construction Manual (1974) oder Barrett u. Fewell (1990).

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \leq 1,3 \quad (1)$$

zu erhöhen unter Umständen auf der unsicheren Seite. Allgemein wird die Biegefestigkeit eines Prüfkörpers aus Vollholz der Höhe h nach prEN 384 nach der Formel

$$\sigma_{150} = \sigma_h/k_h \quad (2)$$

auf die Biegefestigkeit eines Prüfkörpers der Höhe 150 mm umgerechnet. Bei Brettschichtholz wird dagegen nach prEN 1194 auf eine Höhe von 600 mm bezogen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte daher überprüft werden, inwieweit die Biegefestigkeit von europäischem Schnittholz von der Querschnittshöhe des Holzes abhängt, um gegebenenfalls entsprechende Änderungsvorschläge in die Diskussion einbringen zu können.

2. Versuchsprogramm

Es wurden die Biegefestigkeit und der Biege-E-Modul von Kant-hölzern aus Fichte in Abhängigkeit von der Querschnittshöhe an insgesamt 180 Prüfkörpern bei annähernd konstanter Holzfeuchte ($u \approx 12\%$) experimentell bestimmt. Als Querschnittsgrößen wurden $50/50 \text{ mm}^2$, $50/100 \text{ mm}^2$ und $50/150 \text{ mm}^2$ gewählt, der Stichprobenumfang betrug jeweils 60 Prüfkörper.

Der Einfluß der Holzqualität (Rohdichte, Ästigkeit) wurde systematisch im Rahmen der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse erfaßt. Bereits bei der Holz Auswahl wurden daher Hölzer aus der gesamten Streubreite der Qualitätsmerkmale ausgesucht.

Die Kollektive wurden in entsprechende Teilkollektive, bestehend aus Prüfkörpern der Sortierklassen S7, S10 und S13 (Kantholzsortierung) unterteilt. Prüfkörper mit größerer Ästigkeit als für S7 zulässig wurden nicht berücksichtigt. Das Versuchsprogramm ist in Zusammenstellung 1 wiedergegeben.

Über die experimentelle Prüfung der genannten Querschnitte hinaus wurden sowohl Literaturwerte als auch die in der vor-

handenen Datenbank des Instituts für Holzforschung archivierten Ergebnisse aus früheren Biegeversuchen im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung neu ausgewertet.

	Sortierklasse			Summe
	S7	S10	S13	
niedrige Rohdichte	10	10	10	30
hohe Rohdichte	10	10	10	30
Summe	20	20	20	60

Zusammenstellung 1:

Versuchsprogramm und Anzahl der Prüfkörper je Querschnittshöhe

3. Materialauswahl und Herstellung der Prüfkörper

Das Holz wurde in einem oberbayerischen Sägewerk nach den o.g. Kriterien ausgewählt, technisch auf etwa 12% getrocknet und anschließend im Normalklima (20°C/65% rLf) gelagert.

Die Biegeprüfkörper wurden dann auf die erforderlichen Längen abgelängt (Länge \geq 20·Höhe), abgerichtet und auf die vorgesehenen Querschnittsmaße ausgehobelt und schließlich bis zum Beginn der Prüfung wieder im Normalklima gelagert.

Die Probenkollektive wurden querschnittsweise so zusammengestellt, daß in jedem die Rohdichte und die Ästigkeit der Proben etwa gleich verteilt waren. Auf diese Weise konnten vergleichbare Mittelwerte der Kenngrößen in den einzelnen Querschnittskollektiven erwartet werden. Die tatsächlich erzielten Werte sind in den Tabellen 1 bis 4 (Anlage 1 bis 4) zusammengestellt.

4. Untersuchungsmethoden

4.1 Bestimmung der allgemeinen Holzeigenschaften

Die **Rohdichte** (ρ_0, ρ_{12}) der Prüfkörper wurde nach DIN 52 182 sowohl als Darr-Rohdichte an einer astfreien, den ganzen Querschnitt umfassenden Probenscheibe aus der Umgebung der Bruchstelle als auch an dem im Normalklima ($u \approx 12\%$) klimatisierten Prüfkörper aus dessen Gesamtgewicht und Gesamtabmessungen bestimmt.

Die **Ästigkeit** (a_{DEK}) wurde nach DIN 4074 (1989) nach dem Kriterium "Einzelast in Kanthölzern" ermittelt, wobei für die drei Sortierklassen nach DIN 4074 folgende Abgrenzungen gelten:

$$S13: \quad 0 \leq a_{DEK} \leq 0,20 \quad (3)$$

$$S10: \quad 0,20 < a_{DEK} \leq 0,40 \quad (4)$$

$$S7 : \quad 0,40 < a_{DEK} \leq 0,60 \quad (5)$$

Die **Holzfeuchte** (u) der Prüfkörper wurde gravimetrisch nach DIN 52 183 im Darrversuch an derselben Querschnittsscheibe wie die Darrdichte ρ_0 bestimmt.

Die **Jahrringbreite** (JB) wurde nach DIN 52 181 ermittelt, der **Druckholzanteil** (DH) an der Rohdichte-Probenscheibe als Flächenanteil der druckholzhaltigen Jahrringe an der Querschnittsfläche geschätzt.

4.2 Durchführung der Biegeprüfung

Die Biegeprüfung erfolgte in Anlehnung an DIN 52 186 bzw. EN 408 nach dem Prüfschema von **Bild 1** (Anlage 6) derart, daß die Prüfkörperseite mit der maximalen Ästigkeit in der Zugzone lag. Die Stützweite betrug das 18-fache der Probenhöhe, der Abstand der Kraftangriffspunkte ein Drittel der Stützweite. Die Prüfgeschwindigkeit war so eingestellt, daß der Bruch der Biegeprüfkörper bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit im Mittel nach etwa 110 Sekunden erfolgte.

Zur Bestimmung der Biege-E-Moduli wurde die Durchbiegung der Prüfkörper in Feldmitte mit insgesamt 4 Induktivaufnehmern gemessen. Die Meßbasis zur Bestimmung des DIN-E-Moduls (DIN 52 186) war gleich der Prüfkörperstützweite, die Meßbasis zur Bestimmung des ISO-E-Moduls (ISO 8377 bzw. EN 408) lag im mittleren Drittel der Stützweite und betrug $l_1 = 0,8 \cdot l/3$ (Bild 1, Anlage 6).

5. Ergebnisse

5.1 Allgemeine Holzeigenschaften

Die ermittelten Kenngrößen des Untersuchungsmaterials sind in den **Tabellen 1 bis 4** (Anlagen 1 bis 4) und teilweise in den **Bildern 2 und 3** (Anlagen 7 und 8) dargestellt.

Wie erkennbar, wurde in allen drei Querschnittskollektiven eine weitgehend homogene und vergleichbare Verteilung der die Holzqualität beschreibenden Kenngrößen erreicht.

5.2 Allgemeine Ergebnisse der Biegeprüfung

Die Prüfungsergebnisse sind in den **Tabellen 1 bis 4** (Anlagen 1 bis 4) sowie in den **Bildern 4 bis 10** (Anlagen 9 bis 15) zusammengestellt. Beim Kollektiv mit $h = 100$ mm wurden 2 Prüfkörper wegen zu großer Ästigkeit ausgesondert, so daß nur $n = 58$ Prüfkörper ausgewertet wurden.

Das Gesamtergebnis über alle Querschnittskollektive ergibt sich wie folgt ($n = 178$):

$13,5 \leq \beta_B \leq 87,0;$	$\bar{\beta}_B = 44,9 \text{ N/mm}^2$	$V = 31,6\%$
$4200 \leq E_{B \text{ DIN}} \leq 16230;$	$\bar{E}_{B \text{ DIN}} = 10930 \text{ N/mm}^2;$	$V = 20,3\%$
$3820 \leq E_{B \text{ ISO}} \leq 18760;$	$\bar{E}_{B \text{ ISO}} = 11570 \text{ N/mm}^2;$	$V = 24,1\%$
$0,305 \leq \rho_0 \leq 0,511;$	$\bar{\rho}_0 = 0,413 \text{ g/cm}^3;$	$V = 9,4\%$
$0,06 \leq a_{\text{DEK}} \leq 0,60;$	$\bar{a}_{\text{DEK}} = 0,32;$	$V = 43,0\%$

Die Feuchten der Prüfkörper zum Zeitpunkt des Bruchs lagen im Bereich $10,8\% \leq u \leq 14,1\%$, der Mittelwert betrug $12,5\%$.

In **Tabelle 1** (Anlage 1) sind allgemein jeweils zusammengestellt die Mittelwerte, Variationskoeffizienten und Extremwerte der Biegefestigkeit β_B , des nach DIN bzw. ISO ermittelten Biege-E-Moduls $E_{B\text{ DIN}}$ bzw. $E_{B\text{ ISO}}$, der Rohdichte ρ_0 bzw. ρ_{12} , des Ästigkeitskriteriums a_{DEK} für Kanthölzer nach DIN 4074, des Druckholzanteils DH und schließlich der Jahrringbreite JB .

In den **Tabellen 2 bis 4** (Anlagen 2 bis 4) sind die gleichen Ergebnisse getrennt nach den Sortierklassen S7, S10 und S13 zusammengestellt. Bei der Sortierklasse S13 fällt eine geringere Streuung der Biegefestigkeit auf (Tabelle 4, Anlage 4).

In den **Tabellen 5 und 6** (Anlage 5) werden die 5%- und 10%-Fraktilwerte der Biegefestigkeit für das Gesamtkollektiv und für die nach Sortierklassen differenzierten Teilkollektive verteilungsfrei (Abzählkriterium) ermittelt, wobei für nicht-ganze Prüfkörperzahlen entsprechend interpoliert wurde.

Die **Bilder 4 bis 6** (Anlagen 9 bis 11) zeigen jeweils für die drei Querschnittskollektive ($h = 50, 100, 150$ mm) die Häufigkeitsverteilungen der erhaltenen Biegefestigkeiten und der Biege-E-Moduli.

In den **Bildern 7 bis 10** (Anlage 12 bis 15) sind die Versuchsergebnisse der drei Querschnittskollektive über der Rohdichte bzw. über der Ästigkeit aufgetragen. Es zeigt sich der bekannte Zusammenhang zwischen den elastomechanischen und holzphysikalischen Kenngrößen. In einer ersten überschlägigen Betrachtung beobachtet man auch eine mit wachsender Querschnittshöhe offenbar leicht abnehmende Biegefestigkeit des Holzes. Dieser Zusammenhang wird im weiteren näher untersucht.

5.3 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Querschnittshöhe nach Versuchsergebnissen

In **Bild 11** (Anlage 16) sind die Mittelwerte der Biegefestigkeit für die drei Sortierklassen S7, S10 und S13 über der Querschnittshöhe aufgetragen. Man erkennt, daß - zunächst ohne

Rücksicht auf den Einfluß der Rohdichte - mit sinkender Holzqualität der Höhengeneinfluß i.a. abnimmt.

In **Bild 12** (Anlage 17) sind entsprechend die 5%- und 10%-Fraktile der Biegefestigkeit aufgetragen. Hier ist das Bild uneinheitlicher. Während bei hoher Holzqualität (S13) mit zunehmender Querschnittshöhe eine mehr oder weniger starke Abnahme der Biegefestigkeit in Erscheinung tritt, zeigt sich bei niedriger Holzqualität (S7) mit zunehmender Querschnittshöhe z.T. sogar eine Zunahme der Biegefestigkeit.

5.3.1 Multiple Regression für die Biegefestigkeit

Zur weiteren Untersuchung der Zusammenhänge werden die Einflüsse aus Rohdichte, Ästigkeit und Querschnittshöhe durch eine lineare multiple Regressionsrechnung über die gemessenen Biegefestigkeitswerte mit dem Ansatz

$$\beta_B = f(\rho_0, a_{DEK}, h) \quad (6)$$

erfaßt. Die Rechnung nach der Methode des schrittweisen Vortwärtseinsetzens (Brosius, 1988) ergab eine Funktion der Form

$$\beta_B = 7,9 + 167,6 \cdot \rho_0 - 84 \cdot a_{DEK} - (0,132 - 0,252 \cdot a_{DEK}) \cdot h \quad [N/mm^2] \quad (7)$$

Wie in allen folgenden Beziehungen, ist hier die Rohdichte in $[g/cm^3]$, die Ästigkeit als Dezimalzahl und die Höhe in $[mm]$ einzusetzen. Um den Einfluß der Querschnittshöhe hervorzuheben, wird im folgenden in Anlehnung an Gl. (2) β_B auch als σ_h bezeichnet.

Die Regressionsgleichung enthält nur Parameter bzw. Parameterkombinationen, die auf dem 5%-Niveau statistisch signifikant sind. Der multiple Korrelationskoeffizient der Beziehung (7) beträgt $r = 0,83$.

Rund 69% der Streuung der Biegefestigkeit können damit durch die Rohdichte, die Ästigkeit und die Querschnittshöhe erklärt werden, wobei etwa 5 Einheiten (%) des Erklärungsgrades durch die Querschnittshöhe bedingt ist.

Das bilineare Glied $a_{\text{DEK}} \cdot h$ erhöht die Korrelation zwar nur geringfügig, bewirkt aber bei niedriger Holzqualität die experimentell beobachtete Trendumkehr beim Höheneinfluß, d.h., bei hoher Ästigkeit steigt die Biegefestigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe des Prüfkörpers z.T. wieder an (Bild 12, Anlage 17). Aus Gl.(7) ergibt sich der Grenzwert für diese Umkehr des Trends bei $a_{\text{DEK}} = 0,52$, die sich tendenziell auch aus Bild 13 (Anlage 18) ablesen läßt. Die Auswertung der Gl. (7) ist in den Bildern 13 und 14 dargestellt.

Bild 13 (Anlage 18) zeigt die Auswertung für hohe und niedrige Rohdichte jeweils für die **Mittelwerte** der Ästigkeitsparameter der einzelnen Sortierklassen nach DIN 4074.

Aus der Darstellung geht deutlich hervor, daß der Höheneinfluß mit steigender Ästigkeit abnimmt und für $a_{\text{DEK}} \approx 0,50$ rohddichteunabhängig praktisch verschwindet (vgl. oben).

5.3.2 Ermittlung des Exponenten s des Höhenfaktors

Der Exponent von Gl.(1), im folgenden mit s bezeichnet, wird nach Logarithmieren von Gl.(2) aus der Beziehung

$$s_h = \frac{\ln(\sigma_h/\sigma_{150})}{\ln(150/h)} \quad (8)$$

berechnet. Hierzu werden mit Gl. (7) für alle Querschnittshöhen und für ausgewählte Holzparameter die entsprechenden Spannungswerte ermittelt und der Exponent s_h nach Gl. (8) berechnet². Dabei zeigt sich eine gewisse Höhenabhängigkeit des Exponenten. Der endgültige s -Wert wird als Mittelwert über alle s_h -Werte bestimmt. Die Ergebnisse der Rechnung sind in Bild 13 (Anlage 18) an den entsprechenden Linienzügen angeschrieben. Wie erkennbar, werden für niedrige Holzqualität (hohe Ästigkeit) vergleichsweise niedrige s -Werte erhalten.

² Für $h = 150$ mm ergibt sich aus Gl. (8) ein unbestimmter Ausdruck. Der l'Hospitalsche Satz liefert hier die Beziehung $s_{150} = -150 \cdot (\partial \sigma_h / \partial h) / \sigma_{150}$. Bei den 5%-Fraktilwerten wird der Differentialausdruck an der Stelle $h = 150$ mm durch den entsprechenden (rückwärtigen) Differenzenquotienten ersetzt.

