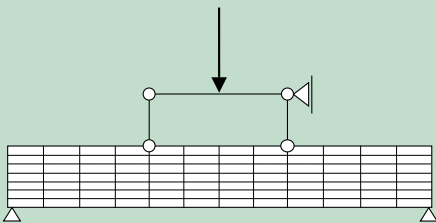
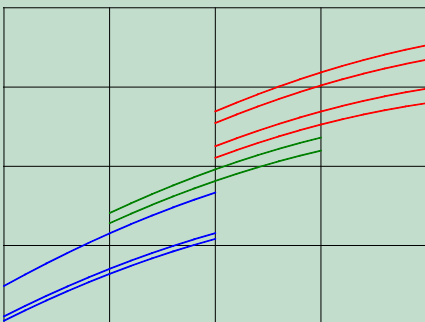




H. J. Blaß  
M. Frese  
P. Glos  
J. K. Denzler  
P. Linsenmann  
A. Ranta-Maunus



## Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz mit modifiziertem Aufbau





H. J. Blaß, M. Frese, P. Glos, J. K. Denzler,  
P. Linsenmann, A. Ranta-Maunus

**Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz  
mit modifiziertem Aufbau**

**Band 11 der Reihe  
Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau**

**Herausgeber**

**Universität Karlsruhe (TH)**

**Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. J. Blaß**



# **Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz mit modifiziertem Aufbau**

Die Arbeiten wurden im Auftrag der Studiengemeinschaft  
Holzleimbau e.V. durchgeführt.

**H. J. Blaß**

**M. Frese**

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen  
Universität Karlsruhe (TH)

**P. Glos, J.K. Denzler und P. Linsenmann**

Holzforschung München  
Technische Universität München

**A. Ranta-Maunus**

VTT Technical Research Centre of Finland



---

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 2008  
Print on Demand

ISSN: 1860-093X  
ISBN: 978-3-86644-251-1

## Inhalt

1	Einleitung	1
2	Ausgangssituation – Anstoß zu der Arbeit	3
2.1	Biegeversuche für das Forschungsvorhaben Blaß und Schmid 2005	3
2.2	Ergänzende Biegeversuche	3
2.3	Konsequenzen	4
2.4	Rückblick – das Modell von Colling	6
3	Simulation der charakteristischen Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Nadelholz	7
3.1	Hintergrund und Vorgehensweise	7
3.2	Untersuchte Sortierverfahren	8
3.2.1	Allgemeines	8
3.2.2	Datenbasis Holzforschung München	8
3.2.3	Datenbasis VTT Technical Research Centre of Finland	17
3.3	Das Rechenmodell	18
3.3.1	Allgemeines	18
3.3.2	Simulationsprogramm	18
3.3.3	Finite-Elemente-Programm	20
3.3.4	Regressionsbeziehungen für mechanische Eigenschaften	20
3.3.5	Autokorrelation	21
3.3.6	Simulation der Darrrohdichte	21
3.3.7	Simulation der Ästigkeit	22
3.4	Beispiel für simulierte Biegeversuche	22
3.4.1	Eingaben	23
3.4.2	Ergebnisse	23
3.5	Ergebnisse der simulierten Biegeversuche	31
3.5.1	Allgemeines	31
3.5.2	Ergebnisse auf der Grundlage der Datenbasis Holzforschung München	31
3.5.3	Ergebnisse auf der Grundlage der Datenbasis VTT Finnland	33
4	Modelle für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit	35
4.1	Allgemeines	35
4.2	Entwicklung der Modelle	35
4.2.1	Universalmodell	43
4.2.2	Visuelles Modell-I	44
4.2.3	Visuelles Modell-II	45
4.2.4	Rohdichte-Modell	46
4.2.5	Dynamischer-E-Modul-Modell-I	47
4.2.6	Dynamischer-E-Modul-Modell-II	48
4.2.7	Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I	49
4.2.8	Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-II	50
4.2.9	Statischer-E-Modul-Modell	51

4.2.10	Finnisches Universalmodell	52
4.3	Diskussion und Auswahl der relevanten Modelle	53
4.4	Einfluss des kombinierten Trägeraufbaus auf die Biegefestigkeit	54
4.5	Einfluss der Trägerhöhe und der Trägerlänge auf die Biegefestigkeit	57
4.6	Beispiel für einen kombinierten Träger der Klasse GL32c	60
4.7	Verifikation der Modelle	61
4.7.1	Collings Modell	61
4.7.2	Versuche aus den Abschnitten 2.1 und 2.2	61
4.7.3	Weitere Versuche	62
4.7.4	Versuche von Schickhofer 1996	67
4.7.5	Versuche von Falk et al. 1992	68
4.7.6	Versuche von Aicher und Höfflin 2006	68
4.7.7	Versuche von Brandner und Schickhofer 2008	69
4.7.8	Bewertung der Verifikation	70
4.8	Vereinfachte Modellgleichungen für die Normung	70
4.9	Vorschläge für homogene und kombinierte Querschnitte	73
4.9.1	Allgemeines	73
4.9.2	Visuelle Sortierung	74
4.9.3	Maschinelle Sortierung	75
5	Zusammenfassung	77
6	Literatur	79
7	Bezeichnungen	83
Anlagen		85
A 1	Biegeversuche an Brettschichtholzträgern	85
A 2	Verteilungen der Darrrohdichte und der Ästigkeit sowie Eingabedaten	97
A 3	Simulationsergebnisse	119
A 4	Residualanalyse	147
A 5	Weitere Biegeversuche	157
A 6	Vorschlag I für prEN 14080	173
A 7	Vorschlag II für prEN 14080	179

# 1 Einleitung

In den Jahren 2005 und 2006 wurden an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe (TH) 600 mm hohe Brettschichtholzträger der Festigkeitsklassen GL32 und GL36 in Biegeversuchen geprüft. Die ermittelten Biegefestigkeiten waren bei weitem nicht ausreichend, um den Nennwerten der Klassen GL32 bzw. GL36 mit einem Aufbau nach DIN 1052 zu entsprechen. Da diese Beobachtung unmittelbar die Standsicherheit von Holzkonstruktionen aus Brettschichtholz dieser Klassen betrifft, wurde auf dem Gebiet der Biegefestigkeit von Brettschichtholz dringender Forschungsbedarf gesehen. Es wurde daraufhin die Untersuchung in dieser Forschungsarbeit in die Wege geleitet.

Die Gründe für die zu niedrigen Biegefestigkeiten lassen sich in drei unterschiedliche Richtungen eingrenzen.

1. Festigkeitsmodellierung der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit: Denkbar sind unzureichende Anforderungen an die charakteristische Brett-Zugfestigkeit bei der Festigkeitssortierung und an die charakteristische Keilzinkenfestigkeit; Hauptsächlich von diesen beiden Anforderungen hängt die Biegefestigkeit des Brettschichtholzes ab.
2. Außergewöhnliche Stichprobe: Es wurden möglicherweise Träger geprüft, die aufgrund von z.B. fehlerhafter Herstellung und/oder mangelhafter Materialqualität ein niedriges Festigkeitsniveau besaßen.
3. Veränderung der Schnittholzqualität: Die wissenschaftlichen Grundlagen für die baurechtliche Regelung von Brettschichtholz wurden in den 1980er Jahren erarbeitet (Colling 1995). Sie basieren auf Untersuchungen an Schnittholz, die mittlerweile über 25 Jahre zurückliegen. In diesem Zeitraum hat sich ein Wandel im Waldbau (Forstwirtschaft), in der Sägewerkstechnologie (Holzwirtschaft) und bei den Nutzungsschwerpunkten von Schnittholz (Markt) vollzogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Umbau nadelbaumdominierter Reinbestände in naturnahe Wälder nicht nur ökonomische Folgen, sondern auch Einflüsse auf die Holzqualität hat (Fritz 2006 sowie Burschel und Huss 2003). Die Einführung der Profilspaner in der Sägewerkstechnologie hat in der Vergangenheit zunächst das Schwachrundholz als Rohholz begünstigt (Fronius 1989). Mittlerweile steht wieder das Starkholz teilweise im Blickpunkt (Reiter 2005). Der Markt der Holzprodukte ist ständig in Bewegung, was die Holzindustrie zu Veränderungen veranlasst. Innovative Holzprodukte haben eine Rückwirkung auf die Herstellung und die Verteilung des Schnittholzes. Zusammen mit neuen Verfahren bei der Festigkeitssortierung (z.B. Blaß und Frese 2002) beeinflusst das die strukturellen und mechanischen Eigenschaften des Brettangebots für Brettschichtholz und möglicherweise auch seine Festigkeit.

Aktuelle wissenschaftliche Arbeiten bezüglich der Festigkeitsmodellierung von Brettschichtholz aus Buche und von Hybridträgern haben gezeigt (Blaß et al. 2005, Frese 2006, Blaß und Frese 2006): Ein funktionaler Zusammenhang zwischen der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit einerseits und der charakteristischen Brett- und Keilzinken-Zugfestigkeit andererseits ist ein transparentes Festigkeitsmodell. Es ist hinsichtlich der Festlegung von Anforderungen an Bretter und Keilzinken sehr flexibel.

Dieser Modellierungsansatz wird in der vorliegenden Forschungsarbeit auf die charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Nadelholz übertragen, um das derzeitige Festigkeitsmodell in EN 1194 anhand alternativer Modelle unabhängig zu überprüfen. Damit wird die Auseinandersetzung mit dem ersten der oben angeführten Gründe Hauptgegenstand dieser Arbeit. Die Entwicklung alternativer Modelle für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit wird weitgehend theoretisch durchgeführt. Mit im Mittelpunkt steht dabei die Aufgabe, geeignete Anforderungen an Bretter und Keilzinken zu ermitteln, damit die Nennwerte der charakteristischen Biegefestigkeiten für GL32 und – wenn es wirtschaftlich vertretbar ist – für GL36 gewährleistet sind.

Die wesentlichen Schritte dieser Forschungsarbeit im Überblick:

Es wird der Einfluss der Festigkeit der Bretter und Keilzinken auf die Brettschichtholz-Biegefestigkeit mittels simulierter Biegeversuche zahlenmäßig ermittelt. Dazu wird ein bestehendes Rechenmodell auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode – ursprünglich abgestimmt auf festigkeitssortierte Buchenbretter – festigkeitssortiertem Nadelholz angepasst. Dafür stehen die Erkenntnisse und Eingangsdaten eines Rechenmodells für Nadelholz (KAREMO) zur Verfügung. KAREMO wurde in den 1980er Jahren entwickelt. In dieser Zeit gab es in Deutschland noch keine Erfahrungen und vor allem Daten bezüglich der maschinellen Sortierung. Daher ist es für die Forschungsarbeit notwendig, die Eingabedaten Ästigkeit und Rohdichte von Brettern aus Nadelholz für das Rechenmodell anhand neuerer Untersuchungen festzulegen. Diese Daten stammen von der Holzforschung München und VTT Technical Research Centre of Finland. Am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen wurden in Zusammenarbeit mit der Holzforschung München und VTT Technical Research Centre of Finland anhand dieser Daten geeignete Sortierverfahren entwickelt. Es wurden dann Brettschichtholzträger aus Brettern dieser Sortierungen modellhaft nachgebildet sowie berechnet. Die Ergebnisse beschreiben den Einfluss der Festigkeit der Bretter und der Keilzinken auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholz. Sie bilden damit die zahlenmäßige Grundlage für die Herleitung der alternativen Modelle für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit.

## 2 Ausgangssituation – Anstoß zu der Arbeit

Für das Forschungsvorhaben „Optimierung der Bemessung von Brettschichtholz mit maschinell sortierten Lamellen“ (Blaß und Schmid 2005) wurden im Jahr 2005 28 Brettschichtholz-Träger in Biegeversuchen geprüft. Die Träger können den Festigkeitsklassen GL32c und GL36c zugeordnet werden. Da die Biegefestigkeit der Träger die Anforderungen an die charakteristischen Werte der beiden Festigkeitsklassen bei weitem nicht erfüllte, wurden ein Jahr später 10 weitere Träger in Biegeversuchen geprüft. Diese Träger entsprachen dem Nennwert nach den Festigkeitsklassen GL32c und GL36c. Auch die Ergebnisse dieser ergänzenden Versuche zeigten, dass die geforderten charakteristischen Festigkeitswerte nicht erreicht werden.

Alle 38 Träger bestanden aus Brettern, die mit einer Biegemaschine und einem Röntgenscanner festigkeitssortiert wurden. Die Träger hatten eine Höhe von 600 mm und eine Breite von 100 mm. Die Versuche wurden nach EN 408 mit einer Stützweite, die der 15fachen Höhe entsprach, und mit einem querkräftfreien Bereich, der der 6fachen Höhe entsprach, durchgeführt.