Insgesamt ergibt sich für die Klassenmittelwerte der Ästigkeitsparameter nach DIN 4074 aus Bild 13 (Anlage 18) für Kantholzquerschnitte mit hoher Rohdichte ($\rho_0 = 0,55 \text{ g/cm}^3$) ein Bereich für den Exponenten s von

$$0,01 \leq s \leq 0,17 \quad (9)$$

bei solchen mit niedriger Rohdichte ($\rho_0 = 0,35 \text{ g/cm}^3$) von

$$0,03 \leq s \leq 0,29 \quad (10)$$

Bild 13 zeigt, daß ein Höheneinfluß bei Kantholzbiegung, der durch den Exponenten s des Höhenfaktors k_h zum Ausdruck kommt, nennenswert nur bei hoher Holzqualität (niedrige Ästigkeit) in Erscheinung tritt.

Bei niedriger Holzqualität (hohe Ästigkeit) ist dagegen nahezu unabhängig von der Rohdichte ein Einfluß der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit nicht mehr zu erkennen.

Als wesentliches Ergebnis der durchgeführten Versuche ist daher festzuhalten, daß der Höheneinfluß in erster Linie durch die Ästigkeit und erst in zweiter Linie durch die Rohdichte des verwendeten Holzes bestimmt wird.

Mit den s -Werten von Bild 13 (Anlage 18) wurden die Spannungen nach der Formel

$$\sigma_h = \sigma_{150} \cdot \left(\frac{150}{h} \right)^s \quad (11)$$

berechnet und ebenfalls in das Bild eingetragen (strichliert). Wie zu erkennen, sind die Abweichungen von den mit der Regressionsgleichung (7) berechneten Werten nur bei geringen Ästigkeiten nennenswert.

5.3.3 Ermittlung der 5%-Fraktile der Biegefestigkeit

Grundlage für die Einstufung von Bauholz in unterschiedliche Festigkeitsklassen ist der 5%-Fraktilwert (Charakteristische Festigkeit) des jeweils experimentell geprüften Probenkollekt-

tivs. Entsprechend der Aufgabenstellung wird im folgenden die 5%-Fraktile der Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Querschnittshöhe dargestellt.

Da die für die einzelnen Querschnittskollektive ermittelten Festigkeiten trotz sorgfältiger Zusammenstellung der Probenkollektive noch in gewissen Grenzen von der Rohdichte und der Ästigkeit abhängen (Tabelle 1, Anlage 1), werden die Versuchsdaten zur Herstellung exakter Vergleichbarkeit mit Hilfe einer querschnittsweise durchgeführten multiplen Regressionsrechnung über Rohdichte und Ästigkeit auf eine einheitliche Holzqualität bezogen (normiert). Für jedes Querschnittskollektiv wird eine Regressionsgleichung der Form

$$\beta_B = f(\rho_0, a_{DEK}) = c_0 + c_1 \cdot \rho_0 + c_2 \cdot a_{DEK} \quad (12)$$

bestimmt. Die Normierung der Biegefestigkeit erfolgt dann für die mittlere Holzqualität $\rho_0 = 0,40 \text{ g/cm}^3$ und $a_{DEK} = 0,40$ (Grenzwert für S 10 nach DIN 4074) gemäß der Beziehung

$$\beta_{B \text{ normiert}} = \beta_{B \text{ gemessen}} \cdot \frac{f(0,40; 0,40)}{f(\rho_0, a_{DEK})} \quad (13)$$

Aus dem normierten Datenfeld wird dann für jedes Querschnittskollektiv die 5%-Fraktile ($\beta_{B \text{ 5\%norm}}$) wie in Abschnitt 5.2 angegeben ermittelt. Die Ergebnisse sind zusammen mit den normierten Mittelwerten der Biegefestigkeit in der folgenden **Zusammenstellung 2** wiedergegeben.

Wie zu erkennen ist, schwanken die multiplen Korrelationskoeffizienten (Zweifachkorrelation) für die Regressionsbeziehung (12) zwischen 0,85, 0,79 und 0,82 in relativ engen Grenzen. Die Hinzunahme der Holzparameter Jahrringbreite und Druckholzanteil verbessert die Korrelationen nur unwesentlich auf 0,86, 0,80 und 0,83, so daß diese Parameter bei der weiteren Untersuchung vernachlässigt werden.

Die Streuung der normierten Versuchsdaten ist naturgemäß jetzt beträchtlich reduziert, wie die Variationskoeffizienten (V) der Zusammenstellung 2 im Vergleich mit den Versuchsergebnissen der Tabelle 1 (Anlage 1) zeigen.

Höhe mm	Konstante der Gl.(12)			r	normierte Biegefestigkeit		
	c_0	c_1	c_2		$\bar{\beta}_B$ norm	$V(\%)$	β_B 5%norm
50	6,86	152,36	- 69,76	0,85	39,9	18,1	26,8
100	-3,27	168,56	- 64,93	0,79	38,2	19,4	24,3
150	-33,94	217,49	-103,42 ¹⁾	0,82	36,5	18,0	25,2

¹⁾ Hier ist in Gl.(12) statt a_{DEK} das bilineare Glied $q_0 \cdot a_{DEK}$ einzusetzen

Zusammenstellung 2:

Mittelwerte und 5%-Fraktilwerte der normierten Biegefestigkeiten für mittlere Holzparameter ($Q_0 = 0,40$; $a_{DEK} = 0,40$)

Die Ergebnisse der Auswertung sind in **Bild 14** (Anlage 19) aufgetragen. Bei der 5%-Fraktile ist im Bereich $h \geq 100$ mm ein leicht unterschiedlicher Verlauf zu erkennen, je nach Methode der Fraktilenbestimmung: Die verteilungsfrei bestimmte 5%-Fraktile (Zusammenstellung 2) zeigt hier mit $s \approx -0,05$ einen leicht ansteigenden Verlauf, womit der für niedrige Holzqualität und zunehmender Querschnittshöhe beobachtete Anstieg der Biegefestigkeit in Erscheinung tritt.

Die unter der Annahme einer Normalverteilung der normierten Grundgesamtheit bestimmten 5%-Fraktilwerte zeigen dagegen mit $s \approx 0,04$ einen insgesamt leicht abfallenden Verlauf und entsprechen damit in etwa dem Verlauf der Mittelwerte.

Insgesamt zeigt auch die exaktere Auswertung, daß bei geringerer Holzqualität, wie sie in der 5%-Fraktile zum Ausdruck kommt, der Einfluß der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit des hier untersuchten Kantholzkollektivs vernachlässigt werden kann.

5.4 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Querschnittshöhe nach Literatur- und Datenbankwerten

Im folgenden werden Versuchsergebnisse von Graf (1938) und Egner u. Kolb (1962) sowie eigene Versuchsergebnisse aus den Jahren 1987 bis 1990 im Hinblick auf den Einfluß der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit von Bauholz untersucht.

5.4.1 Ergebnisse von Graf (1938)

Die Versuche von Graf (1938) wurden in Anlehnung an das Prüf-schema von Bild 1 (Anlage 6) unter 2-Punktbelastung durchgeführt. Aus dieser Veröffentlichung kamen die Ergebnisse von 44 Biegeversuchen an Kanthölzern aus Fichte bzw. Tanne der Güteklasse I, II und III mit einer mittleren Holzfeuchte von etwa 14% in Frage ³.

Die untersuchten Querschnittshöhen lagen im Bereich von $54 \text{ mm} \leq h \leq 179 \text{ mm}$; die entsprechenden Versuchsergebnisse waren ($n = 44$):

$$\begin{array}{llll} 25,0 & \leq & \beta_B & \leq & 78,3; & \bar{\beta}_B & = & 43,6 \text{ N/mm}^2; & V & = & 26,8\% \\ 0,40 & \leq & \rho_{14} & \leq & 0,57; & \bar{\rho}_{14} & = & 0,43 \text{ g/cm}^3; & V & = & 7,5\% \\ 0 & \leq & a_{\text{DEK}} & \leq & 0,56; & \bar{a}_{\text{DEK}} & = & 0,24; & V & = & 56,2\% \end{array}$$

Die Ästigkeit war als Größtwert (Einzelast) im mittleren Drittel des Zugbereichs des Biegeprüfkörpers gemessen worden.

Die Versuchsergebnisse von Graf sind in **Bild 15** (Anlage 20) dargestellt. Danach ist im unteren Streubereich (geringe Holzqualität) tendenziell ein geringerer Höheneinfluß zu erkennen als im oberen Streubereich der Ergebnisse (hohe Holzqualität).

Eine multiple Regression über die ausgewählten Daten nach dem Ansatz (6) ergab die Beziehung

$$\beta_B = 50,1 + 80,5 \cdot \rho_{14} - 16,9 \cdot a_{\text{DEK}} - (0,286 - 0,663 \cdot a_{\text{DEK}}) \cdot h \quad (14)$$

³ Diese Güteklassen entsprechen heute den Sortierklassen S13, S10 und S7. Zu beachten ist ferner, daß die Klassengrenzen damals etwas anders definiert waren.

mit einem multiplen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,73$, mit dem nur rund 53% der Streuung der Biegefestigkeit durch die Rohdichte, die Ästigkeit und die Querschnittshöhe erklärt werden können. Die bereits erwähnte Trendumkehr, d.h., die Festigkeitszunahme mit zunehmender Querschnittshöhe, ergibt sich aus Gl.(14) bei $a_{\text{DEK}} = 0,43$. Für niedrige Holzqualität (Bereich der unteren Streugrenze) ergeben sich also aus den Daten von Graf (1938) ähnliche Folgerungen wie aus den Versuchsergebnissen von Abschnitt 5.3. Beim Vergleich ist jedoch die geringe Prüfkörperanzahl zu berücksichtigen.

5.4.2 Ergebnisse von Egner und Kolb (1962)

Die Biegeversuche von Egner und Kolb (1962) wurden nach DIN 52 186 an Kanthölzern aus Fichte mit Querschnittshöhen $22 \text{ mm} \leq h \leq 157 \text{ mm}$ und Feuchten zwischen 12% und 16% (Mittelwert etwa 14%) durchgeführt. Die größte Ästigkeit lag beim Versuch in der Zugzone des Prüfkörpers. Die entsprechenden Versuchsergebnisse waren ($n = 117$):

$$\begin{array}{llll} 16,1 \leq \beta_B \leq 92,8; & \bar{\beta}_B = 38,4 \text{ N/mm}^2; & V = 36,7\% \\ 0,37 \leq Q_{14} \leq 0,57; & \bar{Q}_{14} = 0,43 \text{ g/cm}^3; & V = 12,2\% \\ 0 \leq a_{\text{DEK}} \leq 0,60; & \bar{a}_{\text{DEK}} = 0,17; & V = 111\% \end{array}$$

In **Bild 16** (Anlage 21) sind die Biegefestigkeiten von Egner und Kolb über der Querschnittshöhe aufgetragen. Zum Vergleich mit den hier erhaltenen Versuchsergebnissen werden jedoch nur die 38 Prüfkörper herangezogen, für die im Versuchsbericht von Egner und Kolb definierte Werte für die Rohdichte und Ästigkeit vorliegen. Eine multiple Regression ($r = 0,54$) über diese Daten nach dem Ansatz (6) ergab allerdings, daß die Querschnittshöhe nicht als signifikant in den Ansatz (6) aufgenommen wurde und die Biegefestigkeit somit nicht signifikant beeinflußt.

Dieser Befund geht auch aus Bild 16 (Anlage 21) hervor; das Bild zeigt überdies, daß die Versuchswerte überwiegend um die Querschnittshöhen von etwa 40 mm (Flachkantbiegung) bzw. 130 mm (Hochkantbiegung) gruppiert sind, so daß für die Regres-

sionsrechnung im wesentlichen nur zwei Stützstellen vorlagen. Im unteren Streubereich der Versuchsdaten ist aber auch beim Datenmaterial von Egner und Kolb kein Höheneinfluß zu erkennen.

5.4.3 Ergebnisse aus früheren eigenen Versuchen

Aus der vorhandenen Datenbank des Instituts für Holzforschung wurden aus drei in den Jahren 1987 bis 1990 unter anderen Zielsetzungen durchgeführten Forschungsvorhaben im Hinblick auf die hier untersuchte Fragestellung insgesamt 474 Prüfkörper aus vergleichbaren Teilkollektiven ausgewählt ⁴.

Für Querschnittshöhen im Bereich $70 \text{ mm} \leq h \leq 273 \text{ mm}$ (Mittelwert 140 mm) lassen sich die Versuchsergebnisse wie folgt beschreiben ($n = 474$):

$$\begin{array}{llllll} 7,9 & \leq & \beta_B & \leq & 84,4; & \bar{\beta}_B & = & 38,4 & \text{N/mm}^2; & V & = & 33,1\% \\ 0,337 & \leq & \varrho_{12} & \leq & 0,585; & \bar{\varrho}_{12} & = & 0,440 & \text{g/cm}^3; & V & = & 9,7\% \\ 0 & \leq & a_{\text{DEK}} & \leq & 0,60; & \bar{a}_{\text{DEK}} & = & 0,34; & & V & = & 41,3\% \end{array}$$

Die Biegefestigkeiten der Prüfkörper (mittlere Feuchte etwa 12%) sind in **Bild 17** (Anlage 22), differenziert nach den drei Sortierklassen gemäß DIN 4074 in den **Bildern 18 bis 20** (Anlagen 23 bis 25) dargestellt.

Eine multiple Regression über die gegebenen Daten nach dem Ansatz (6) ergab die Beziehung

$$\beta_B = -3,7 + 130,1 \cdot \varrho_{12} - (36,8 + 0,06 \cdot h) \cdot a_{\text{DEK}} \quad (15)$$

Um Vergleichbarkeit mit der Regression (7) herzustellen, muß ϱ_{12} noch in Abhängigkeit von ϱ_0 dargestellt werden. Da ϱ_0 in den genannten Untersuchungen nicht bestimmt wurde, wird eine Regressionsrechnung mit den der Tabelle 1 (Anlage 1) zugrundeliegenden Daten der vorliegenden Untersuchung durchgeführt;

4

Es handelt sich um die Projekte 86507, 87503 und 88501/4

sie liefert die hochkorrelierte Beziehung ($r = 0,95$)⁵

$$Q_{12} = 0,059 + 0,924 \cdot Q_0 \quad (16)$$

Damit geht Gl.(15) über in

$$\beta_B = 4,0 + 120,2 \cdot Q_0 - (36,8 + 0,06 \cdot h) \cdot a_{DEK} \quad (17)$$

Die Regressionsgleichung enthält nur Parameter bzw. Parameterkombinationen, die auf dem 5%-Niveau statistisch signifikant sind. Der multiple Korrelationskoeffizient beträgt $r = 0,69$. Etwa 48% der Streuung lassen sich damit durch die Rohdichte, die Ästigkeit und die Querschnittshöhe erklären. Der Zusammenhang ist jedoch schwächer als bei der Regressionsgleichung (7), der ausgesuchtes Material zugrunde liegt.

Die Querschnittshöhe trägt beim Ansatz (17) nur unwesentlich zur Korrelation bei, da bei Vernachlässigung derselben der Korrelationskoeffizient mit $r = 0,68$ nahezu den gleichen Wert erreicht und der Erklärungsgrad nur um etwa 3 Einheiten (%) auf 45% absinkt.

Ermittelt man die Exponenten s mit Gl. (17) nach dem Verfahren von Abschnitt 5.3.2, so sieht man, daß bei niedriger Rohdichte ($Q_0 = 0,35 \text{ g/cm}^3$) der Wert s zwischen 0,02 ($a_{DEK} = 0,10$) und 0,15 ($a_{DEK} = 0,50$) und bei hoher Rohdichte ($Q_0 = 0,55 \text{ g/cm}^3$) zwischen 0,01 ($a_{DEK} = 0,10$) und 0,07 ($a_{DEK} = 0,50$) schwankt. Der Trend ist also gerade umgekehrt wie aufgrund der durchgeführten Versuche ermittelt und in Bild 13 (Anlage 18) dargestellt wurde.

Zusammengefaßt ergibt die Auswertung der Datenbankwerte also ein eher widersprüchliches Bild. Ein nennenswerter Einfluß der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit von praxisrelevanten Kantholzquerschnitten war aber nicht erkennbar.

5.5 Vergleich der Ergebnisse

Die erhaltenen Versuchsergebnisse an 180 speziell ausgewählten Fichtenkanthölzern mit vergleichsweise kleinen Querschnitten zeigen, daß im unteren Streubereich der für die Ableitung von

⁵ Dem Mittelwert von $Q_{12} = 0,44$ entspricht nach Gl.(16) $Q_0 = 0,412$, womit sich ein Rohdichteverhältnis von $Q_0/Q_{12} = 0,936$ ergibt. Nach DIN 52 182 ergibt sich andererseits in hinreichend genauer Übereinstimmung ein Verhältnis von 0,929, so daß Gl.(16) allgemeinere Gültigkeit beanspruchen kann.

Bemessungswerten maßgebenden Biegefestigkeit ein Einfluß der Querschnittshöhe auf die Festigkeit nicht zu erkennen ist. Die aus Literatur- und Datenbankwerten ausgewählten Fichtenholzquerschnitte, die wegen ihrer rein zufälligen Querschnittszusammenstellung in weit höherem Umfang repräsentativ sind für die Praxis und daher u.a. den nivellierenden Einfluß der Einschnittart und anderer, nicht erfaßter Holzparameter zum Ausdruck bringen, erbrachten im unteren Streubereich der Biegefestigkeit ebenfalls keine eindeutigen Anhaltspunkte für einen Höheneinfluß.

6. Zusammenfassung

Es wurde die Frage untersucht, ob bei der Bemessung biegebeanspruchter Vollholzquerschnitte nach Eurocode 5 ein Einfluß der Querschnittshöhe h in der Form $\sigma_h = k_h \cdot \sigma_{150}$ mit dem Höhenfaktor $k_h = (150/h)^s \leq 1,3$ und $s = 0,2$ berücksichtigt werden muß. Für die Untersuchung wurden insgesamt 180 Fichtenkanthölzer mit den Querschnitten $50/50 \text{ mm}^2$, $50/100 \text{ mm}^2$ und $50/150 \text{ mm}^2$ so ausgesucht, daß die einzelnen Querschnittskollektive vergleichbare Mittelwerte der die Holzqualität beschreibenden Parameter (Rohdichte, Ästigkeit) erwarten ließen. Die Prüfkörper wurden bei einer mittleren Holzfeuchte von 12% im Biegeversuch (hochkant) experimentell geprüft.

Die Versuchsergebnisse zeigten je nach Holzqualität einen abgestuften Einfluß der Querschnittshöhe auf die **mittlere** Biegefestigkeit: Bei hoher Rohdichte ($\rho_0 = 0,55 \text{ g/cm}^3$) schwankte der Exponent s des Höhenfaktors je nach Ästigkeit im Bereich $0,01 \leq s \leq 0,17$, bei niedriger Rohdichte ($\rho_0 = 0,35 \text{ g/cm}^3$) im Bereich von $0,03 \leq s \leq 0,29$. Es zeigte sich, daß der Höheneinfluß in erster Linie durch die Ästigkeit und erst in zweiter Linie durch die Rohdichte des verwendeten Holzes bestimmt wird. Bei hoher Ästigkeit (geringe Holzqualität) konnte nahezu unabhängig von der Rohdichte ein Einfluß der Querschnittshöhe auf die mittlere Biegefestigkeit von Fichtenkantholz nicht nachgewiesen werden.

Auch die für die Festlegung von Bemessungswerten maßgebende 5%-

Fraktile (charakteristische Biegefestigkeit) des Probenmaterials lieferte keinen Anhaltspunkt für einen Einfluß der Querschnittshöhe. Die Exponenten des Höhenfaktors k_h wurden hier je nach Annahme über den Verteilungscharakter der Grundgesamtheit des Probenmaterials mit $s \approx -0,05$ bzw. $s \approx 0,04$ ermittelt.

Die Auswertung von Literatur- und Datenbankwerten, die wegen ihrer rein zufälligen Querschnittszusammenstellung in höherem Umfang repräsentativ sind für die Praxis, zeigte dagegen im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung kein einheitliches Bild. Während sich aus den Versuchen von Graf (1938) ein ähnlicher Höheneinfluß wie bei den hier durchgeführten Versuchen ergab und sich aus den Datenbankwerten früherer eigener Versuche ästigkeitsabhängig nur ein schwacher Höheneinfluß ableiten ließ, konnte anhand der Versuche von Egner und Kolb (1962) ein Einfluß der Querschnittshöhe auf die Biegefestigkeit von Fichtenkantholz-Querschnitten nicht nachgewiesen werden.

Zusammenfassend erbrachten die experimentelle und statistische Untersuchung an 180 Fichtenkanthölzern drei verschiedener Querschnittshöhen sowie die gezielte Auswertung von Literatur- und eigenen Datenbankwerten keine Hinweise dafür, daß bei der Biegebemessung von Vollholzquerschnitten ein Einfluß der Querschnittshöhe anzunehmen ist.

Als Schlußfolgerung aus den durchgeführten Untersuchungen wird daher vorgeschlagen, den im Eurocode 5 bei der Biegebemessung vorgesehenen Höhenfaktor k_h nicht zu anzuwenden.

7. Schrifttum

- Barrett, J.D. und Fewell, A.R. (1990)
Size factors for the bending and tension strength of structural timber.
Proc. 23th meeting CIB-W18A, Lisbon, Portugal, Sept. 1990
- Brosius, G. (1988)
SPSS/PC+ Basics und Graphics, McGraw-Hill Book Company,
Hamburg

- Egner, K. und Kolb, H. (1962)
Festigkeitsuntersuchungen an Brettern und Balken für den
Holznagelbau als Grundlage für Gütevorschriften.
Berichte aus der Bauforschung, Berlin, 1962, S. 7 - 35
- Eurocode 5, ENV 1995-1-1 (1992)
Berechnung und Ausführung von Holzbauwerken. Teil 1-1:
Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau (Nov. 1992)
- Freas, A.D. und Selbo, M.L. (1954)
Fabrication and design of glued laminated wood structural
Members.
Forest Products Laboratory, US Department of Agriculture,
Washington D.C.
- Graf, O. (1938)
Tragfähigkeit der Bauhölzer und Holzverbindungen.
Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein
Deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Berlin,
1938, Heft Nr. 20
- Institut für Holzforschung der Universität München
- Bericht 86507 (1987). Einfluß verschiedener Sortierbedin-
gungen auf die Biegefestigkeit von Bauholz
- Bericht 87503 (1988). Ermittlung von Klassifizierungskrite-
rien für einheimisches Fichtenschnittsholz mit kleinen Quer-
schnitten
- Bericht 88501/4 (1990). Dynamic response techniques-develop-
ment of test methods for predicting the strength and stiff-
ness of wooden poles
- prEN 384 (1991)
Bauholz. Bestimmung charakteristischer Festigkeits-, Stei-
figkeits- und Rohdichtewerte
- prEN 1194 (1993)
Holzbauwerke. Brettschichtholz. Festigkeitsklassen und Be-
stimmung der charakteristischen Werte.
- Timber Construction Manual (1974)
Prepared by the American Institute of Timber Construction,
Englewood, Colorado. John Wiley and Sons, New-York/London/
Sidney, 2nd ed. 1974
- Weibull, W. (1939)
The phenomenon of rupture in solids.
Royal Swed. Inst. for Eng. Res., Bericht Nr. 153, Roy. Tech.
Univ. Stockholm, Schweden, 1939

Anlagen 1 - 25

h	Größe	Dim.	\bar{x}	V(%)	x_{\min}	x_{\max}	
50 mm (n=60)	β_B	N/mm ²	47,5	32,5	16,2	87,0	
	$E_{B \text{ DIN}}$		10 240	22,5	5 420	16 000	
	$E_{B \text{ ISO}}$		10 430	28,6	3 820	18 760	
	ρ_0	g/cm ³	0,417	9,3	0,338	0,504	
	ρ_{12}		0,441	8,7	0,356	0,516	
	a_{DEK}	1	0,33	47,1	0,08	0,60	
	DH	%	3,3	137	0	18,0	
	JB	mm	2,9	36,0	1,1	6,0	
	100 mm (n=58)	β_B	N/mm ²	47,1	30,2	13,7	78,1
		$E_{B \text{ DIN}}$		11 450	16,7	7 930	16 040
$E_{B \text{ ISO}}$		12 270		20,0	6 850	18 020	
ρ_0		g/cm ³	0,415	9,6	0,314	0,511	
ρ_{12}			0,443	8,9	0,339	0,546	
a_{DEK}		1	0,30	41,8	0,06	0,54	
DH		%	4,5	133	0	24,0	
JB		mm	3,0	34,4	1,5	6,3	
150 mm (n=60)		β_B	N/mm ²	40,3	29,2	13,5	62,3
		$E_{B \text{ DIN}}$		11 120	20,6	4 200	16 230
	$E_{B \text{ ISO}}$	12 030		21,8	4 590	18 740	
	ρ_0	g/cm ³	0,407	9,4	0,305	0,498	
	ρ_{12}		0,439	8,5	0,336	0,518	
	a_{DEK}	1	0,34	39,5	0,11	0,60	
	DH	%	6,7	118	0	29,0	
	JB	mm	2,7	31,7	1,2	4,6	

Tabelle 1: Versuchsergebnisse der drei Querschnittskollektive für alle Sortierklassen (S7, S10, S13); 178 Prüfkörper

h	Größe	Dim.	\bar{x}	V(%)	x_{\min}	x_{\max}
50 mm (n=19)	β_B	N/mm ²	34,2	32,3	16,2	55,3
	$E_{B \text{ DIN}}$		8 750	21,8	5 650	11 660
	$E_{B \text{ ISO}}$		8 500	33,6	3 820	13 260
	ρ_0	g/cm ³	0,409	10,2	0,338	0,470
	ρ_{12}		0,440	9,3	0,372	0,516
	a_{DEK}	1	0,51	13,8	0,42	0,60
	DH	%	1,9	167	0	13,0
JB	mm	3,0	42,6	1,4	6,0	
100 mm (n=14)	β_B	N/mm ²	33,1	23,9	13,7	42,0
	$E_{B \text{ DIN}}$		10 310	11,3	8 160	11 860
	$E_{B \text{ ISO}}$		10 820	16,7	7 950	14 160
	ρ_0	g/cm ³	0,412	9,0	0,364	0,483
	ρ_{12}		0,450	8,7	0,402	0,546
	a_{DEK}	1	0,48	7,7	0,41	0,54
	DH	%	4,0	138	0	17,0
JB	mm	3,3	35,6	1,8	6,3	
150 mm (n=17)	β_B	N/mm ²	30,5	25,0	17,5	42,6
	$E_{B \text{ DIN}}$		9 930	20,8	4 530	14 020
	$E_{B \text{ ISO}}$		10 660	22,7	4 590	14 930
	ρ_0	g/cm ³	0,399	8,2	0,355	0,469
	ρ_{12}		0,435	7,9	0,379	0,512
	a_{DEK}	1	0,52	10,0	0,44	0,60
	DH	%	10,4	97	0	29,0
JB	mm	3,2	26,8	1,2	4,6	

Tabelle 2: Versuchsergebnisse der drei Querschnittskollektive für Sortierklasse S7; 50 Prüfkörper

Sortierklasse S10

h	Größe	Dim.	\bar{x}	V(%)	x_{\min}	x_{\max}
50 mm (n=25)	β_B	N/mm ²	48,3	23,0	25,4	71,7
	$E_{B \text{ DIN}}$		10 940	17,6	7 140	15 100
	$E_{B \text{ ISO}}$		10 950	19,3	7 190	15 360
	ρ_0	g/cm ³	0,421	9,4	0,347	0,493
	ρ_{12}		0,444	8,9	0,356	0,514
	a_{DEK}	1	0,30	20,1	0,21	0,40
DH	%	2,9	143	0	14,0	
JB	mm	2,9	37,7	1,1	4,9	
100 mm (n=28)	β_B	N/mm ²	48,9	26,0	25,9	74,9
	$E_{B \text{ DIN}}$		11 800	17,5	7 930	16 040
	$E_{B \text{ ISO}}$		12 600	20,9	6 850	18 020
	ρ_0	g/cm ³	0,413	10,6	0,314	0,511
	ρ_{12}		0,439	9,7	0,339	0,545
	a_{DEK}	1	0,30	18,3	0,21	0,40
DH	%	3,3	143	0	16,0	
JB	mm	2,9	32,7	1,5	5,1	
150 mm (n=31)	β_B	N/mm ²	43,0	25,9	13,5	62,0
	$E_{B \text{ DIN}}$		11 440	19,3	4 200	15 310
	$E_{B \text{ ISO}}$		12 340	19,1	4 780	16 730
	ρ_0	g/cm ³	0,409	10,8	0,305	0,498
	ρ_{12}		0,440	9,7	0,336	0,518
	a_{DEK}	1	0,32	16,8	0,22	0,40
DH	%	5,4	126	0	27,0	
JB	mm	2,6	32,7	1,2	4,0	

Tabelle 3: Versuchsergebnisse der drei Querschnittskollektive für Sortierklasse S10; 84 Prüfkörper

Sortierklasse S13

h	Größe	Dim.	\bar{x}	V(%)	x_{\min}	x_{\max}
50 mm (n=16)	β_B	N/mm ²	62,1	19,1	39,4	87,0
	$E_{B \text{ DIN}}$		10 910	23,4	5 420	16 000
	$E_{B \text{ ISO}}$		11 900	27,2	5 420	18 750
	ρ_o	g/cm ³	0,420	8,2	0,373	0,504
	ρ_{12}		0,439	8,0	0,386	0,515
	a_{DEK}	1	0,15	25,7	0,08	0,20
DH	%	5,6	102	0	18,0	
JB	mm	2,7	20,4	1,7	4,2	
100 mm (n=16)	β_B	N/mm ²	56,1	21,6	31,3	78,1
	$E_{B \text{ DIN}}$		11 830	15,8	8 100	15 250
	$E_{B \text{ ISO}}$		12 970	17,1	8 550	17 240
	ρ_o	g/cm ³	0,422	8,5	0,333	0,490
	ρ_{12}		0,445	8,0	0,373	0,522
	a_{DEK}	1	0,15	28,6	0,06	0,20
DH	%	6,9	111	0	24,0	
JB	mm	2,9	36,3	1,7	5,2	
150 mm (n=12)	β_B	N/mm ²	47,1	21,1	30,1	62,3
	$E_{B \text{ DIN}}$		12 000	19,3	8 490	16 230
	$E_{B \text{ ISO}}$		13 150	22,2	9 030	18 740
	ρ_o	g/cm ³	0,415	7,1	0,370	0,467
	ρ_{12}		0,441	6,2	0,397	0,487
	a_{DEK}	1	0,16	16,6	0,11	0,20
DH	%	4,8	114	0	16,0	
JB	mm	2,3	28,1	1,3	3,1	

Tabelle 4: Versuchsergebnisse der drei Querschnittskollektive für Sortierklasse S13; 44 Prüfkörper

Gesamtkollektiv für alle Sortierklassen

h mm	n	5% von n	10% von n	Kleinstwerte β				$\beta_{5\%}$ N/mm ²	$\beta_{10\%}$ N/mm ²	$\bar{\beta}_B$ N/mm ²
				2.	3.	5.	6.			
50	60	3,0	6,0	23,1		25,5		23,1	25,5	47,5
100	58	2,9	5,8	21,8	25,9	27,2	28,4	25,5	28,2	47,1
150	60	3,0	6,0	19,0		26,7		19,0	26,7	40,3

Tabelle 5: Verteilungsfreie Ermittlung der 5%- und 10%-Fraktile der Biegefestigkeit β_B für die Querschnittskollektive