### 2.1 Biegeversuche für das Forschungsvorhaben Blaß und Schmid 2005

In Bild A-1 ist der Aufbau der kombinierten Träger der Reihen 1 bis 4 dargestellt. Die Bezeichnung „plus“ im Bild A-1 bedeutet, dass die Abweichung vom Randlamellenanteil  $h/6$  in den Reihen 2 und 4 durch eine höhere charakteristische Brettzugfestigkeit ausgeglichen werden sollte. Diese wurde durch einen höheren Grenzwert für den maschinellen Sortierparameter erreicht. Tabelle A-1 und A-2 enthalten die Statistik der Biegefestigkeit bzw. des Biege-Elastizitätsmoduls. Bild A-3 zeigt die Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul getrennt nach Klasse. Die Diskussion dieser Ergebnisse folgt später im Abschnitt 2.3 zusammen mit denjenigen aus Abschnitt 2.2.

Begleitend wurden 36 Keilzinkenprüfkörper aus Brettern der Sortierklasse MS13 (= C35 und C35+) sowie 44 Prüfkörper aus Brettern der Sortierklasse MS17 (= C40 und C40+) hergestellt und geprüft. In Bild A-11 ist die Verteilung und die Statistik der Keilzinken-Biegefestigkeit dargestellt. Sie beträgt bei Brettern der Sortierklasse MS13  $44,7 \text{ N/mm}^2$  und bei Brettern der Sortierklasse MS17  $41,0 \text{ N/mm}^2$ .

### 2.2 Ergänzende Biegeversuche

Bild A-2 zeigt den Aufbau der kombinierten Träger der Reihen 5 und 6. Tabelle A-3 und A-4 enthalten die Statistik der Biegefestigkeit bzw. des Biege-Elastizitätsmoduls. Bild A-4 zeigt die Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul getrennt nach Klasse.

Zur Überprüfung des auffällig hohen Biege-Elastizitätsmoduls in der Klasse GL36c wurden nach dem Versuch die ersten drei Lamellen der Zugzone als Paket abgetrennt (s. Bild A-7) und der dynamische Elastizitätsmodul der Pakete bestimmt. Tabelle A-5 enthält die Rohdichte und den dynamischen Elastizitätsmodul dieser Pa-

kete. Mit den Werten lassen sich die Biege-Elastizitätsmoduln (15800 – 17200 N/mm<sup>2</sup>) in der Klasse GL36c zweifelsfrei erklären. In Tabelle A-6 sind die Biegefestigkeit und die Beobachtungen an der Bruchstelle der 10 Träger aufgeführt. Bild A-8 bis Bild A-10 zeigen dazu ausgewählte Aufnahmen an der Bruchstelle.

Begleitend wurden jeweils 20 Keilzinkenprüfkörper aus Brettern der Sortierklassen MS10 (=C24), MS13 (=C35) und MS17 (=C40) hergestellt. In Bild A-12 und Bild A-13 sind die Verteilung und die Statistik der Keilzinken-Biegefestigkeit und der Rohdichte dargestellt. Die einschlägigen Anforderungen an die charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit und die charakteristische Rohdichte werden erfüllt.

### 2.3 Konsequenzen

Bild 2-1 zeigt die Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul für alle 38 Versuche. Die unterschiedlichen Symbole stehen für die Klassen GL32c, GL32c-plus, GL36c und GL36c-plus. Für die Darstellung der Verteilungen der Biegefestigkeit in Bild A-5 werden die Versuche aus den Abschnitten 2.1 und 2.2 gemeinsam ausgewertet. Dabei werden die Klassen GL32c-plus wie GL32c und GL36c-plus wie GL36c behandelt. Die angepassten Normalverteilungen zeigen, dass die charakteristische Biegefestigkeit in der Klasse GL32c 27,1 N/mm<sup>2</sup> und in der Klasse GL36c 27,6 N/mm<sup>2</sup> beträgt. Bild A-6 zeigt die Verteilungen des Biege-Elastizitätsmoduls für beide Festigkeitsklassen. Mit 13.000 N/mm<sup>2</sup> in der Klasse GL32c wird der in DIN 1052 geforderte Mittelwert Wert von 13.700 N/mm<sup>2</sup> zu 95% erreicht und mit 15.400 N/mm<sup>2</sup> in der Klasse GL36c um 5% überschritten.

Obwohl der Unterschied von 9% ( $32,9 / 36,3 = 0,91$ ) zwischen der mittleren Biegefestigkeit der Klassen GL32c und GL36c statistisch signifikant ist, kann aufgrund des wenig ausgeprägten Unterschieds auf dem Niveau der charakteristischen Werte in Bild 2-2 die Verteilung der Biegefestigkeit aller 38 Werte dargestellt werden.

Demnach beträgt das verteilungsfrei ermittelte 5%-Quantil 27,2 N/mm<sup>2</sup> und das 5%-Quantil der angepassten Normalverteilung 26,8 N/mm<sup>2</sup>. Die 95%- (99%-) Vertrauensgrenzen für das verteilungsfreie 5%-Quantil sind unter der Annahme normalverteilter Daten 24,0 (22,9) N/mm<sup>2</sup> und 28,8 (29,4) N/mm<sup>2</sup>. Daher ist der im Vergleich mit 32 N/mm<sup>2</sup> bzw. 36 N/mm<sup>2</sup> niedrige charakteristische Wert nicht auf eine zu kleine Stichprobe zurückzuführen. Gegen eine außergewöhnlich ungünstige Entnahme der Träger-Stichproben bezüglich Trägerqualität spricht:

- Die Träger der Festigkeitsklasse GL36 besitzen durchweg sehr hohe Biege-Elastizitätsmoduln. Alle Werte dieser Klasse liegen über 14400 N/mm<sup>2</sup> (Bild 2-1).
- Die Biege-Elastizitätsmoduln der Träger der Klasse GL32 einerseits und der Klasse GL36 andererseits sind auffällig scharf voneinander getrennt (Bild 2-1).
- Die charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeiten entsprechen weitgehend den einschlägigen Anforderungen (Bild A-11 und Bild A-12).

Diese drei Beobachtungen belegen auch, dass die maschinelle Festigkeitssortierung der Bretter nach dem Elastizitätsmodul wirksam war. Damit bleibt die Frage zunächst



noch offen, warum die erforderlichen charakteristischen Festigkeitswerte der Brett-schichtholzträger nicht erreicht wurden. Die zweite in der Einleitung genannte Rich-tung, außergewöhnliche Stichprobe, kann jedoch als Grund für die niedrigen Festig-keitswerte mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

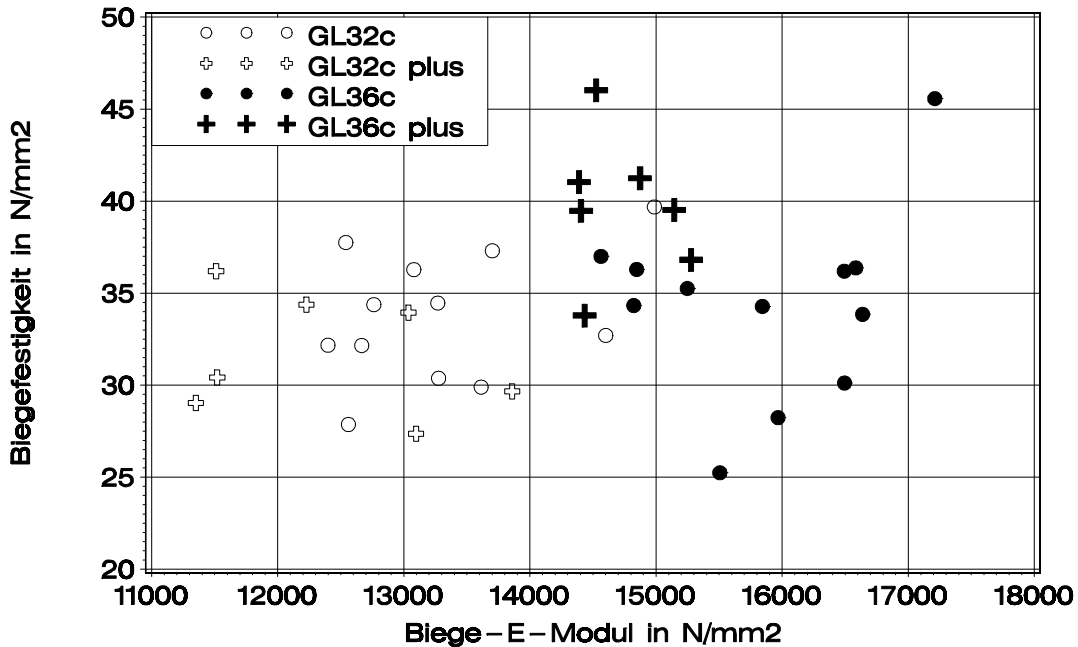


Bild 2-1 Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul; alle Reihen

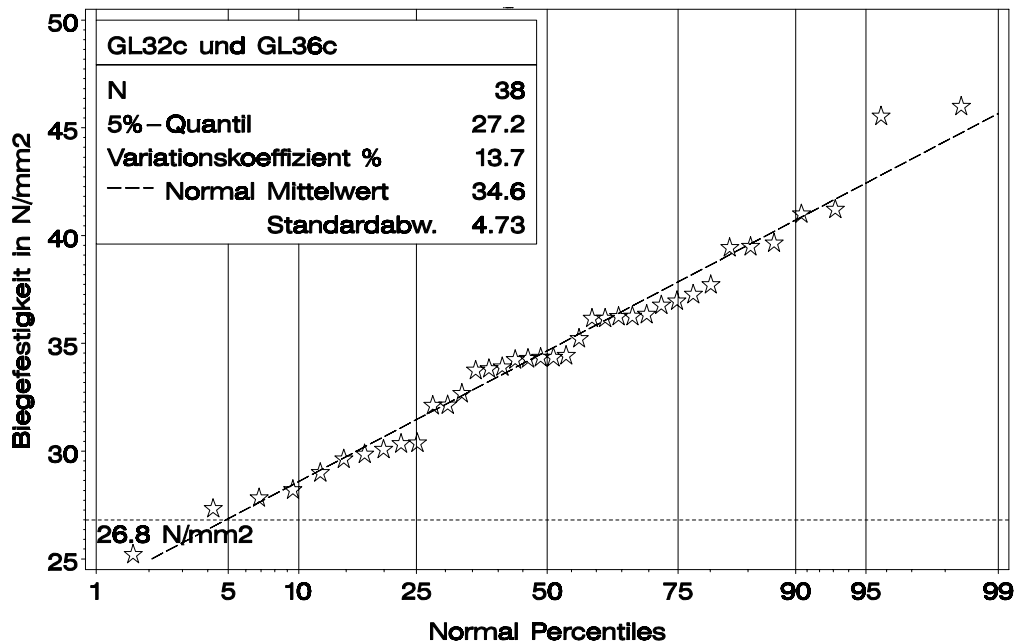


Bild 2-2 Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung der Biegefestig-keit; alle Reihen; Der Wert links unterhalb der horizontalen Hilfslinie ent-spricht dem 5%-Quantil der angepassten Normalverteilung.

## 2.4 Rückblick – das Modell von Colling

Colling 1995 veröffentlichte die in Bild 2-3 dargestellte Beziehung zwischen der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit und der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit sowie der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit. Anhand der Kurven ergeben sich mit den Anforderungen in EN 1194 bzw. DIN 1052 an Bretter und an Keilzinken die charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeiten in Tabelle 2-1, letzte Spalte. Sie stehen im Widerspruch zu den für die vier Brettschichtholz-Festigkeitsklassen erforderlichen charakteristischen Werten. Nach Collings Modell wird mit den gegenwärtigen Anforderungen an Bretter und an Keilzinken keiner dieser Werte erreicht. Bezüglich der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit belegt das – aus wissenschaftlicher Sicht – unzureichende Festlegungen und bestärkt die Notwendigkeit ihrer Überprüfung.