Differenziert nach Sortierklassen

h mm	Sortier- klas- se	n	5% von n	10% von n	Kleinstwerte β				$\beta_{5\%}$ N/mm ²	$\beta_{10\%}$ N/mm ²	$\bar{\beta}_B$ N/mm ²
					1.	2.	3.	4.			
50	S7	19	0,95	1,9	16,2	18,3			16,1	18,1	34,2
	S10	25	1,25	2,5	25,4	30,2	33,7		26,6	31,9	48,3
	S13	16	0,8	1,6	39,4	42,3			38,8	41,1	62,1
100	S7	14	0,7	1,4	13,7	21,8			11,3	16,9	33,1
	S10	28	1,4	2,8	25,9	26,9	30,5		26,3	29,8	48,9
	S13	16	0,8	1,6	31,3	43,4			28,9	38,6	56,1
150	S7	17	0,85	1,7	17,5	19,0			17,3	18,5	30,5
	S10	31	1,55	3,1	13,5	26,7	29,6	30,3	20,8	29,7	43,0
	S13	12	0,6	1,2	30,1	36,7			27,5	31,4	47,1

Tabelle 6 : Verteilungsfreie Ermittlung der 5%- und 10%-Fraktile der Biegefestigkeit β_B für die Querschnittskollektive, unterteilt nach Sortierklassen S7, S10 und S13

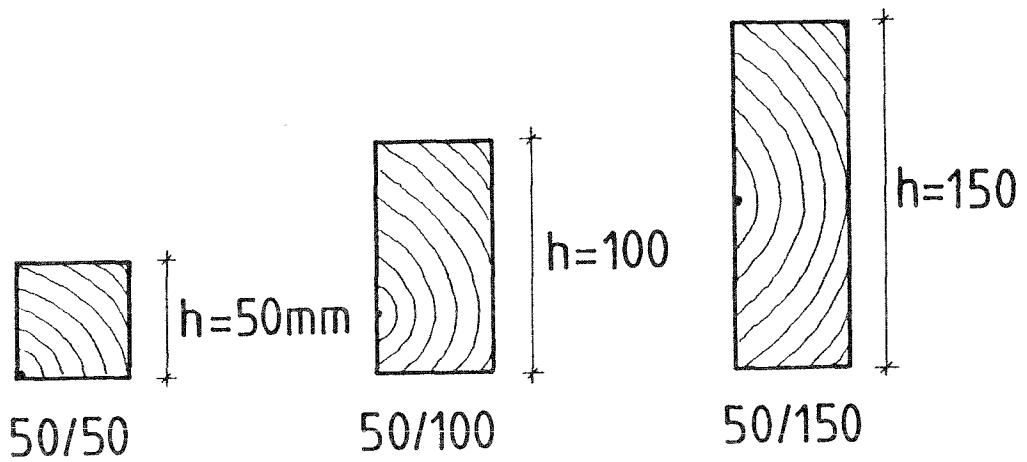
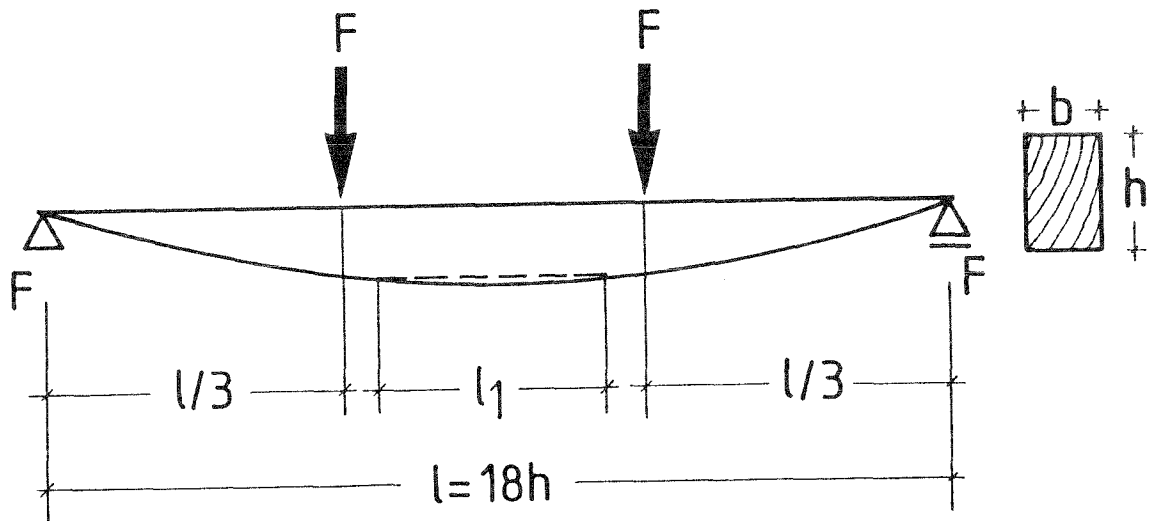


Bild 1: Prinzip der Biegeprüfung und untersuchte Querschnittsgrößen (mm) mit typischen Jahrringlagen

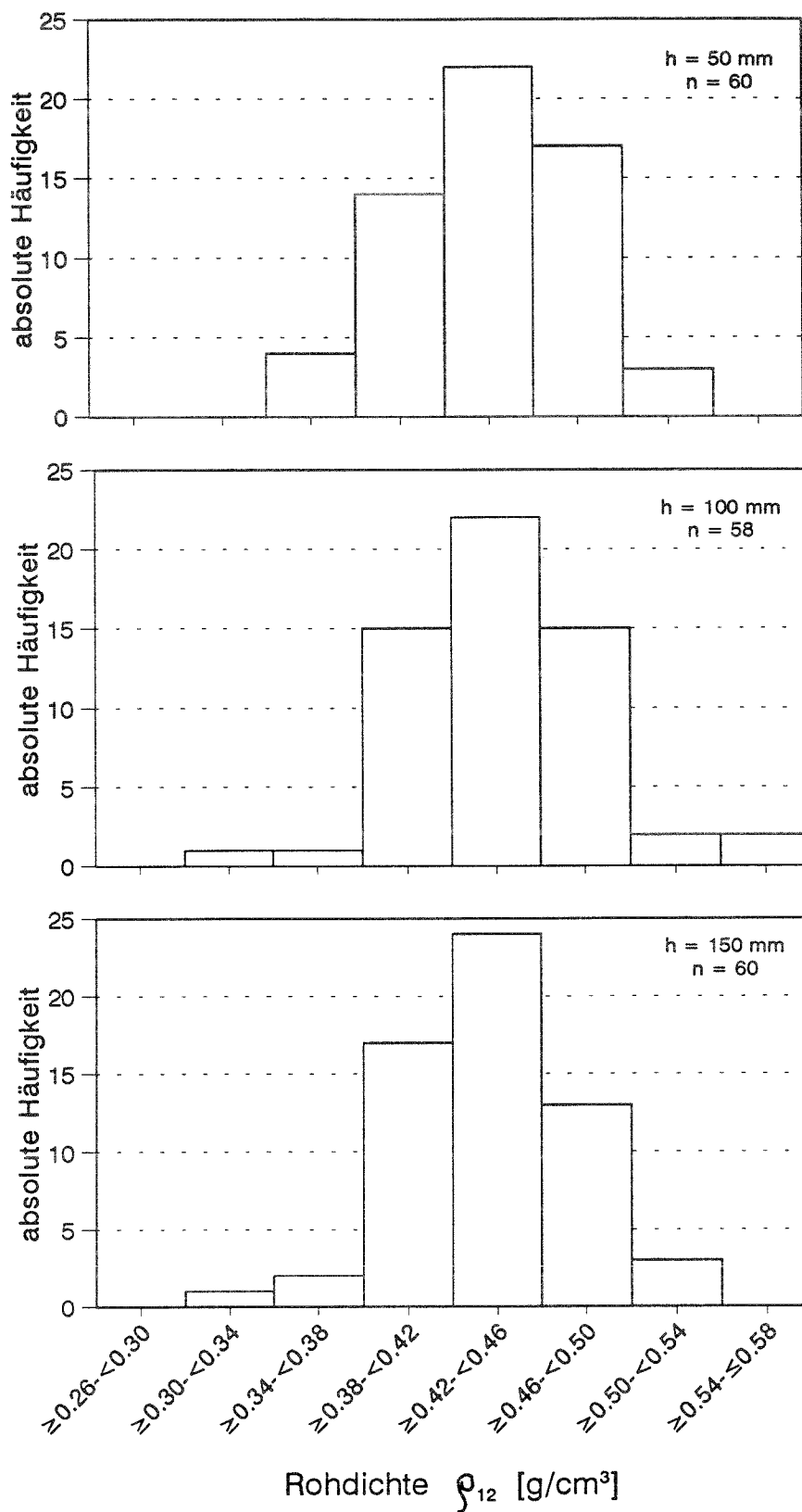


Bild 2: Verteilung der Rohdichte in den drei Querschnittskollektiven

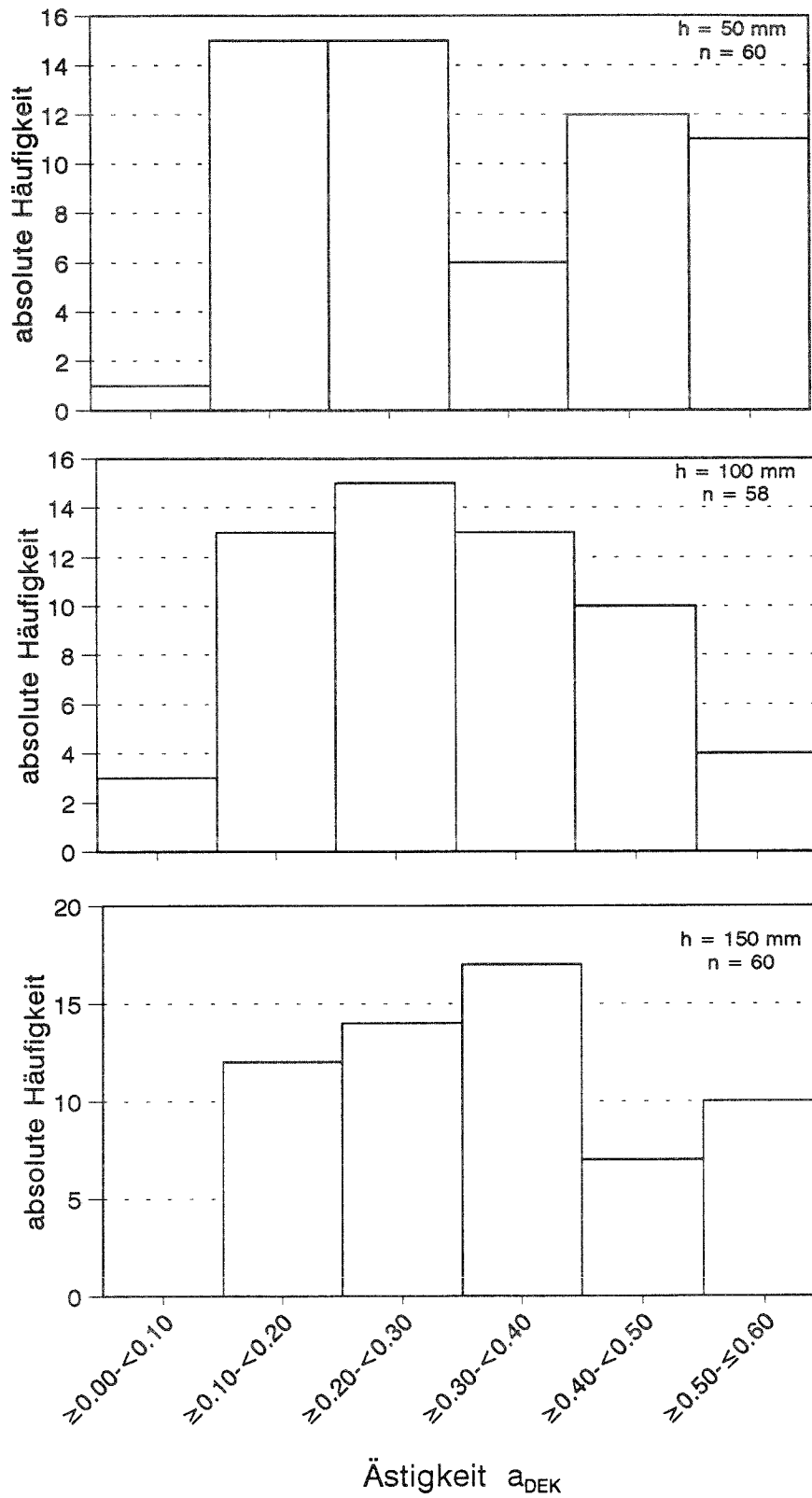


Bild 3: Verteilung der Ästigkeit in den drei Querschnittskollektiven

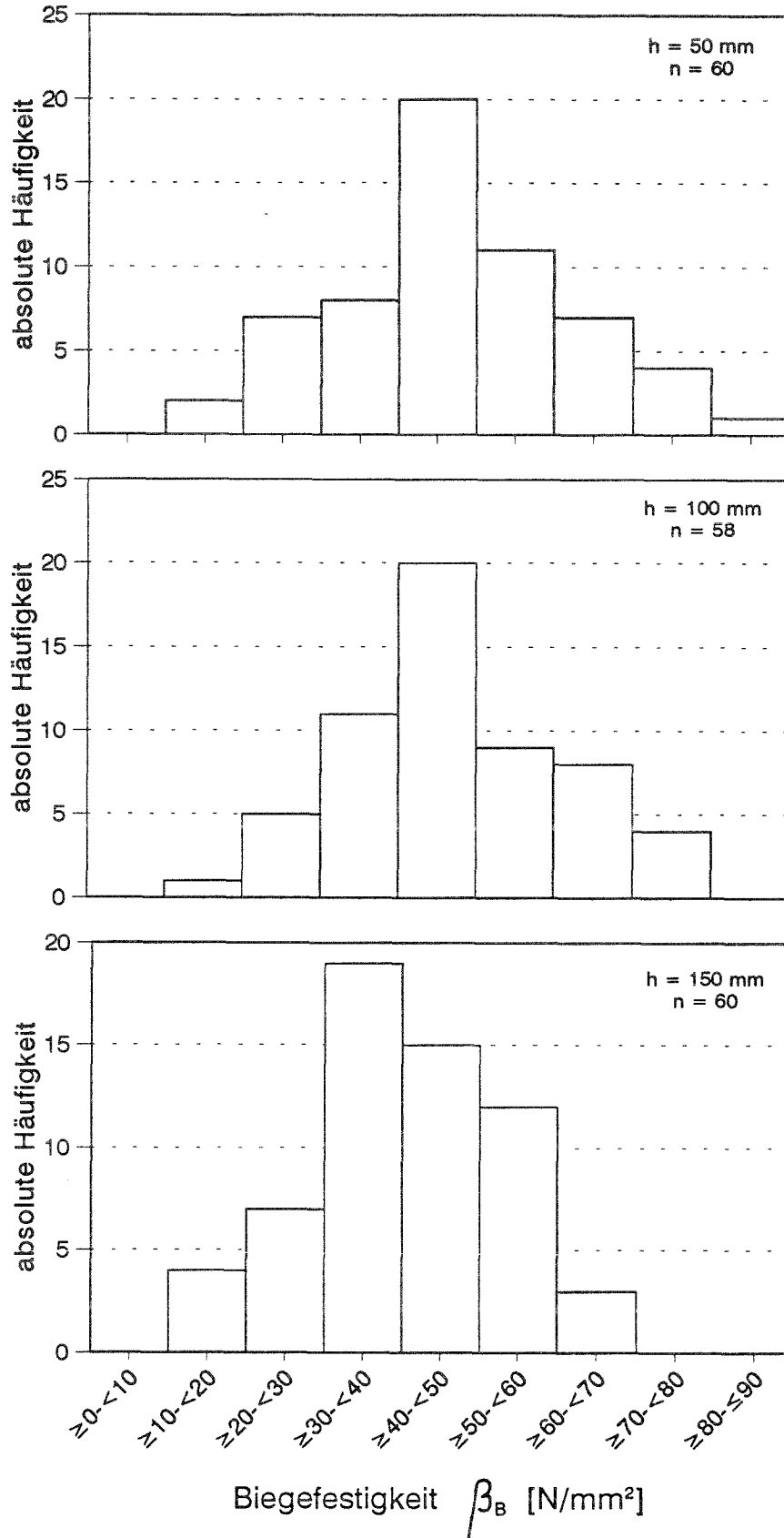


Bild 4: Verteilung der Biegefestigkeit in den drei Querschnittskollektiven

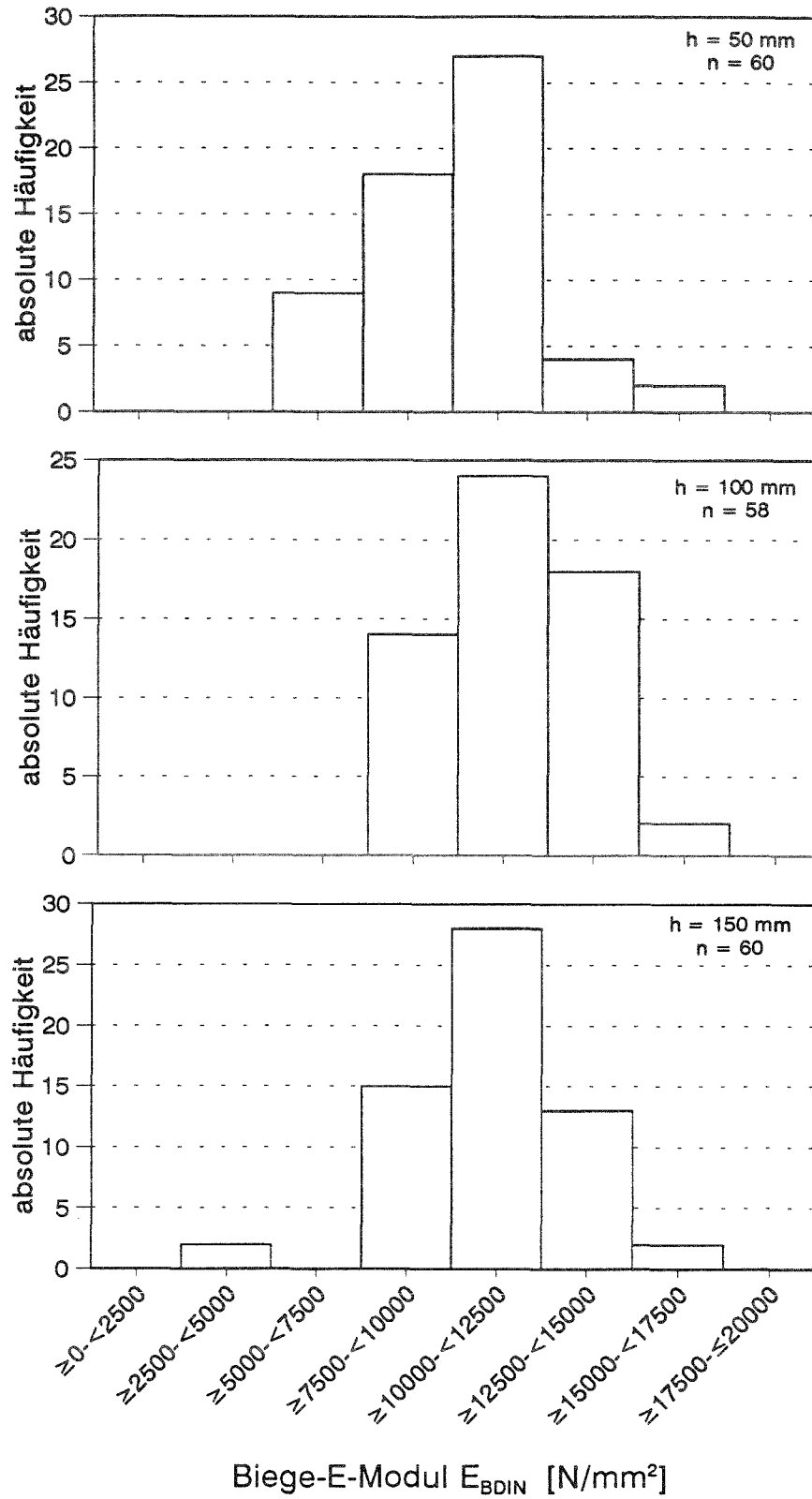


Bild 5: Verteilung des Biege-E-Moduls (DIN) in den drei Querschnittskollektiven

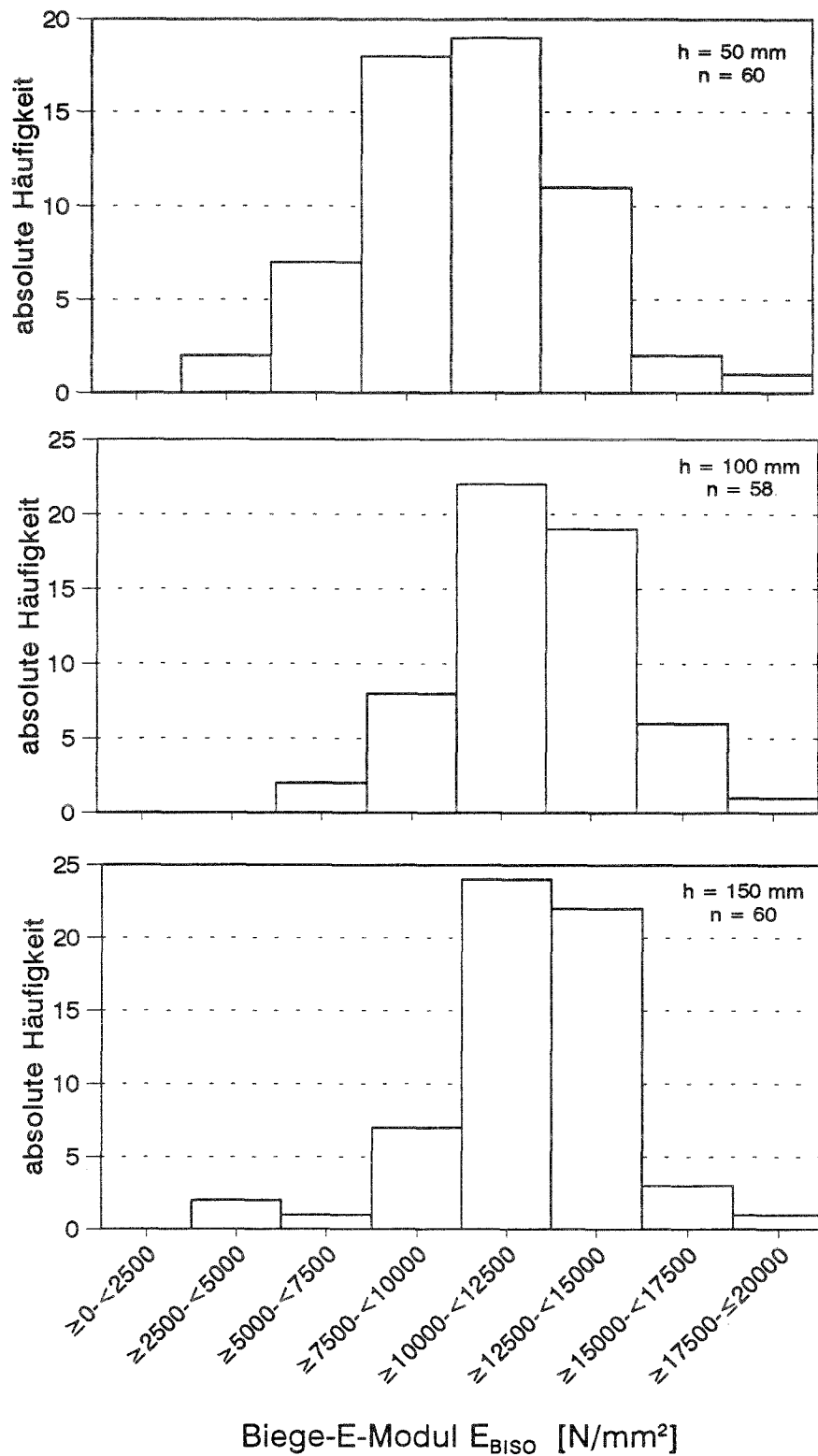


Bild 6: Verteilung des Biege-E-Moduls (ISO) in den drei Querschnittskollektiven

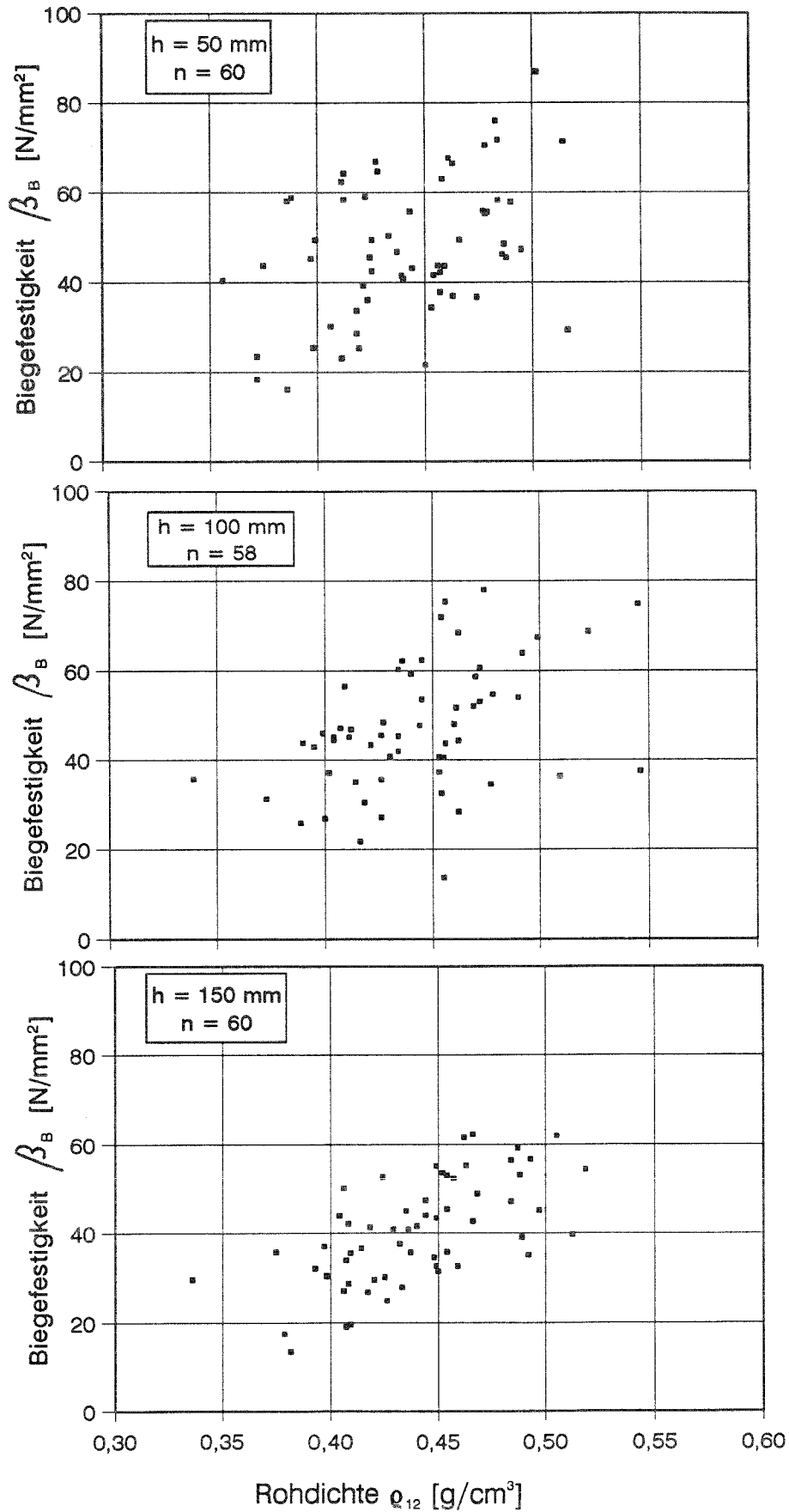


Bild 7: Biegefestigkeit über der Rohdichte für die drei Querschnittskollektive