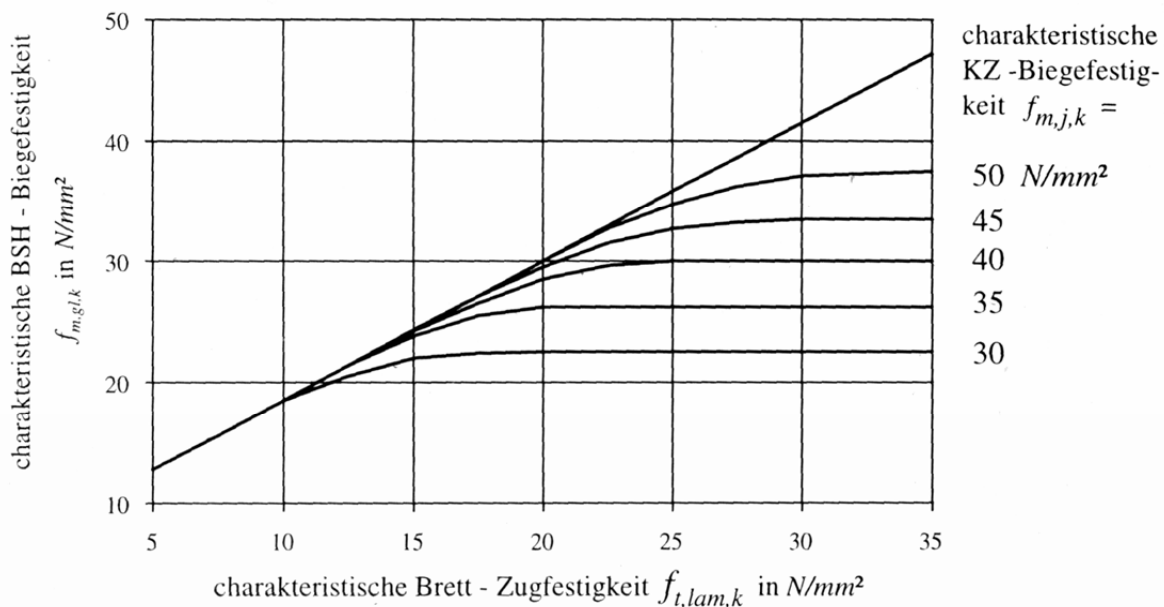


Bild 2-3 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit und charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit (entnommen aus Colling 1995)

Tabelle 2-1 Auswertung des Modells von Colling

Festigkeitsklasse Brettschichtholz	Festigkeitsklasse Lamellen	$f_{t,l,k}$ EN 1194 $N/mm^2$	$f_{m,j,k}$ DIN 1052 $N/mm^2$	$f_{m,g,k}$ nach Bild 2-3 $N/mm^2$
GL24h	C24	14,5	30	21,8
GL28h	C30	18	35	25,7
GL32h	C35	22	40	29,3
GL36h	C40	26	45	32,9

### 3 Simulation der charakteristischen Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Nadelholz

#### 3.1 Hintergrund und Vorgehensweise

Zwischen der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit und der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit sowie der charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit besteht bekanntermaßen ein enger funktionaler Zusammenhang: Es kann bei verfeinerten nichtlinearen Modellansätzen ein Bestimmtheitsmaß von über 0,90 erreicht werden. Gleichung (1) zeigt den Zusammenhang zunächst in allgemeiner Form.

$$f_{m,g,k} = f(f_{t,\ell,k}, f_{t,j,k}) \quad (1)$$

Um diesen zu bestimmen, wird ein Rechenmodell eingesetzt, mit dem Brettschichtholzträger und Biegeversuche gemäß EN 408 modellhaft nachgebildet werden. Die Bretter der Träger für die simulierten Versuche sind das Ergebnis unterschiedlicher Sortierverfahren.

In Abschnitt 3.2 werden Sortierverfahren für Brettschichtholz-Lamellen beschrieben, die anhand computergestützter Sortierung an wirklichem Brettmaterial von der Holzforchung München und VTT Technical Research Centre of Finland entwickelt wurden. Aus diesen Verfahren wird eine geeignete Auswahl getroffen, die dem Rechenmodell bei der Simulation der Biegeversuche jeweils zugrunde gelegt wird. Das Rechenmodell wird in Abschnitt 3.3 beschrieben. Seine Funktionsweise und die Ergebnisse, die es liefert, erläutert ein Beispiel in Abschnitt 3.4. Die Ergebnisse der simulierten Biegeversuche, bei denen die ausgewählten Sortierverfahren berücksichtigt wurden, werden in Abschnitt 3.5 dargestellt. Mit diesen Simulationsergebnissen werden etliche Datensätze zusammengestellt, in denen die Werte der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit von den Sortierverfahren und von einer variablen charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit, die in den Simulationen schrittweise angehoben wurde, abhängen. Jedem Sortierverfahren wird dann eine konkrete charakteristische Brett-Zugfestigkeit, ermittelt nach EN 408, zugewiesen, die aus der Untersuchung der Sortierverfahren bekannt ist.

In Abschnitt 4 wird schließlich der funktionale Zusammenhang in Gleichung (1) mit einer Regressionsanalyse spezifiziert, indem die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit als Reaktionsvariable und die charakteristische Brett-Zugfestigkeit sowie die charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit als erklärende Variable modelliert werden.

## 3.2 Untersuchte Sortierverfahren

### 3.2.1 Allgemeines

Bedeutsam für diese Forschungsarbeit ist, dass die untersuchten Sortierverfahren auf Brettdaten der Holzforschung München und dem VTT Technical Research Centre of Finland beruhen. Damit fließen Informationen – in erster Linie über Ästigkeit und Rohdichte – vor allem von Fichtenbrettern aus zwei völlig unterschiedlichen Wuchsgebieten, Mitteleuropa und Skandinavien, in diese Untersuchung ein. Diese beiden Datenmengen werden bei der Modellierung der charakteristischen Biegefestigkeit getrennt voneinander behandelt, wodurch die Objektivität der Forschungsarbeit bezüglich der Modellierung der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit gesteigert wird.

### 3.2.2 Datenbasis Holzforschung München

Als Grundlage für die Sortierverfahren stehen an der Holzforschung München 3199 Datensätze von Fichtenlamellen zur Verfügung. Die Brettlamellen weisen eine Dicke zwischen 19 mm und 49 mm und eine Breite zwischen 57 mm und 260 mm auf. Bild 3-1 zeigt eine Übersicht über die Querschnittsmaße und über die Anzahl der verfügbaren Proben.

An jeder Fichtenlamelle wurden die in Tabelle 3-1 aufgeführten Holzeigenschaften erfasst und in der Datenbank der Holzforschung München gespeichert. Die Holzfeuchte der 3199 Prüfkörper liegt zwischen  $u = 7\%$  und  $u = 15\%$  mit einem Mittelwert von  $u = 11\%$  und einer Standardabweichung von  $u = 1,3\%$ . Bei den weiteren Untersuchungen wird keine Holzfeuchtekorrektur bei Festigkeit und Eigenfrequenz durchgeführt.

Mit der erfassten Ästigkeit, der Jahrringbreite und dem Kriterium Markröhre können die Bretter und Bohlen visuell nach DIN 4074-1 in die Sortierklassen S13, S10 und S7 sortiert werden. Mit Hilfe der Ästigkeit (KAR-Wert) kann zusammen mit der Rohdichte eine maschinelle Sortierung auf Röntgenbasis simuliert werden. Darüber hinaus kann aus Eigenfrequenz, Brutto-Rohdichte und Länge der dynamische E-Modul errechnet werden. Mit dem dynamischen E-Modul, KAR-Wert und Rohdichte kann eine Sortiermaschine mit Röntgenzeile und Frequenzmessung simuliert werden. Da nicht für alle 3199 Prüfkörper die Eigenfrequenz gemessen wurde, reduziert sich bei dieser Sortierung die Anzahl der Datensätze auf 2531 Prüfkörper.

Bild 3-2 bis Bild 3-4 zeigen jeweils die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Ästigkeit KAR-Wert, der Darrrohichte und dem dynamischen E-Modul.

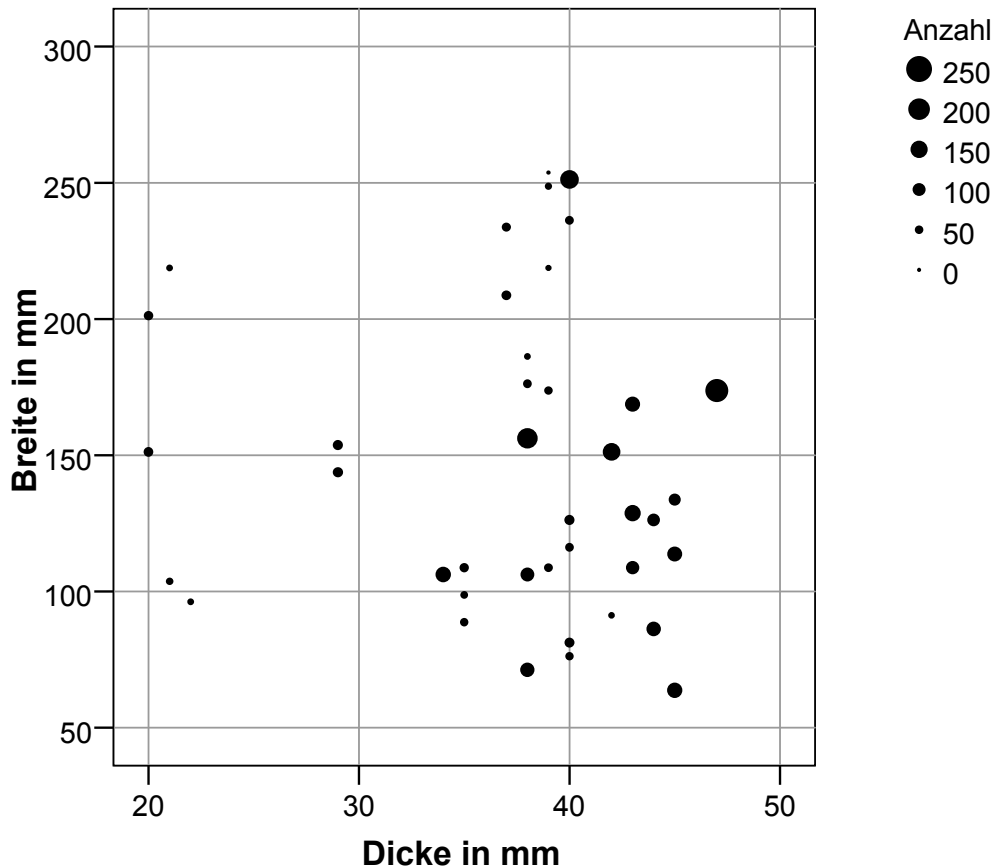


Bild 3-1 Querschnitte und zugehörige Anzahl der verfügbaren Prüfkörper

Tabelle 3-1 Eigenschaften der Lamellen

Abmessungen	Dicke/Breite/Länge
Ästigkeit	DIN 4074-1, Einzellast Brett (DEB) DIN 4074-1, Astansammlung Brett (DAB) "total KAR" (KAR-Wert)
Eigenfrequenz	Natürliche Frequenz einer Stablängsschwingung
Rohdichte	Brutto-Rohdichte: berechnet aus Masse und Volumen bei Holzfeuchte u Darrrohndichte: gemessen an ast- und fehlerfreiem Probestreifen bei Holz- feuchte u = 0%
Mittlere Jahrringbreite	DIN 4074-1
Markröhre	DIN 4074-1
Holzfeuchte	EN 408
Elastizitätsmodul	dynamischer E-Modul, aus Längsschwingungen ermittelt statischer Zug-E-Modul gemäß EN 408 (Verformungen über den kritischen Querschnitt bestimmt)
Zugfestigkeit	EN 408 (Festigkeit über den kritischen Querschnitt be- stimmt)

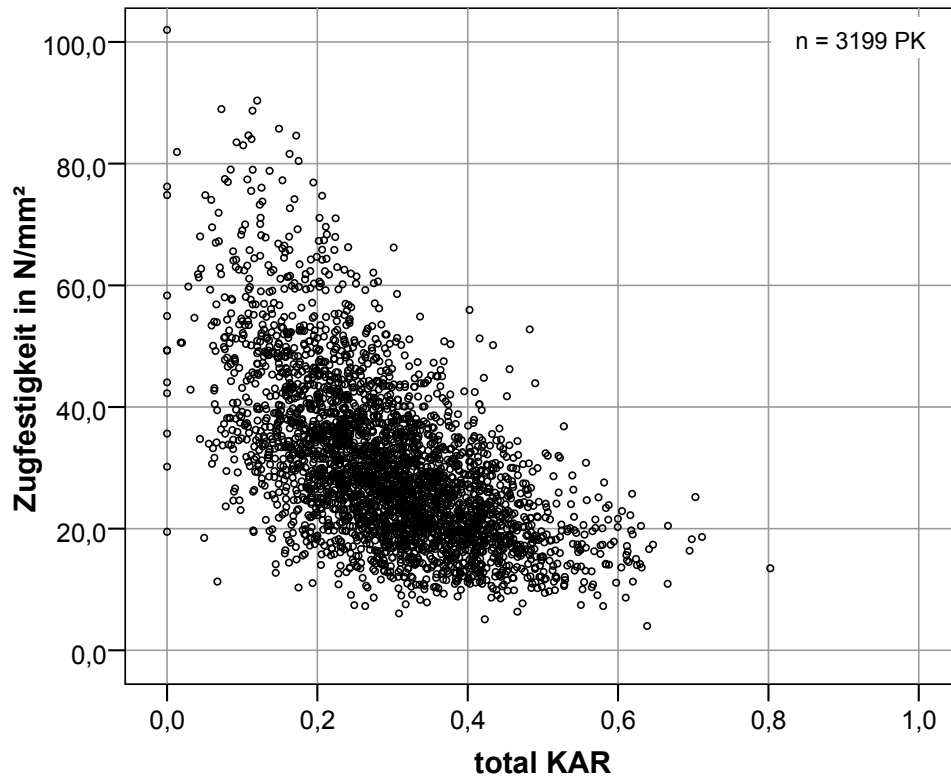


Bild 3-2 Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Ästigkeit KAR-Wert,  $n = 3199$

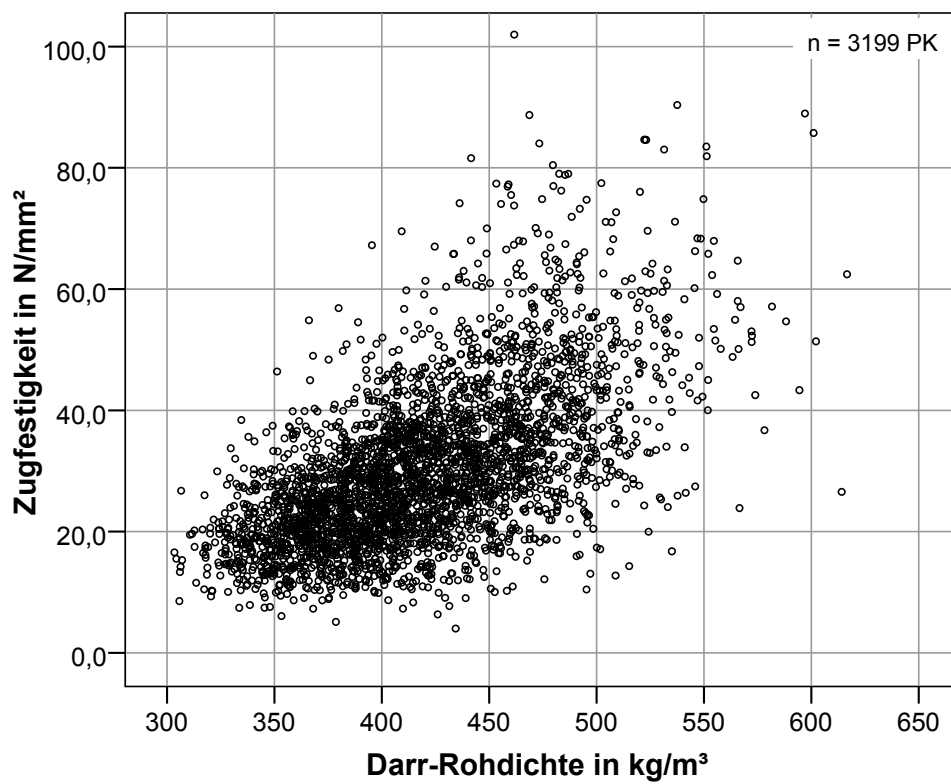


Bild 3-3 Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Darrrohddichte,  $n = 3199$

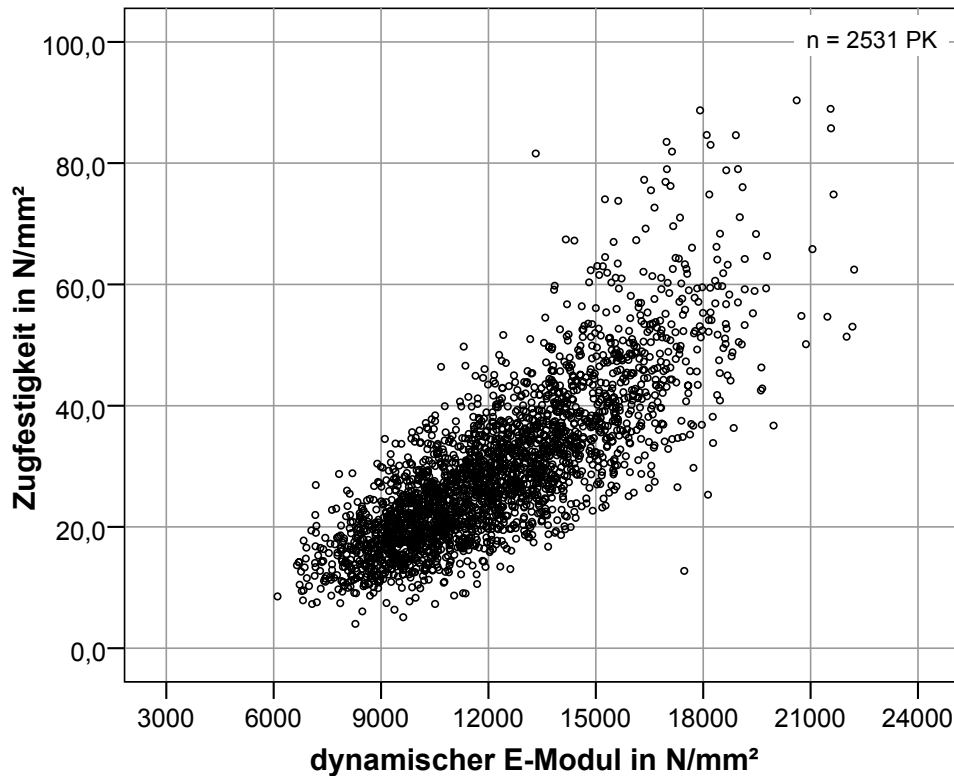


Bild 3-4 Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul,  $n = 2531$

Die Holzforschung München entwickelte verschiedene Sortierverfahren mit dem Ziel, diese bei der Simulation des Brettmaterials für Biegeversuche mit dem Rechenmodell künstlich zu reproduzieren. Wirklichkeitsnähe und Praxisrelevanz erforderten dabei, dass eine möglichst hohe Lamellenzugfestigkeit bei gleichzeitig hoher Ausbeute anzustreben war.

Darüber hinaus sind die in den Brett-schichtholz herstellenden Betrieben zur Verfügung stehenden Verfahren zur Festigkeitssortierung zu beachten. Neben der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 werden verschiedene maschinelle Sortierverfahren (Rohdichte und Äste, dynamischer E-Modul und Äste, Durchbiegungs-E-Modul und Äste) eingesetzt. Mit Hilfe der im Labor erfassten Daten werden unterschiedliche Sortierverfahren mit unterschiedlichen Sortierklassenkombinationen entwickelt und die sich dabei ergebenden Zugfestigkeiten sowie die Ausbeuten berechnet.

Dazu werden die zur Sortierung verwendeten Parameter in jeweils drei Klassen eingeteilt und alle möglichen Kombinationen sowie deren Zugfestigkeit und Ausbeute berechnet. Die Grenzwerte der Ästigkeit liegen bei 0,5, 0,35 und 0,2, die der Rohdichte bei  $450 \text{ kg/m}^3$ ,  $475 \text{ kg/m}^3$  und  $500 \text{ kg/m}^3$  und die des statischen E-Moduls bei  $14.000 \text{ N/mm}^2$ ,  $15.000 \text{ N/mm}^2$  und  $16.000 \text{ N/mm}^2$ . Tabelle 3-2 zeigt die Grenzwertkombinationen der Verfahren sowie die resultierenden charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten und prozentualen Ausbeuten. In Bild 3-5 bis Bild 3-10 sind die charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten und prozentualen Ausbeuten grafisch dargestellt.

Tabelle 3-2 Sortierverfahren mit zugehörigen Grenzwertkombinationen; Datenbasis Holzforschung München

Bez.	Verfahren	KAR	$\rho_0$ kg/m <sup>3</sup>	$E_{\text{stat}}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{\text{dyn}}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,\ell,k}$ N/mm <sup>2</sup>	n %
VIS-1*	visuell: S10	-	-	-	-	13,3	52,8
VIS-2*	visuell: S10+S13	-	-	-	-	14,4	78,6
VIS-3*	visuell: S13	-	-	-	-	21,3	25,8
RHO-1	Rohdichte + Äste	0,50	450	-	-	20,1	26,9
RHO-2		0,50	475	-	-	22,9	14,7
RHO-3		0,50	500	-	-	24,7	6,3
RHO-4*		0,35	450	-	-	23,4	22,7
RHO-5*		0,35	475	-	-	24,6	12,8
RHO-6		0,35	500	-	-	25,3	5,6
RHO-7		0,20	450	-	-	26,8	9,9
RHO-8		0,20	475	-	-	27,6	6,4
RHO-9		0,20	500	-	-	29,7	3,0
EDYN-1*	dyn. E-Modul + Äste	0,50	-	-	14000	26,7	24,2
EDYN-2*		0,50	-	-	15000	29,0	16,4
EDYN-3*		0,50	-	-	16000	33,0	9,8
EDYN-4*		0,20	-	-	16000	34,6	5,0
E-1*	statischer E- Modul + Äste	0,50	-	14000	-	29,9	19,0
E-2*		0,50	-	15000	-	32,2	12,1
E-3*		0,50	-	16000	-	35,2	7,5
E-4		0,35	-	14000	-	30,0	18,1
E-5		0,35	-	15000	-	31,7	11,8
E-6		0,35	-	16000	-	35,1	7,4
E-7		0,20	-	14000	-	31,4	9,6
E-8		0,20	-	15000	-	34,0	6,9
E-9*		0,20	-	16000	-	36,5	4,8
ERHO-1	statischer E- Modul + Äste + Rohdichte	0,50	450	15000	-	33,4	10,9
ERHO-2		0,50	475	15000	-	33,9	8,0
ERHO-3		0,50	500	15000	-	32,8	4,2
ERHO-4		0,35	450	15000	-	33,4	10,6
ERHO-5		0,35	475	15000	-	33,9	7,8
ERHO-6		0,35	500	15000	-	31,9	4,1
ERHO-7		0,20	450	15000	-	34,8	6,2
ERHO-8		0,20	475	15000	-	35,0	4,4
ERHO-9		0,20	500	15000	-	36,4	2,4

Die mit \* gekennzeichneten Verfahren werden später mit dem Rechenmodell simuliert



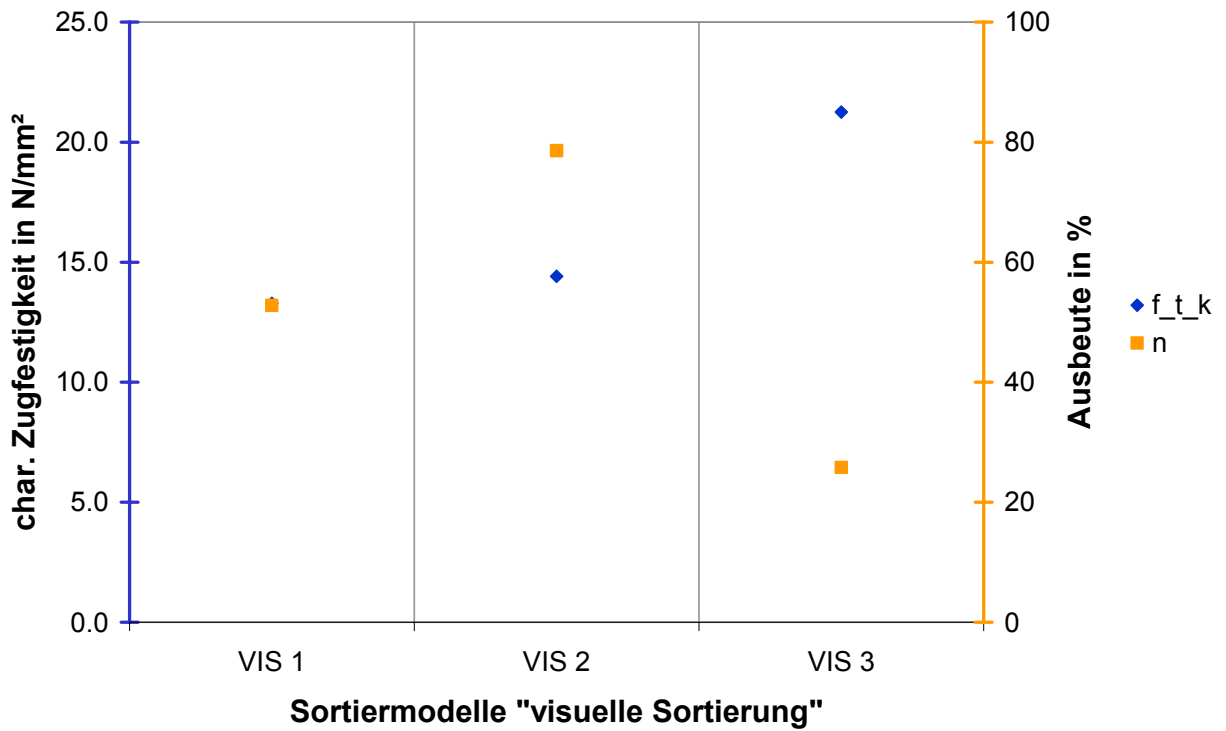


Bild 3-5 Charakteristische Zugfestigkeit und Ausbeute der Sortierverfahren "visuelle Sortierung"