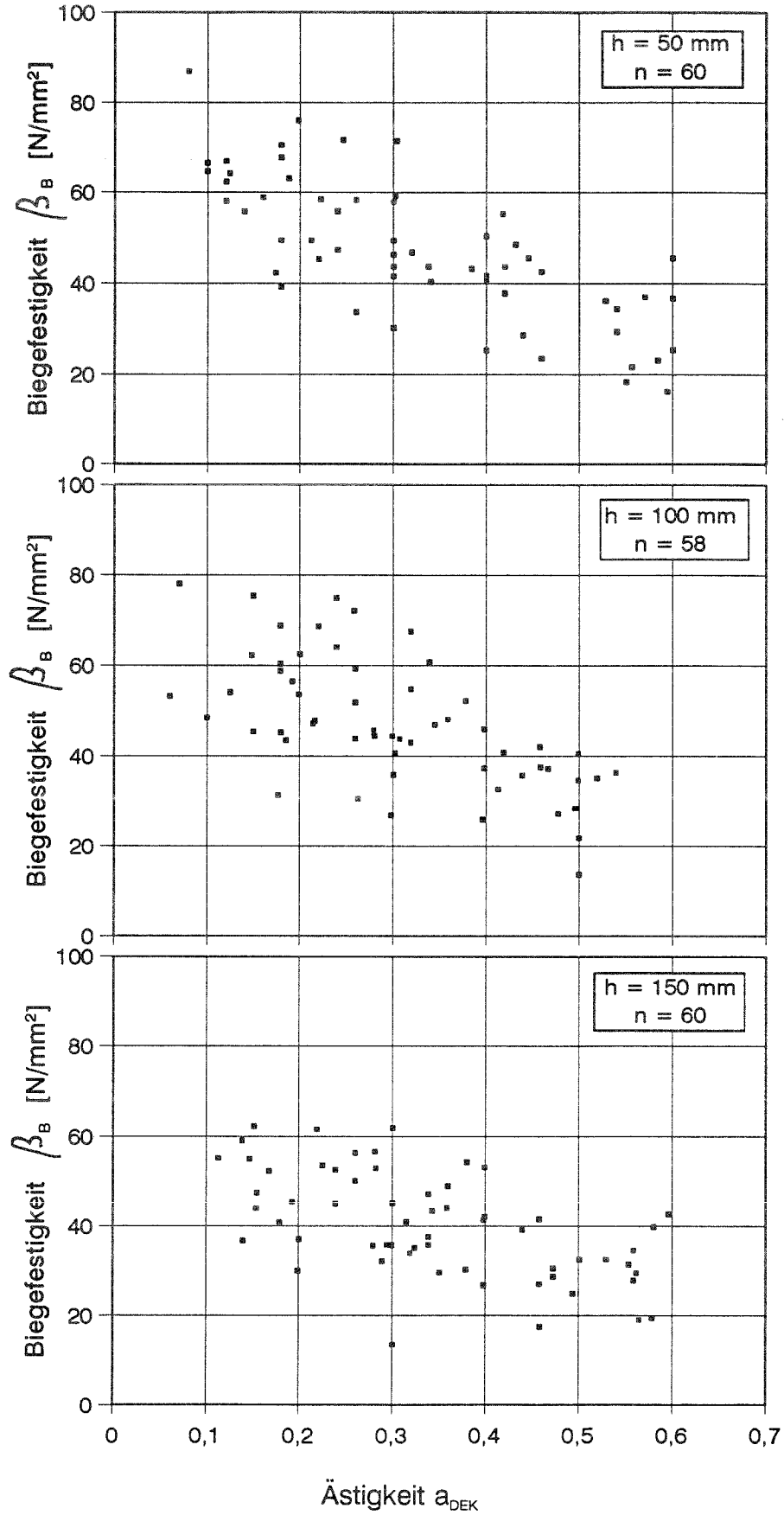


Bild 8: Biegefestigkeit über der Ästigkeit für die drei Querschnittskollektive

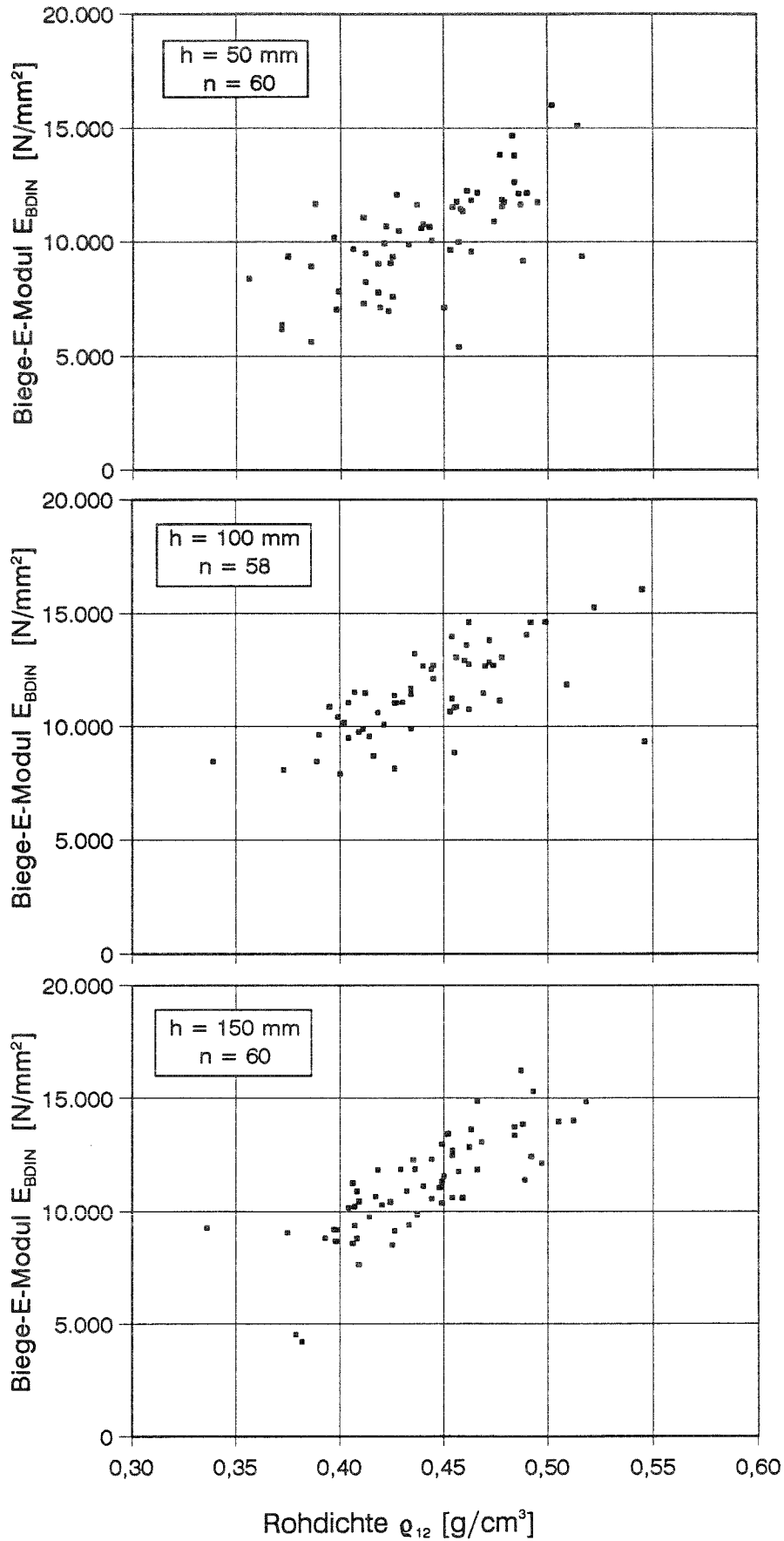


Bild 9: Biege-E-Modul (DIN) über der Rohdichte für die drei Querschnittskollektive

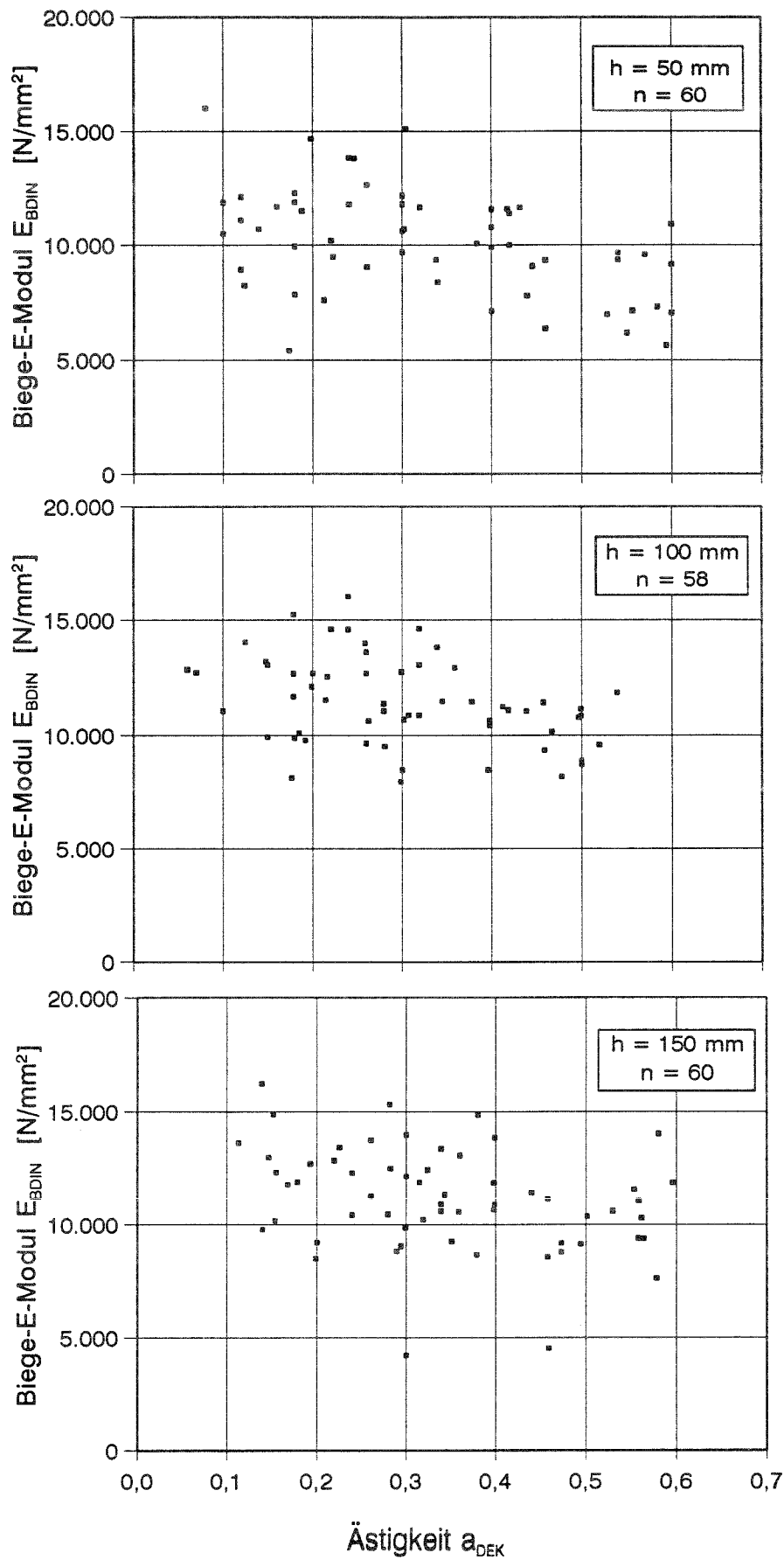


Bild 10: Biege-E-Modul (DIN) über der Ästigkeit für die drei Querschnittskollektive

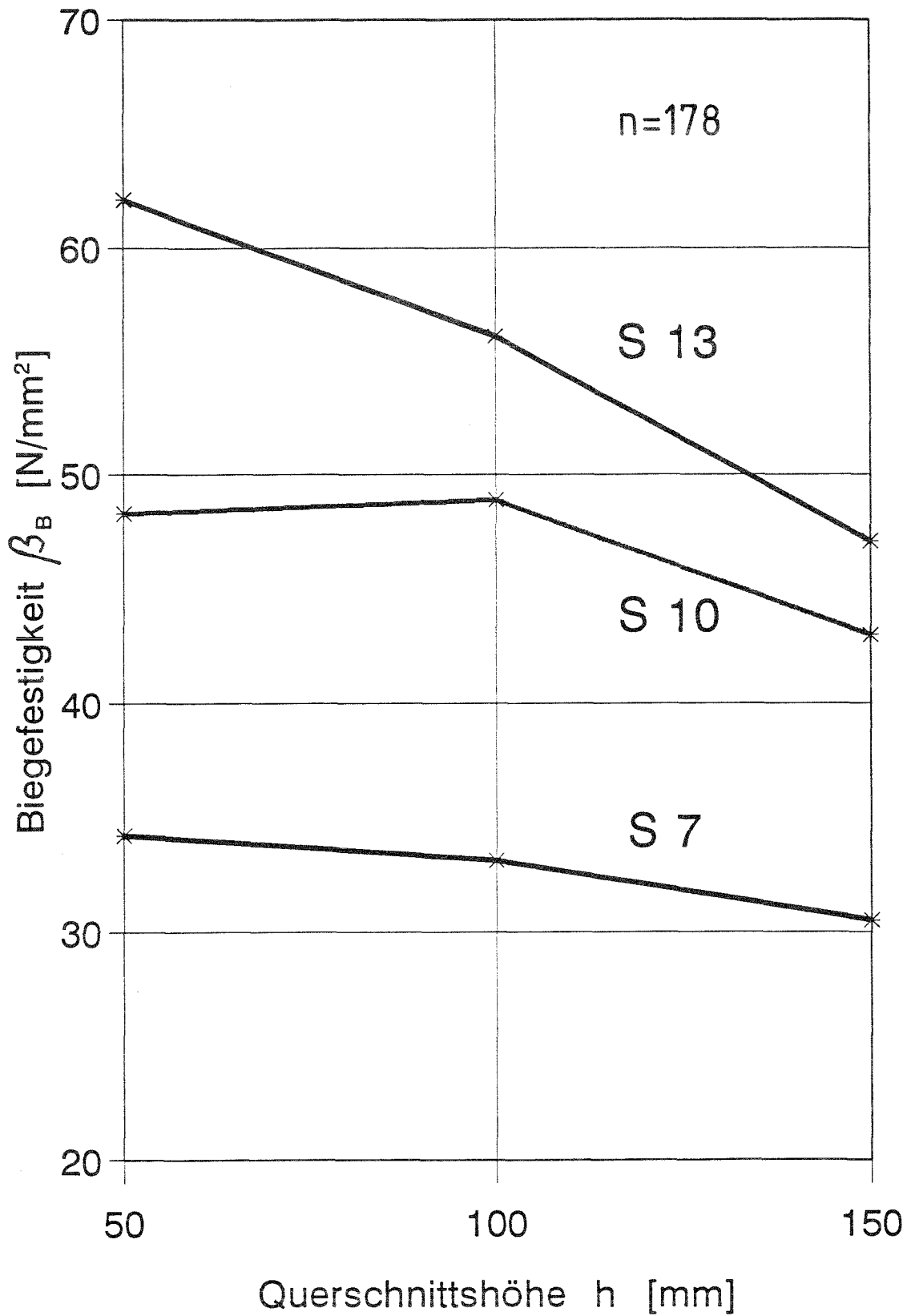


Bild 11: Mittlere Biegefestigkeit für die Sortierklassen S7, S10 und S13 nach DIN 4074 über der Querschnittshöhe

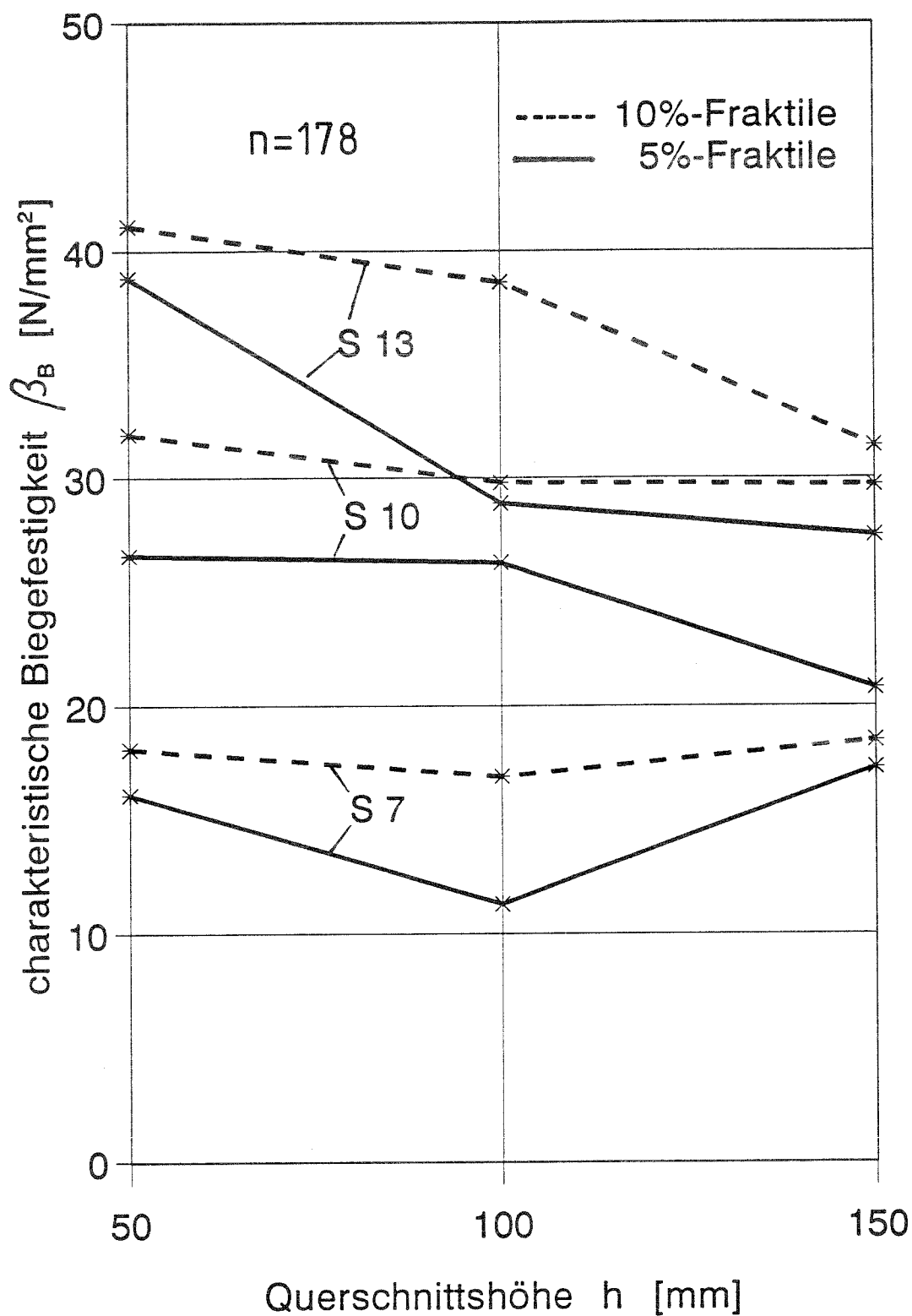


Bild 12: Fraktile-Werte der Biegefestigkeit für die Sortierklassen S7, S10 und S13 nach DIN 4074 über der Querschnittshöhe

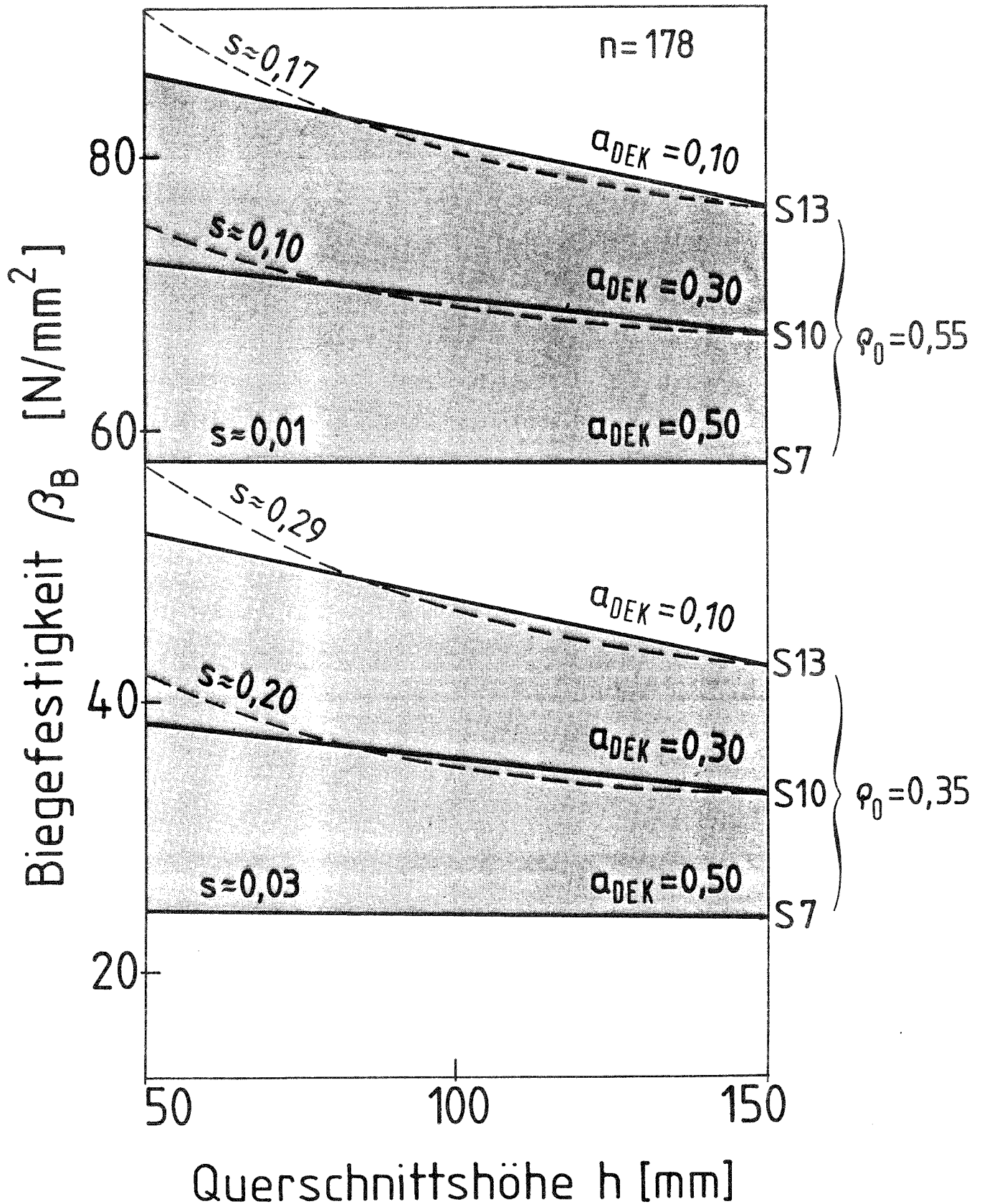


Bild 13: Biegefestigkeit nach multipler Regression über die Versuchswerte für 2 extreme Rohdichtewerte und die Ästigkeits-Mittelwerte der Sortierklassen nach DIN 4074 über der Querschnittshöhe

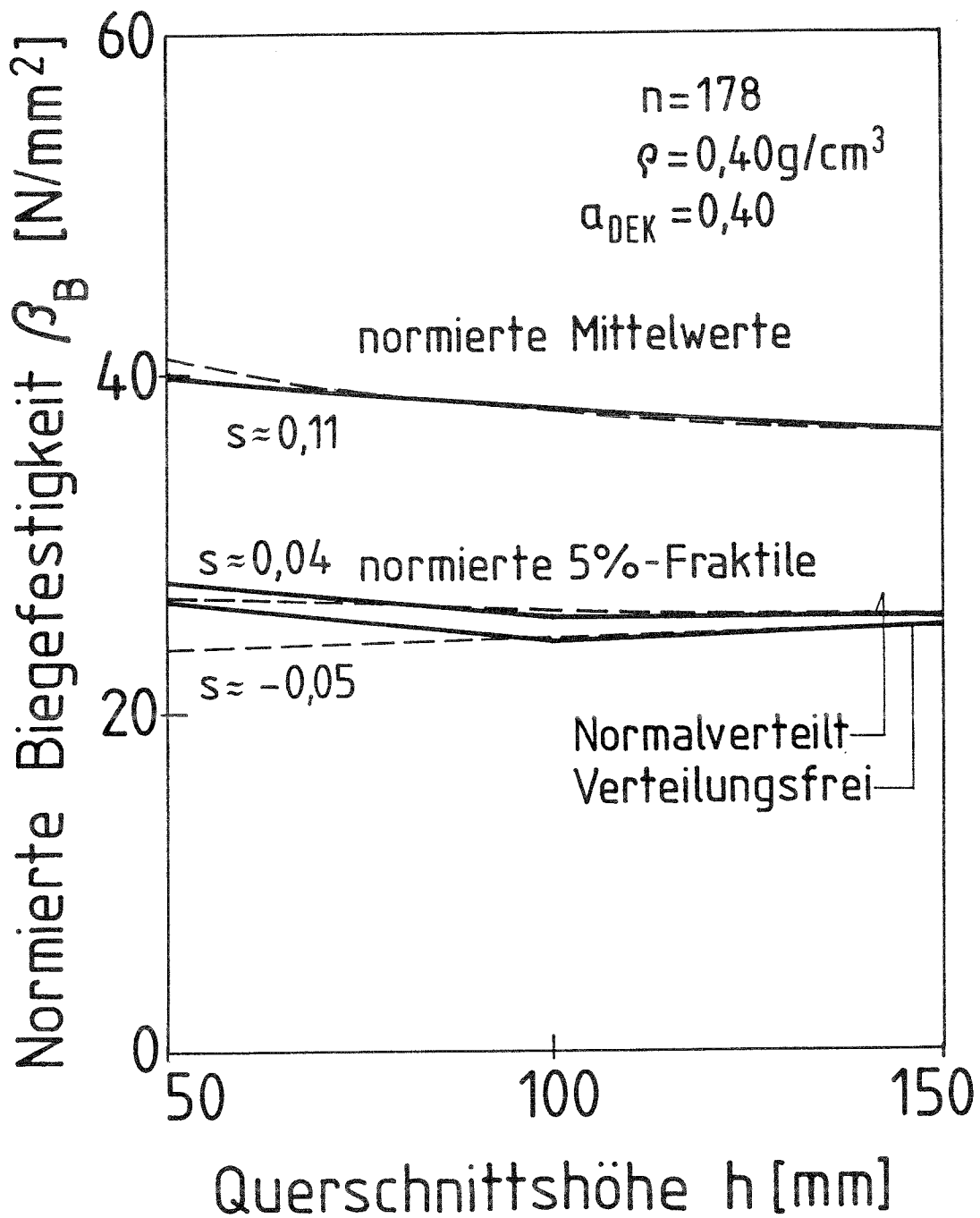


Bild 14: Normierte Biegefestigkeit nach multipler Regression über die Versuchswerte für mittlere Holzqualität über der Querschnittshöhe

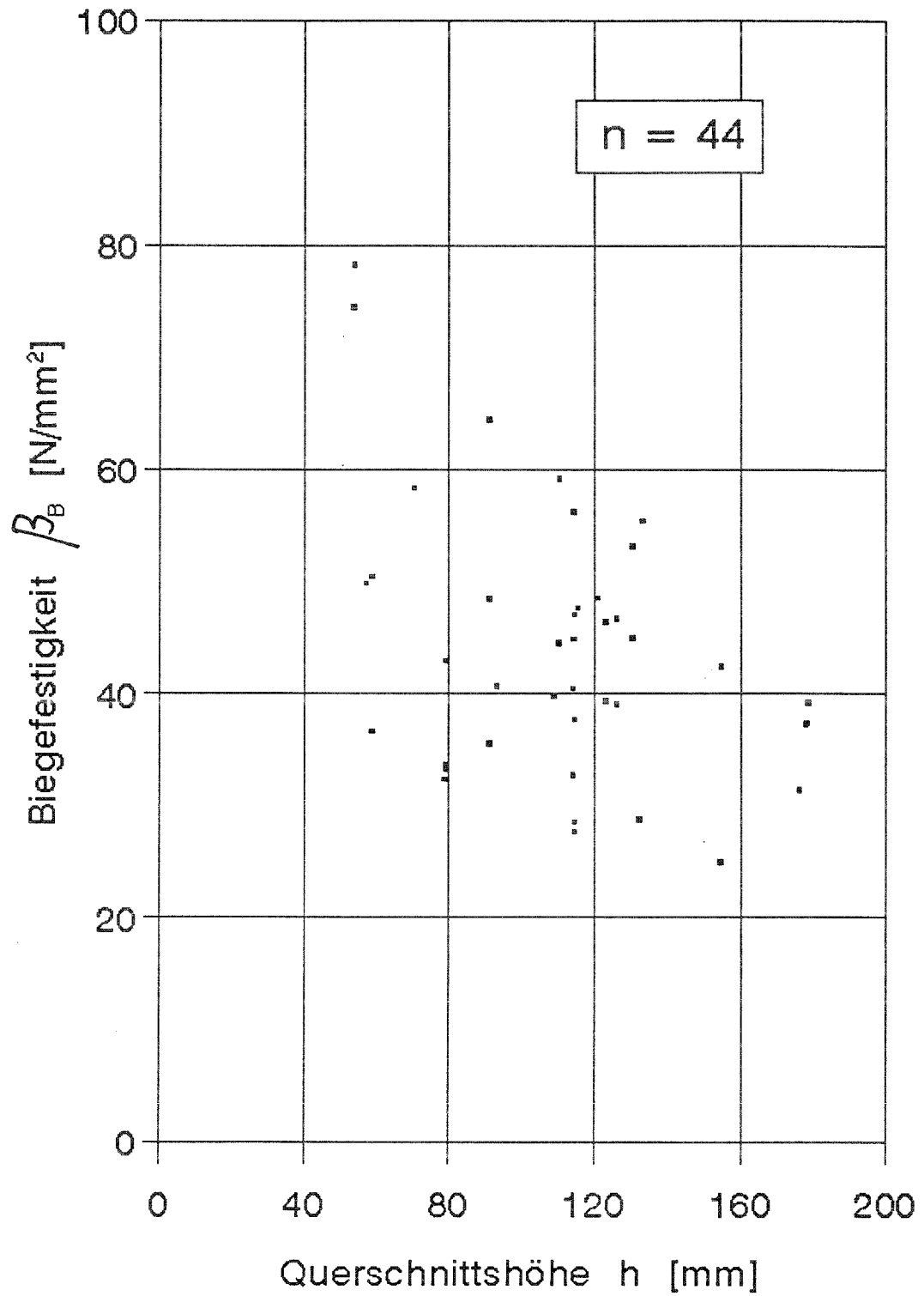


Bild 15: Biegefestigkeit über der Querschnittshöhe nach Versuchen von Graf (1938)

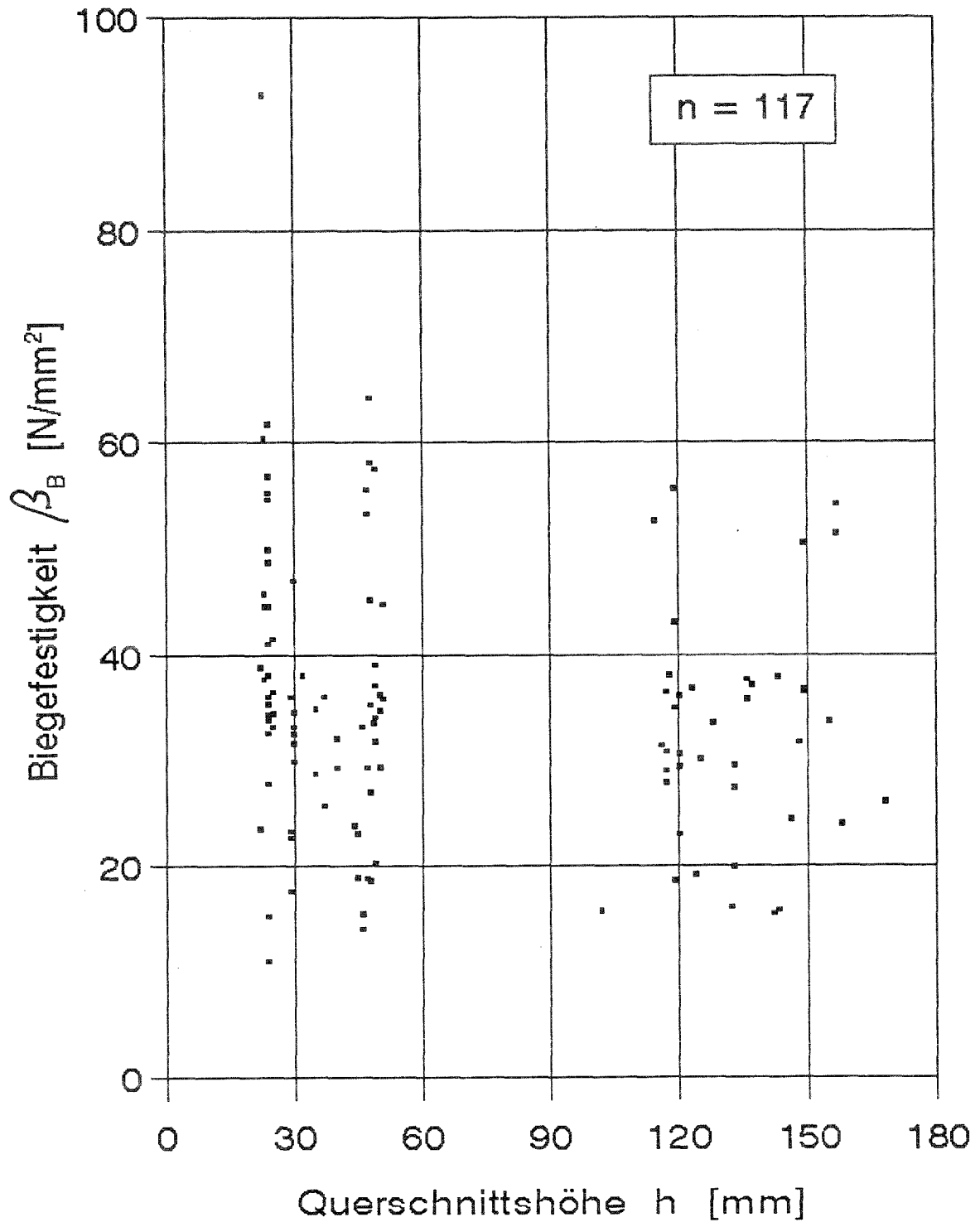


Bild 16: Biegefestigkeit über der Querschnittshöhe nach Versuchen von Egner und Kolb (1962), alle Werte