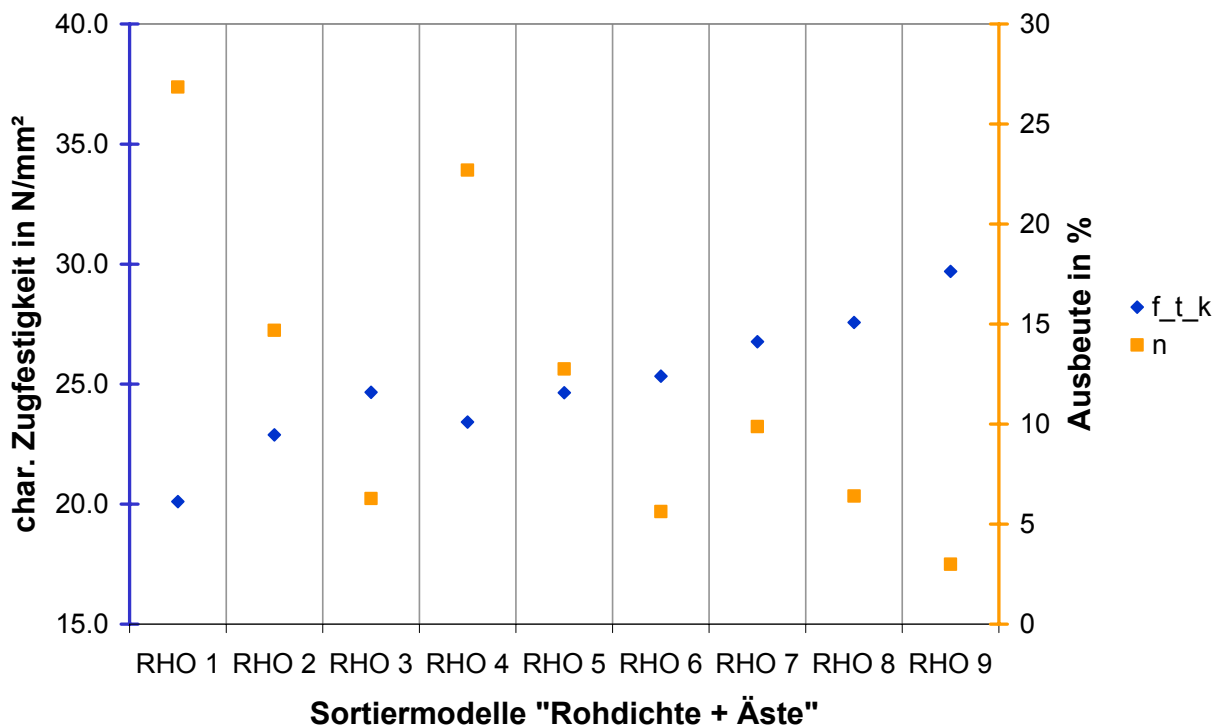


Bild 3-6 Charakteristische Zugfestigkeit und Ausbeute der Sortierverfahren "Rohdichte + Äste"

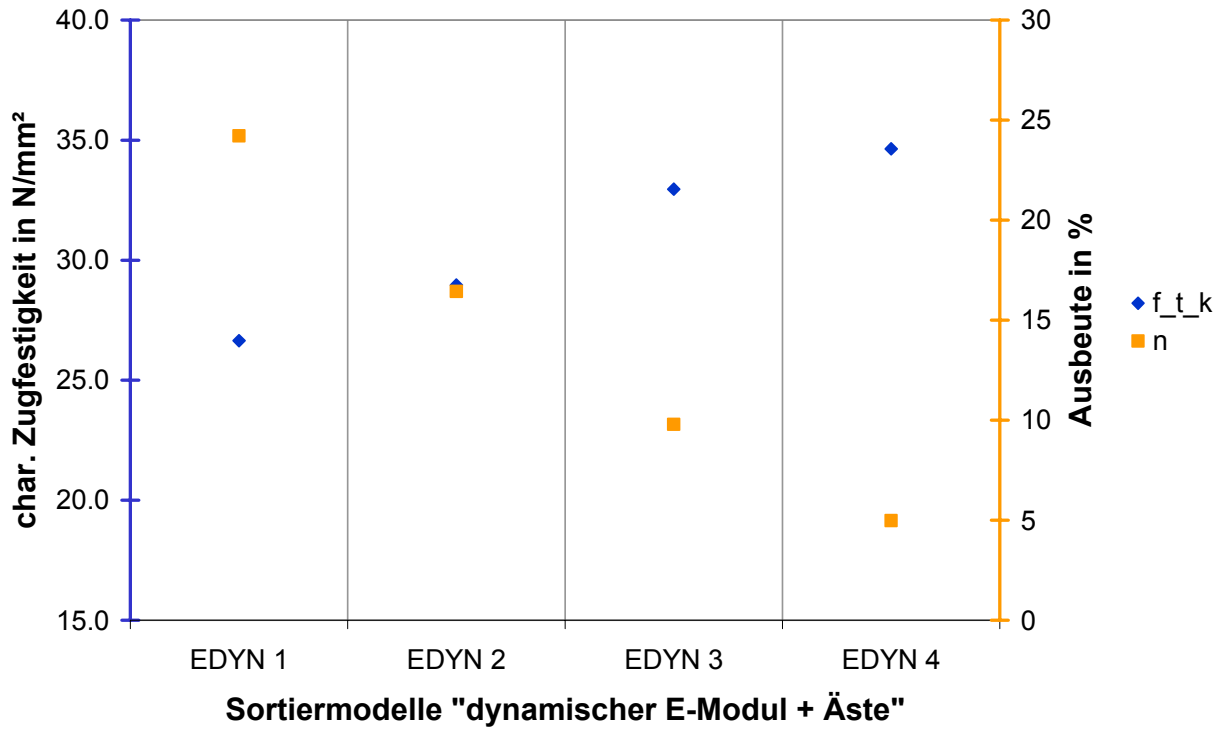


Bild 3-7 Charakteristische Zugfestigkeit und Ausbeute der Sortierverfahren "dynamischer E-Modul + Äste"

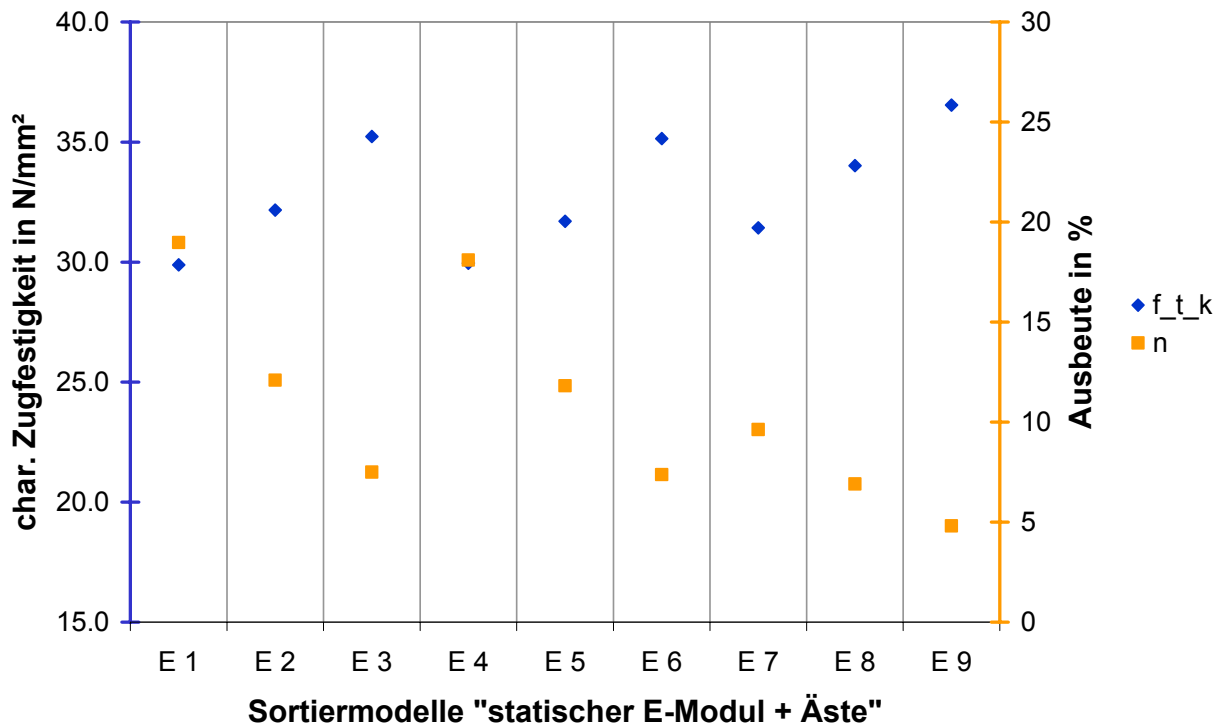


Bild 3-8 Charakteristische Zugfestigkeit und Ausbeute der Sortierverfahren "statischer E-Modul + Äste"

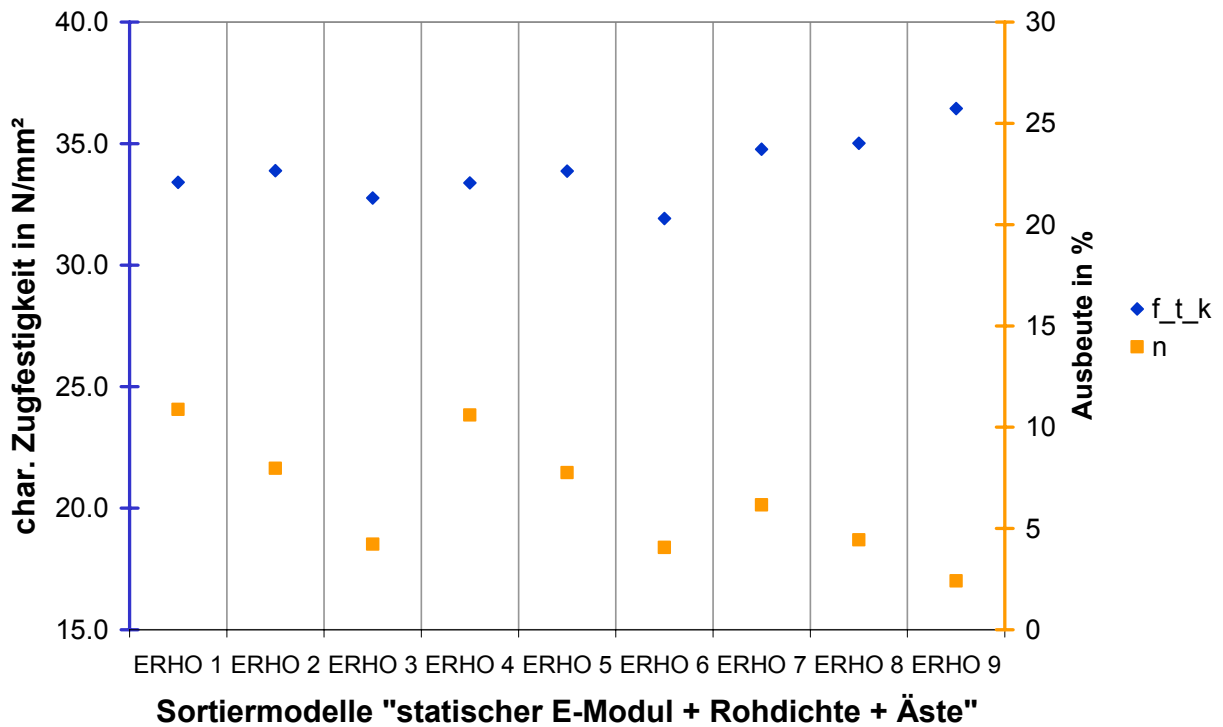


Bild 3-9 Charakteristische Zugfestigkeit und Ausbeute der Sortierverfahren "statischer E-Modul + Rohdichte + Äste"

Bei den Sortierverfahren "statischer E-Modul und Äste" werden schrittweise der statische E-Modul und der KAR-Wert eingeschränkt. Diese Sortierverfahren sind idealisiert und bilden keine existierenden Sortiermaschinen ab. Die charakteristische Brett-Zugfestigkeit wird durch die Begrenzung des statischen E-Moduls signifikant erhöht, wobei die gleichzeitige Einschränkung des KAR-Wertes von 0,5 auf 0,35 keinen nennenswerten Einfluss hat. Erst bei einer Einschränkung des KAR-Wertes auf 0,2 wird die charakteristische Brett-Zugfestigkeit deutlich erhöht. Dabei sinkt die Ausbeute auf Werte zwischen 9,6% und 4,8%. Durch den vorherrschenden Einfluss des E-Moduls bei der Begrenzung auf 14.000  $N/mm^2$ , 15.000  $N/mm^2$  und 16.000  $N/mm^2$  erscheint es ausreichend, den KAR-Wert auf 0,5 zu begrenzen und auf diese Weise grobstilige Schnitthölzer auszuschließen. Die entsprechenden Sortierverfahren E-1 bis E-3 führen zu charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten von 29,9  $N/mm^2$  bis 35,2  $N/mm^2$ . Die prozentuale Ausbeute sinkt von 19% bei Modell E-1 auf 7,5% bei Modell E-3. Zusätzlich wird das Sortierverfahren E-9 weiter untersucht, weil bei diesem Verfahren mit 36,5  $N/mm^2$  die höchste charakteristische Brett-Zugfestigkeit erreicht wird.

Da neben Verfahren, die auf dem statischen E-Modul beruhen, vor allem solche, die auf dem dynamischen E-Modul beruhen, praxisrelevant sind, werden auch Auswertungen mit dem dynamischen E-Modul durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass der dynamische E-Modul etwa 5% höher ist als der statische. Dadurch haben die Verfahren auf Basis des dynamischen E-Moduls tendenziell geringere charakteristische Brett-Zugfestigkeiten bei höheren Ausbeuten als solche auf Basis des statischen E-

Moduls, wenn identische Klassengrenzen gewählt werden. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Bild 3-7 dargestellt.

Die Sortierverfahren "Rohdichte + Äste" entsprechen der Funktionsweise von Sortiermaschinen auf Röntgenbasis. Bei diesen Modellen hat sowohl die Begrenzung des KAR-Wertes als auch der Rohdichte signifikanten Einfluss auf die charakteristische Brett-Zugfestigkeit. Hierbei sind die Modelle RHO-4 und RHO-5 hervorzuheben, weil charakteristische Zugfestigkeiten von 23,4 N/mm<sup>2</sup> und 24,6 N/mm<sup>2</sup> bei prozentualen Ausbeuten von 22,7% und 12,8% erreicht werden.

Die Sortierverfahren, die eine Begrenzung des statischen E-Moduls, der Rohdichte sowie der Ästigkeit vorsehen, führen zu den höchsten charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten. Die Ausbeuten sind aber unwirtschaftlich, sodass keines der Verfahren weiter verfolgt wird.

Die visuellen Sortierverfahren nach DIN 4074-1 liefern tendenziell niedrigere charakteristische Brett-Zugfestigkeiten und höhere Ausbeuten als maschinelle Sortierverfahren. Die Sortierung in S13 (Modell VIS-3) zeigt, dass die geforderte charakteristische Brett-Zugfestigkeit von 18 N/mm<sup>2</sup> deutlich überschritten wird. Das vorliegende Kollektiv weist eine charakteristische Zugfestigkeit von 21,3 N/mm<sup>2</sup> auf.

Bild 3-10 zeigt die charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten über der Ausbeute für alle maschinellen Sortierverfahren. Es wird deutlich, dass Sortierungen, die den E-Modul als Sortierparameter erfassen, höhere charakteristische Brett-Zugfestigkeiten erreichen als solche auf Basis von Rohdichte und Ästen. Sortierverfahren die sowohl E-Modul als auch Äste und Rohdichte beinhalten, weisen eine geringere Streuung bei den Festigkeiten auf.

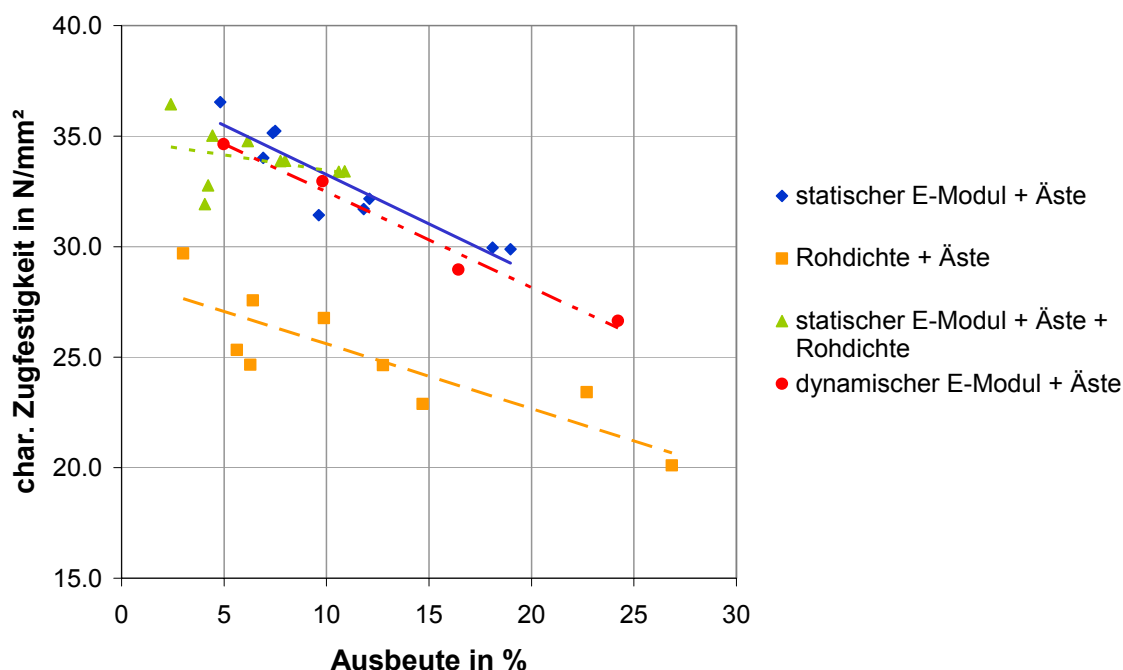


Bild 3-10 Charakteristische Zugfestigkeit über Ausbeute getrennt nach maschinellen Sortierverfahren

### 3.2.3 Datenbasis VTT Technical Research Centre of Finland

Die Sortierverfahren in Tabelle 3-3 beruhen auf Untersuchungen im Rahmen der Forschungsarbeiten Ranta-Maunus 2007 und Hanhijärvi et al. 2007. Die Grenzen für die Sortierkriterien sind teilweise Einstellungen für die Sortiermaschine Goldeneye 706 und teilweise Einstellungen für fingierte Sortiermaschinen. Im Unterschied zu den Sortierverfahren im vorangegangenen Abschnitt sind diese hier auf kombinierte Träger abgestimmt. Welche Verfahren für Rand- und welche für Kernlamellen eingesetzt werden, wird später in Abschnitt 3.5.3 bzw. Tabelle 3-5 festgelegt.

Tabelle 3-3 Sortierverfahren mit zugehörigen Grenzwertkombinationen; Datenbasis VTT Technical Research Centre of Finland

Bez.	Verfahren	KAR -	$E_{\text{dyn}}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,l,k}$ N/mm <sup>2</sup>
B2	dyn. E-Modul		9600	24,4
D2	Rohdichte + Äste		8760	22,3
D1	Rohdichte + Äste		9190	25,4
C1	Äste		9670	27,3
A1	dyn. E-Modul		13010	26,8
F22	kombinierte Verfahren		9700	23,2
G26	kombinierte Verfahren		12000	26,4
A1+	dyn. E-Modul + Äste	0,25	13013	28,4
G26+	kombinierte Verfahren	0,25	12000	27,5
X	dyn. E-Modul + Rohdichte + Äste	0,25	13000	28,8
B3	dyn. E-Modul		8500	22,3
D3	Rohdichte + Äste		7280	k. A.
C2	Äste		8510	22,6
A2	dyn. E-Modul		9540	23,1
G18	kombinierte Verfahren		9700	19,9

### 3.3 Das Rechenmodell

#### 3.3.1 Allgemeines

Es wird ein Rechenmodell verwendet, das ursprünglich für die Simulation von Biegeversuchen an Brettschichtholzträgern aus Buchenholz entwickelt wurde. Eine genaue Beschreibung des Rechenmodells findet sich in Frese 2006. Der Einsatz dieses Rechenmodells für die Simulation von Biegeversuchen an Brettschichtholzträgern aus Nadelholz machte für die vorliegende Forschungsarbeit folgende programmtechnische Änderungen notwendig:

- Einarbeitung der Regressionsbeziehungen für mechanische Eigenschaften von 150 mm langen Brett- und Keilzinkenelementen aus Nadelholz
- Berücksichtigung der Autokorrelation bezüglich der Zugfestigkeit und des Zug-Elastizitätsmoduls bei Nadelholz
- Einarbeitung eines Algorithmus zur wirklichkeitsnahen Simulation der Ästigkeit innerhalb von Brettern aus Nadelholz
- Eingabe theoretischer Verteilungsfunktionen der Darrrohdichte und der Ästigkeit zur wirklichkeitsnahen Simulation der untersuchten Sortierverfahren

Das allgemeine von der Holzart zunächst unabhängige Simulationsverfahren für Brettschichtholzträger und die Berechnung der Biegefestigkeit mit der Finite-Elemente-Methode wird in den folgenden Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 beschrieben. In den Abschnitten 3.3.4 bis 3.3.7 werden Grundlagen erläutert, die zur Simulation von mechanischen und strukturellen Eigenschaften von Nadelholz erforderlich waren. Diese Grundlagen wurden dem einschlägigen Schrifttum entnommen und stehen im Einklang mit dem seiner Zeit entwickelten Karlsruher Rechenmodell (KAREMO).

#### 3.3.2 Simulationsprogramm

Bei der Simulation eines Brettschichtholzträgers wird prinzipiell so vorgegangen wie bei seiner tatsächlichen Herstellung: Es wird eine Endloslamelle aus Brettern und Keilzinkenverbindungen erzeugt. Diese wird in gleich lange Stücke zerlegt und der Träger wird daraus aufgebaut.

Die mechanischen Eigenschaften der Endloslamelle werden alle 15 cm berechnet und sind innerhalb dieser Länge konstant. Damit ist der Diskretisierungsgrad festgelegt. Da kein Brett – bezüglich der mechanischen Eigenschaften – wie das andere ist, werden vor der Simulation dessen strukturelle Eigenschaften und das Maß der Streuung dieser Eigenschaften individuell festgelegt. Damit werden die Autokorrelationseffekte bei den mechanischen Eigenschaften angemessen berücksichtigt. Im Ergebnis werden dadurch Bretter erzeugt, die von hoher und von niedriger Qualität sind.

Durch die gezielte Vorgabe von Verteilungsfunktionen der strukturellen Eigenschaften, Verteilung der Äste und der Rohdichte, können wirklichkeitsnah praxisrelevante Sortierverfahren für Nadelholz durchgeführt werden. Es können homogene oder kombinierte Träger, s. Bild 3-11, simuliert werden. Kombinierte Träger werden in zwei Zonen unterteilt. Dabei werden mindestens zwei Randlamellen einer höheren Klasse in der Zone 1 vorgesehen.