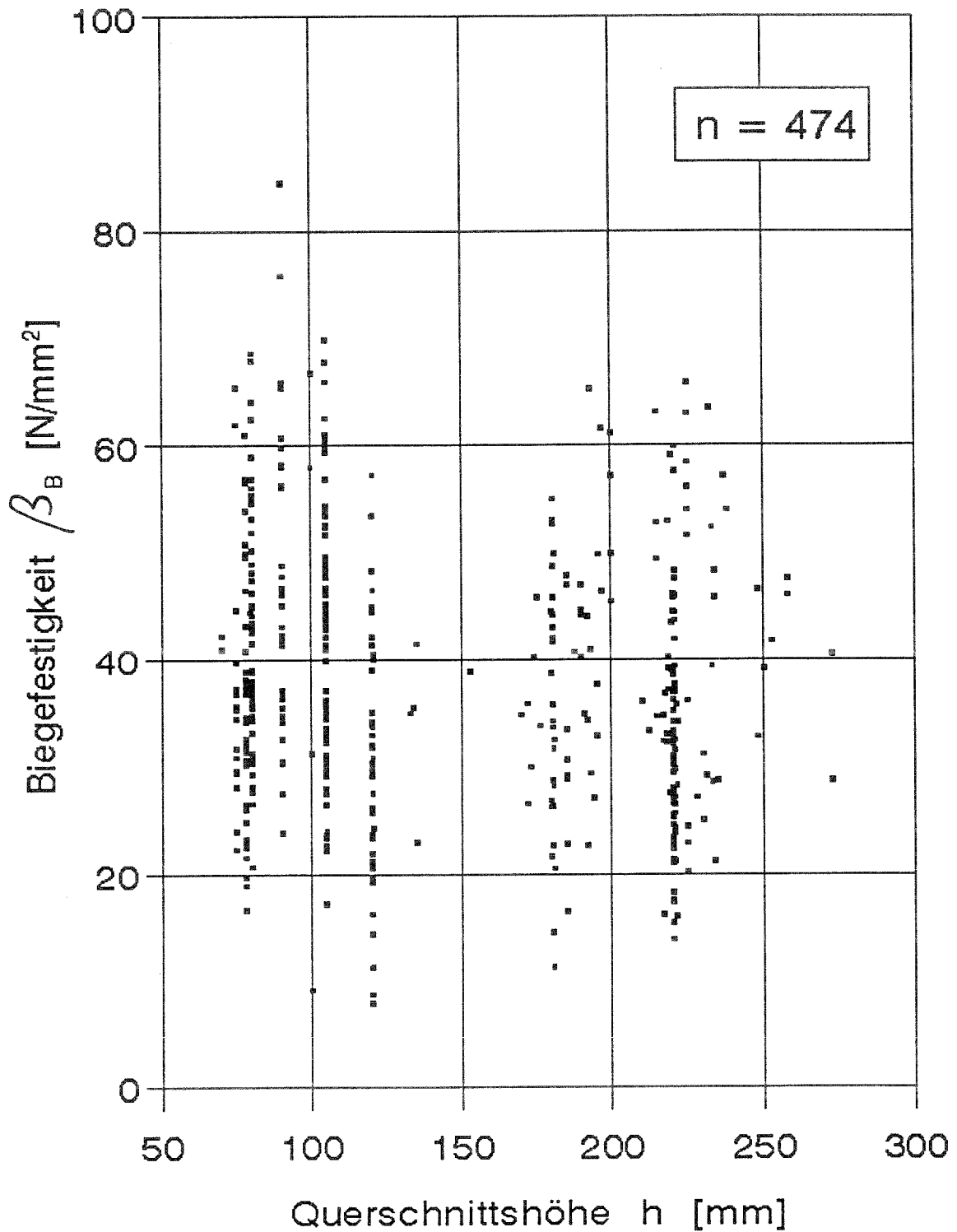


Bild 17: Biegefestigkeit über der Querschnittshöhe nach Versuchen des Instituts für Holzforschung in den Jahren 1987 bis 1990 (3 Projekte), alle Werte

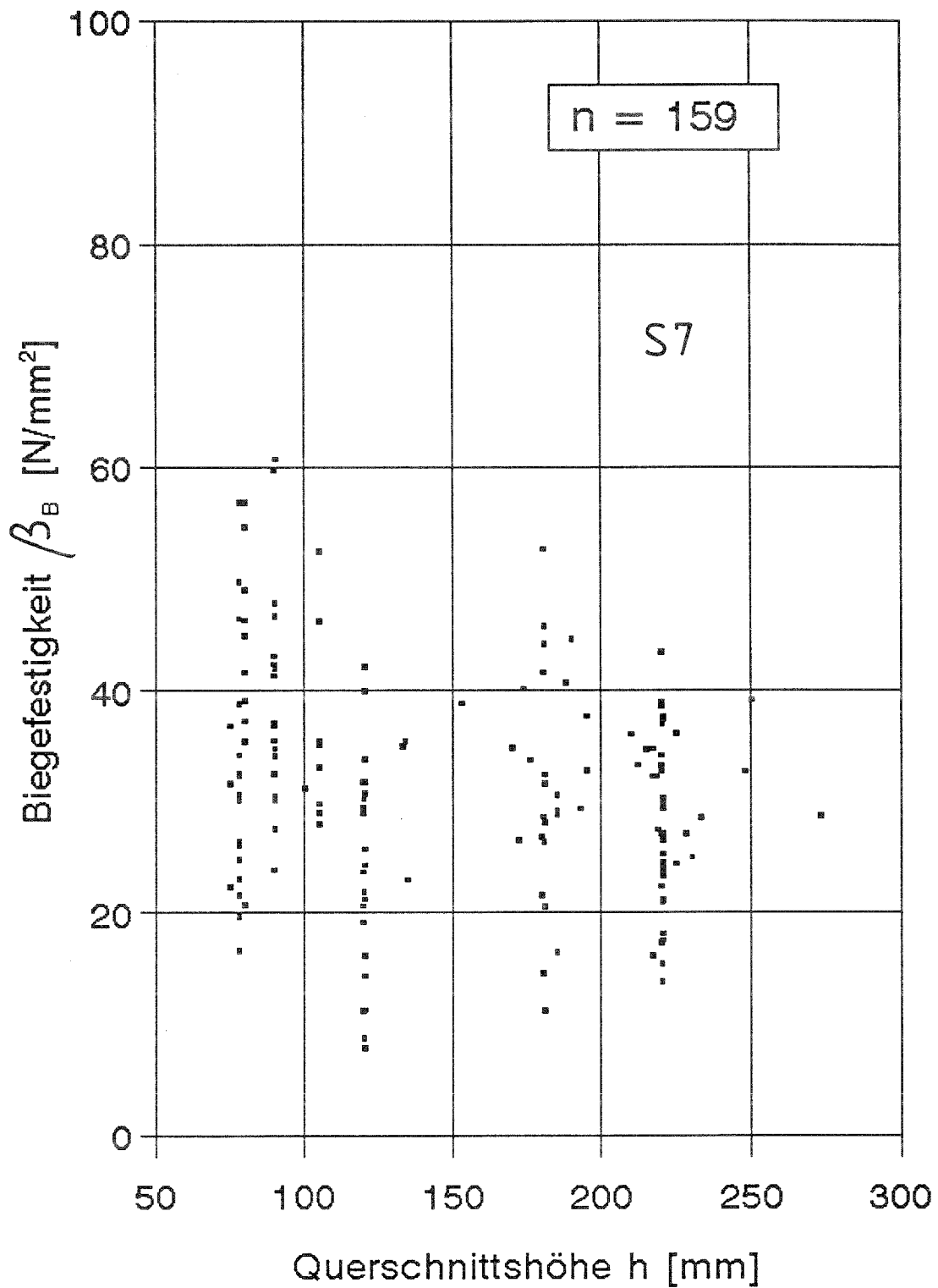


Bild 18: Biegefestigkeit über der Querschnittshöhe nach Versuchen des Instituts für Holzforschung in den Jahren 1987 bis 1990 (3 Projekte), **Sortierklass S7**

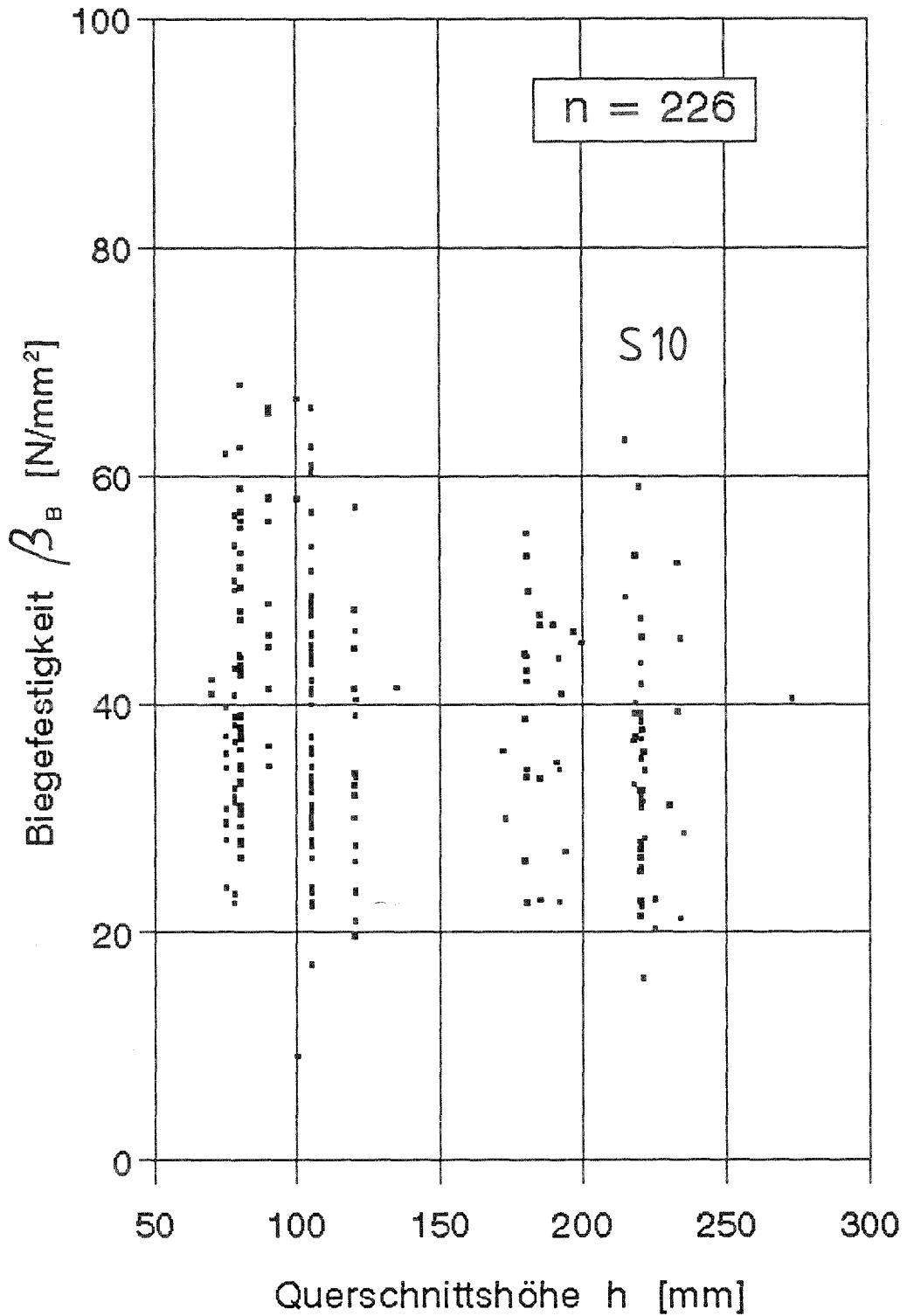


Bild 19: Biegefestigkeit über der Querschnittshöhe nach Versuchen des Instituts für Holzforschung in den Jahren 1987 bis 1990 (3 Projekte), **Sortierklasse S10**

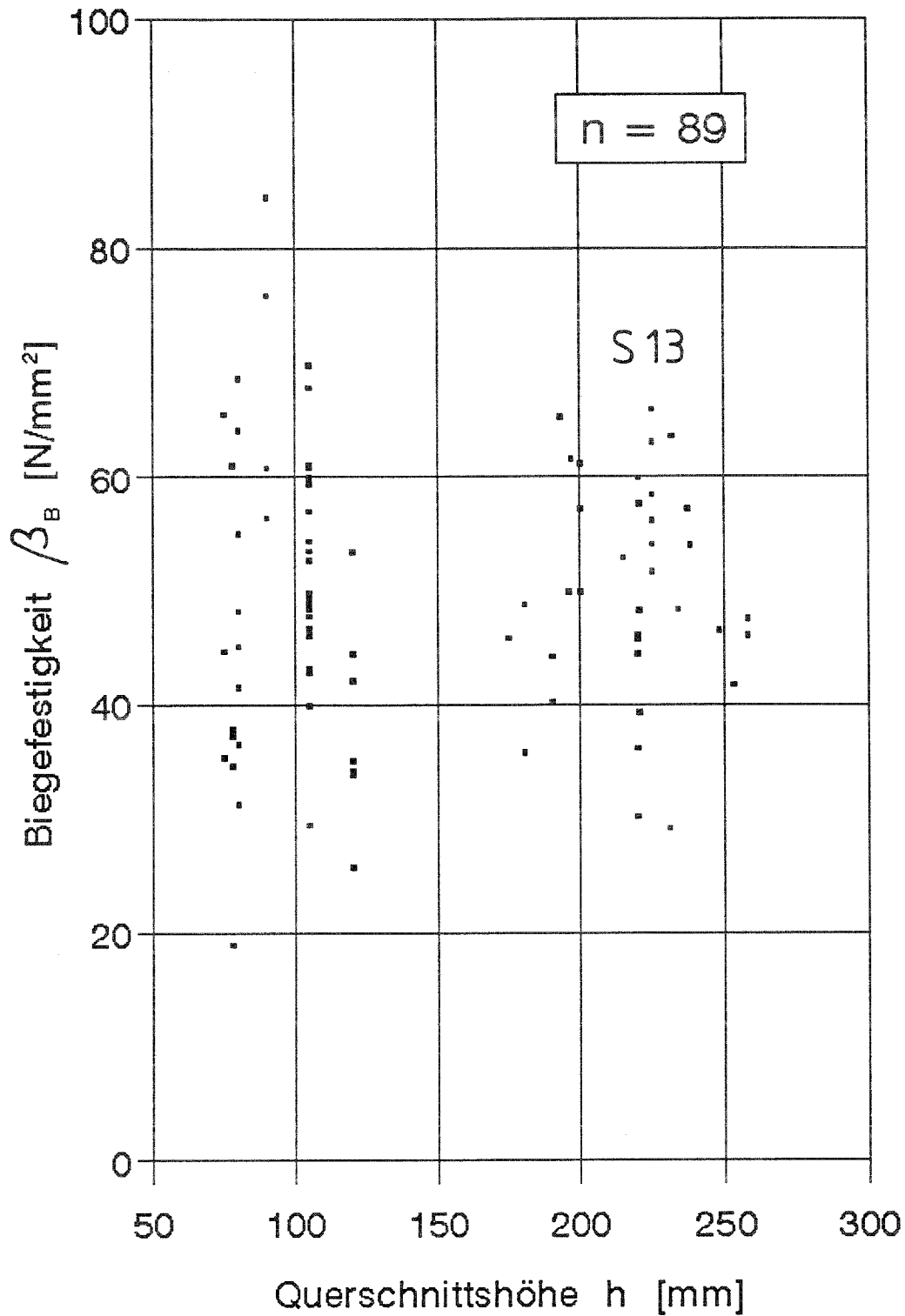


Bild 20: Biegefestigkeit über der Querschnittshöhe nach Versuchen des Instituts für Holzforschung in den Jahren 1987 bis 1990 (3 Projekte), **Sortierklasse S13**