Der dynamische Elastizitätsmodul ist eine Zielgröße. Er wird aus den abschnittsweise simulierten Steifigkeitseigenschaften eines Brettes berechnet. Für die maschinellen Sortierverfahren mit hohen Brett-Zugfestigkeiten ist er der führende maschinelle Sortierparameter. Seine Berechnung erfolgt nach den Gleichungen (2) und (3): Prinzip der Serienschaltung von Federn unterschiedlicher Steifigkeit und Berücksichtigung des Einflusses der dynamischen Messung mit 0,95 (vgl. hierzu Ehlbeck und Colling 1987, Görlacher 1990 sowie Blaß und Frese 2002).

$$E_{\text{stat}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i}} \quad (2)$$

$$E_{\text{stat}} \approx 0,95 \cdot E_{\text{dyn}} \quad (3)$$

Bei der Simulation einer maschinellen Sortierung auf der Basis des dynamischen Elastizitätsmoduls wird in Abhängigkeit vom gewünschten Sortierverfahren nach den Gleichungen (2) und (3) der Wert des dynamischen Elastizitätsmoduls jedes Brettes berechnet und mit dem vorgegebenen Grenzwert verglichen. Nur wenn der Wert oberhalb des Grenzwertes liegt, wird das Brett in den Brettschichtholzträger „übernommen“.

Bei der Berechnung der Keilzinken-Zugfestigkeit kann zusätzlich ein variabler Sollwert für das 5%-Quantil vorgegeben werden. Damit kann der Einfluss einer variablen charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit auf die Brettschichtholz-Biegefestigkeit, 5%-Quantil oder Mittelwert, zahlenmäßig dargestellt werden.

Alle mechanischen Eigenschaften der Bretter werden für die Finite-Elemente-Berechnung in einer zweidimensionalen Matrix gespeichert.

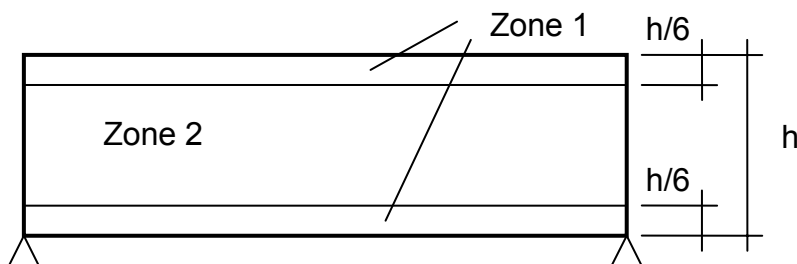


Bild 3-11 Aufbau eines kombinierten Trägers; hier Anteil der Randlamellen 1/6

### 3.3.3 Finite-Elemente-Programm

Die Berechnung der Tragfähigkeit und des Elastizitätsmoduls der simulierten Träger erfolgt mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS Version 11. Bild 3-12 zeigt das Berechnungsmodellmodell. Die Belastung der Trägerstruktur erfolgt über eine schrittweise aufgebrachte Verformungen  $\Delta u$ . Auf diese Weise ist es möglich, die unbekannte Traglast zu ermitteln. Diese wird erreicht, wenn in der unteren Randlamelle ein Riss modelliert wird. Die Verformung  $\Delta u$  wird in der Mitte einer Traverse aufgebracht. Es entstehen in den Pendelstäben jeweils gleich große Kräfte  $F$ . Auf diese Weise wird der Versuch nach EN 408 gleichwertig abgebildet.

Die Berechnung erfolgt für den ebenen Spannungszustand. Die rhombische Anisotropie des Holzes wird dabei vereinfachend durch orthotropes Materialverhalten erfasst. Nach dem Erreichen der Druckfestigkeit in einem Element der Druckzone bleibt bei weiter zunehmender Stauchung die Spannung konstant. Das entspricht ideal elastischem/ideal plastischem Materialverhalten in der Druckzone. Bis zum Erreichen der Zugfestigkeit verhält sich ein Element ideal elastisch. Mit dem Erreichen der Zugfestigkeit wird im Element ein Riss modelliert. Die Berechnung der Trägerstruktur wird abgebrochen, wenn in einem Element der Randlamelle innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,5\%$  die Zugfestigkeit erreicht wird. Vor diesem Zustand sind durchaus Risse in der Zugzone außerhalb der Randlamelle möglich.

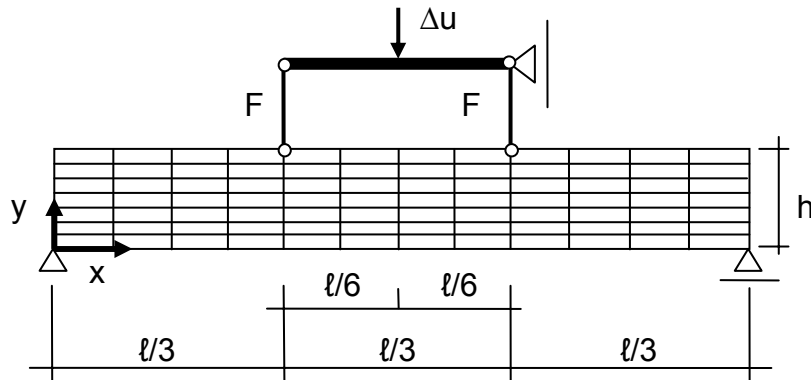


Bild 3-12 Finite-Elemente-Modell für die Berechnung der Brettschichtholzträger

### 3.3.4 Regressionsbeziehungen für mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften für Zug- und Druckbeanspruchung in Faserrichtung der Brett- und Keilzinkenelemente werden mit den Regressionsgleichungen (4) bis (11) von Glos bzw. von Ehlbeck et al. 1985 berechnet. Die erklärenden Variablen in den Gleichungen sind die Darrrohdichte und der KAR-Wert, der die Ästigkeit in einem Brettabschnitt zahlenmäßig beschreibt. Die Korrelation zwischen Elastizitätsmodul und Festigkeit wird – wo erforderlich – berücksichtigt, indem zunächst der Elastizitätsmodul und anschließend die Festigkeit eines Elements berechnet werden.



$$\ln(E_t) = 8,20 + 3,13 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 1,17 \cdot \text{KAR} \quad (4)$$

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

$$\ln(E_c) = 8,22 + 2,994 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 0,76 \cdot \text{KAR} \quad (5)$$

mit  $r = 0,80$  und  $s_R = 0,142$

$$\ln(E_{t,j}) = 8,407 + 2,630 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,\min} \quad (6)$$

mit  $r = 0,64$  und  $s_R = 0,135$

$$\ln(E_{c,j}) = 8,282 + 2,53 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,\min} \quad (7)$$

mit  $r = 0,56$  und  $s_R = 0,231$

$$\ln(f_t) = -4,22 + \ln(E_t) \cdot (0,876 - 0,093 \cdot \text{KAR}) \quad (8)$$

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

$$\ln(f_c) = 2,586 + 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 0,825 \cdot \text{KAR} \quad (9)$$

mit  $r = 0,94$  und  $s_R = 0,088$

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

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

$$\ln(f_{c,j}) = -3,05 + 0,66 \cdot \ln(E_{c,j}) + 9,85 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{0,\min} \quad (11)$$

mit  $r = 0,92$  und  $s_R = 0,116$

### 3.3.5 Autokorrelation

Die Autokorrelation, die aus statistischer Sicht eigentlich nur die Residuen der Regressionsanalyse betrifft, berücksichtigt Wuchsregelmäßigkeiten innerhalb der Bäume und Unterschiede von Baum zu Baum. Das wirkt sich bis auf die Bretter aus, die aus den einzelnen Stammabschnitten der Bäume hergestellt werden. Die Autokorrelation des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit, jeweils innerhalb eines Brettes, wird durch die von Colling 1990 bzw. von Görlacher 1990 verwendete Aufteilung der Gesamtstreuung der Residuen berücksichtigt. (Diese entspricht der angegebenen Standardabweichung der Residuen in den Regressionsgleichungen (4) bis (11).) Diese Aufteilung, und zwar in Reststreuung innerhalb des Brettes und verbleibende Reststreuung, sorgt dafür, dass im Rechenmodell wirklichkeitsnah Bretter von hoher und niedriger Qualität simuliert werden und dass innerhalb eines Brettes die mechanischen Eigenschaften stärker oder weniger streuen. Es folgt an späterer Stelle ein Streudiagramm, in dem diese Eigenart beispielhaft erläutert wird.

### 3.3.6 Simulation der Darrrohdichte

Die Häufigkeitsverteilungen und die empirischen Verteilungsfunktionen der mittleren Darrrohdichte sowie die angepassten Betaverteilungen für die Erzeugung von Zufallszahlen sind in Bild A-14 bis Bild A-26 jeweils für die untersuchten Sortierverfahren aus Abschnitt 3.2.2 dargestellt. Die Zufallszahlen für die mittlere Darrrohdichte für

Bretter der Sortierverfahren aus Abschnitt 3.2.3 werden ersatzweise mit den Normalverteilungen in Tabelle A-7 erzeugt. In diesem Fall lagen keine empirischen Verteilungsfunktionen für eine exakte Anpassung vor.

### 3.3.7 Simulation der Ästigkeit

Zur Simulation der Astabfolge im Brett wird das von Görlacher 1990 entwickelte Verfahren verwendet. Die Zufallszahlen für den Quotienten  $K_i$  werden abweichend von seinen Vorgaben mit der in Bild 3-13 dargestellten Betadichte erzeugt. Die Gründe dafür sind programmtechnisch. Der Quotient  $K_i$  wird benötigt, um ausgehend vom größten KAR-Wert (entspricht der größten Ästigkeit im Brett) die weiteren, kleineren KAR-Werte, die sich innerhalb eines Brettes befinden, zu bestimmen. Die Häufigkeitsverteilungen und die empirischen Verteilungsfunktionen des größten KAR-Wertes sowie die angepassten Beta-Verteilungen für die Erzeugung von Zufallszahlen sind in Bild A-14 bis Bild A-41 jeweils für die untersuchten Sortierverfahren aus Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 dargestellt.

Weitere Hinweise zu den Verteilungen der Darrrohdichte und der Ästigkeit finden sich im Anhang A 2 auf Seite 97.

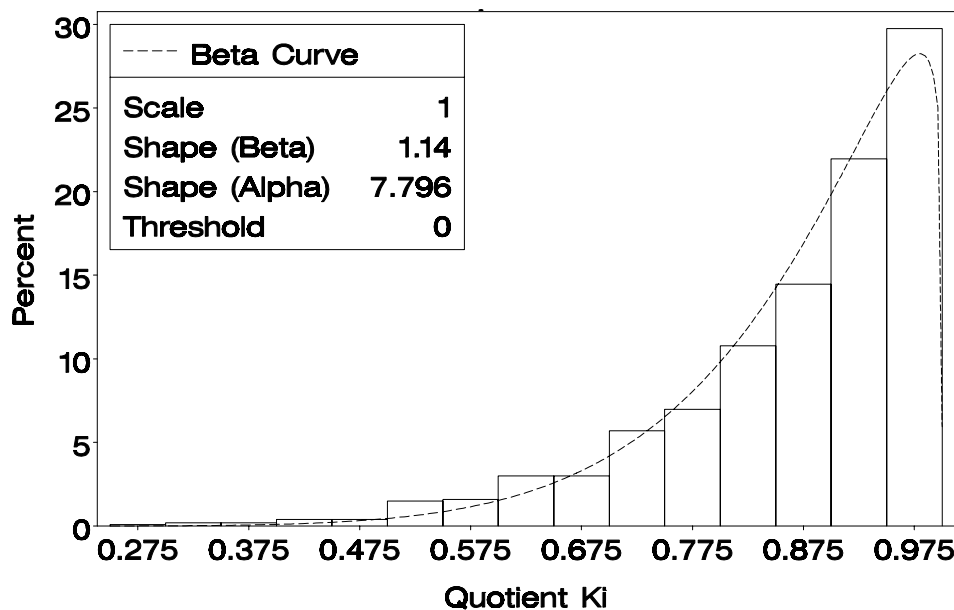


Bild 3-13 Häufigkeitsverteilung des Quotienten  $K_i$  aus der Ästigkeit zweier Brettelemente; Beta-Verteilung angepasst an die Häufigkeitsverteilung der  $K_i$  Werte nach Görlacher 1990

## 3.4 Beispiel für simulierte Biegeversuche

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise des Rechenmodells exemplarisch erläutert. Das Beispiel basiert auf dem Sortierverfahren EDYN-2. Nachfolgend werden die wichtigsten Eingaben aufgeführt und die Ergebnisse einer Studie mit insgesamt 900 simulierten Biegeversuchen dokumentiert. Zunächst wurden mechanische Eigen-

schaften von über 2300 Brettern simuliert, um zu überprüfen, dass das Rechenmodell mit dem eingegebenen Sortierverfahren EDYN-2 auch zutreffende strukturelle und mechanische Lamelleneigenschaften reproduziert. Für die Studie wurden für neun konstante charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeiten von 20 N/mm<sup>2</sup> bis 40 N/mm<sup>2</sup> in Schrittweiten zu 2,5 N/mm<sup>2</sup> jeweils 100 simulierte Biegeversuche durchgeführt. So lässt sich für das gewählte Sortierverfahren der Einfluss einer veränderlichen charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit auf die charakteristische Biegefestigkeit zahlenmäßig ermitteln.

### 3.4.1 Eingaben

Mit den folgenden Parametern wurde das Rechenmodell konfiguriert.

- Trägerlänge (entspricht der Stützweite): 10800 mm →  $10800/150 = 72$  Elemente in horizontaler Richtung
- Lamellendicke: 30 mm
- Trägerhöhe: 600 mm →  $600/30 = 20$  Elemente in vertikaler Richtung
- Homogener Aufbau
- Brettlänge aus N (4500;700) in mm
- Simulation des Sortierverfahrens EDYN-2; Die Parameter der Betaverteilung für die mittlere Darrrohdichte der Bretter bzw. für den größten KAR-Wert sind in Bild A-20 angegeben.
- Sicherheitsgrenze des größten KAR-Wertes: 0,50
- Anteil astfreie Bretter: 3/416 entspricht 0,7%
- Anteil astbehaftete Elemente je Brett: 1/3
- Kleinster dynamischer Elastizitätsmodul: 15000 N/mm<sup>2</sup>
- Istwert der simulierten charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit: 27 N/mm<sup>2</sup>

### 3.4.2 Ergebnisse

#### 3.4.2.1 Strukturelle Eigenschaften des simulierten Brettmaterials

In Bild 3-14 sind die Häufigkeitsverteilungen der mittleren Brett-Darrrohdichte und des größten KAR-Wertes von über 2300 simulierten Brettern dargestellt. In den Diagrammen sind auch die Dichtefunktionen der Betaverteilungen eingezeichnet, die an die strukturellen Eigenschaften des sortierten wirklichen Brettmaterials angepasst wurden (s. Bild A-20). Da die Dichtefunktionen mit den Häufigkeitsverteilungen übereinstimmen, werden die strukturellen Eigenschaften mit dem Rechenmodell zutreffend reproduziert. Im Häufigkeitsdiagramm für den größten KAR-Wert sind 23 Bretter weniger als im Häufigkeitsdiagramm für die mittlere Darrrohdichte ausgewertet. Daher besitzen 23 Bretter keine Äste und der Anteil astfreier Bretter beträgt damit 1%.

Das entspricht etwa dem vorgegebenen Anteil von 0,7%. In Bild 3-15 ist die Häufigkeitsverteilung aller KAR-Werte der 2311 astbehafteten Bretter dargestellt. Da 2311 Bretter aus  $2311 \cdot 4500\text{mm}/150\text{mm} = 69330$  Elementen mit 150 mm Länge bestehen, beträgt der Anteil astbehafteter Elemente erwartungsgemäß  $23011/69330 = 1/3$ .

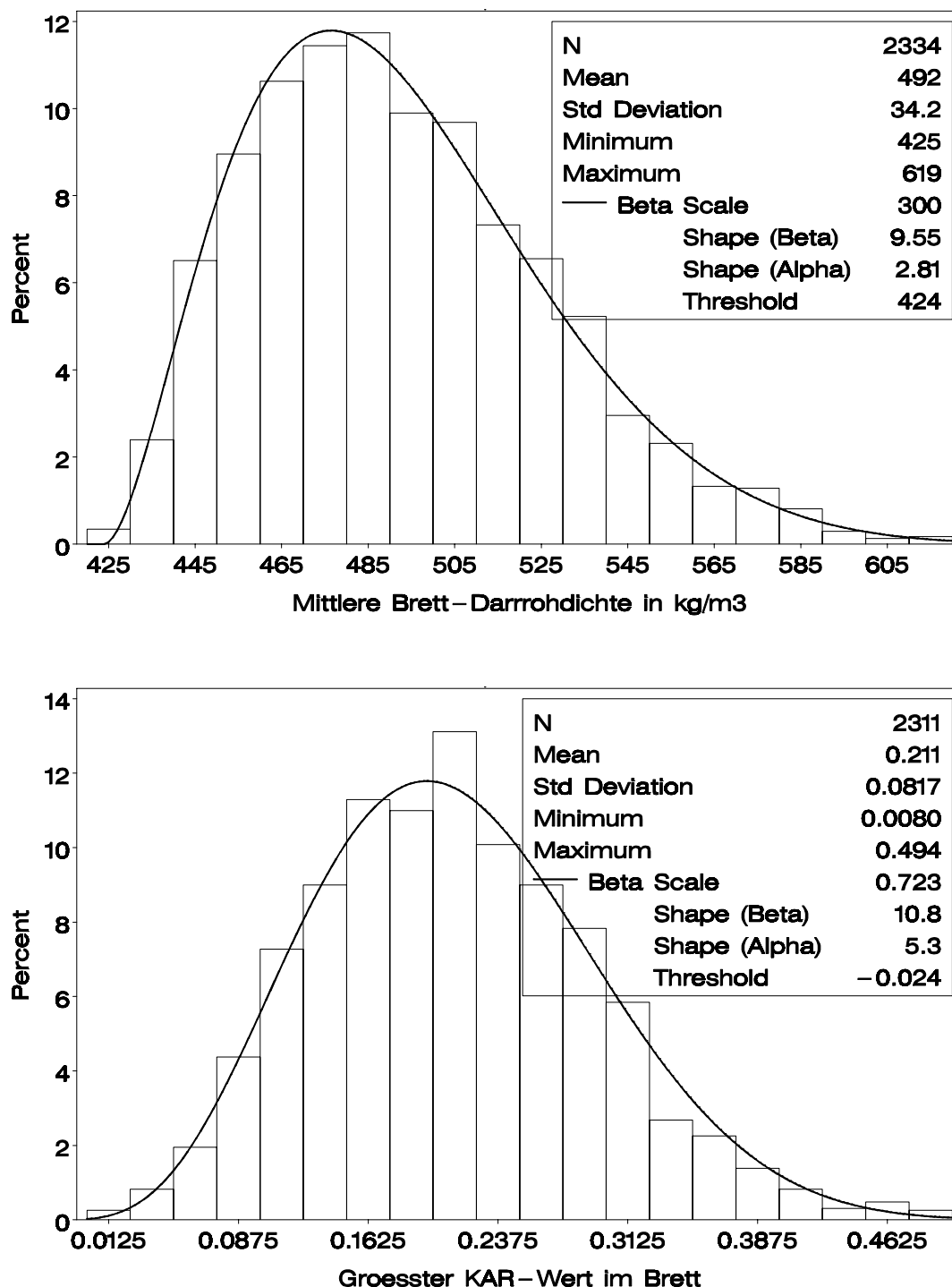


Bild 3-14 Häufigkeitsverteilung der reproduzierten mittleren Brett-Darrrohdichte (oben) und des größten KAR-Wertes im Brett (unten). In beiden Häufigkeitsdiagrammen sind die Dichtefunktionen der angepassten Betaverteilungen mit eingezeichnet und ihre Parameter zum Vergleich mit angegeben (s. Bild A-20).

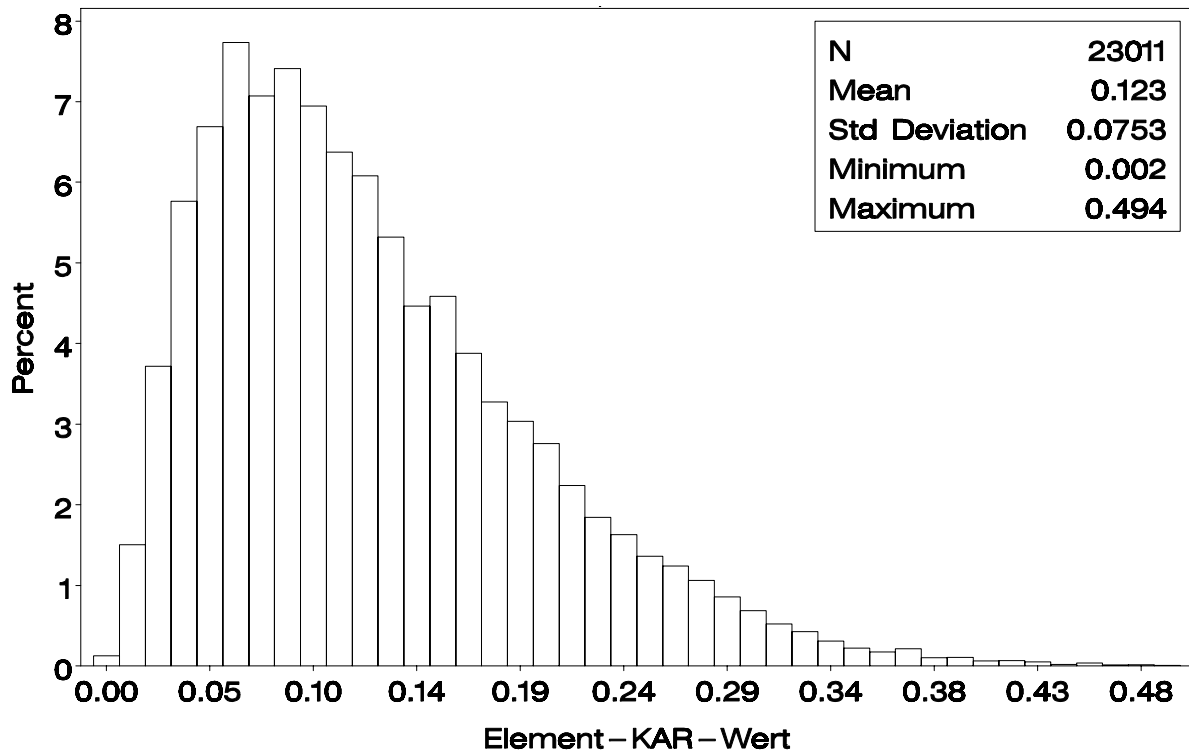


Bild 3-15 Häufigkeitsverteilung aller KAR-Werte in 2311 Brettern

#### 3.4.2.2 Mechanische Eigenschaften des simulierten Brettmaterials

In Bild A-48 ist oben links die Verteilung des simulierten mittleren Brett-Zug-Elastizitätsmoduls dargestellt, der mit Gleichungen (2) und (3) aus den einzelnen Elastizitätsmoduln der 150 mm langen Elemente eines Brettes berechnet wird. Der simulierte kleinste mittlere Brett-Zug-Elastizitätsmodul hat den Wert 14256 N/mm<sup>2</sup>. Der kleinste simulierte dynamische Elastizitätsmodul beträgt dann  $14256/0,95=15006$  N/mm<sup>2</sup>. Das belegt die Einhaltung des vorgeschriebenen unteren Grenzwertes für den dynamischen Elastizitätsmodul im Sortierverfahren EDYN-2. Der Mittelwert des simulierten Brett-Zug-Elastizitätsmoduls beträgt 16913 N/mm<sup>2</sup>. Der entsprechende dynamische Elastizitätsmodul hätte dann einen Wert von  $16913/0,95=17800$  N/mm<sup>2</sup>. Dieser Wert übersteigt den wirklichen Mittelwert des dynamischen Elastizitätsmoduls von 16666 N/mm<sup>2</sup>, s. Tabelle 4-1, Spalte 3. Das Verhältnis ist  $17800/16666 = 1,07$ . Hier stößt das Simulationsverfahren im Rechenmodell an seine Genauigkeitsgrenzen. Schließlich ist der simulierte Brett-Zug-Elastizitätsmodul eine abhängige Größe, die nur durch das gewählte Sortierverfahren mit seinen theoretischen Verteilungsfunktionen für Rohdichte und Ästigkeit sowie den vorgeschriebenen unteren Grenzwert des dynamischen Elastizitätsmoduls direkt beeinflusst wird. Dass der Mittelwert dabei genau getroffen wird, ist vor dem Hintergrund aller Modellgenauigkeiten sehr unwahrscheinlich.

Ein möglicher Grund für diese Abweichung könnte eine Veränderung der Schnittholzqualität seit den 1980er Jahren sein. Hinweise hierzu finden sich in der Einleitung. Es ist denkbar, dass der verwendete Algorithmus zur Simulation der Ästigkeit – das betrifft hier nicht den größten Ast im Brett, sondern vor allem die weiteren Äste

und ihre Häufigkeit – für die heute vorwiegend eingesetzten Bretter aus Schwachrundholz nicht mehr zutreffend ist. Denn diese Bretter bilden das Material für die untersuchten Sortierverfahren der Holzforschung München. Aufgrund des großen Einflusses der Ästigkeit auf den Elastizitätsmodul der Bretter bewirkt eine Modellungenauigkeit bei der Simulation der Ästigkeit zwangsläufig Unschärfen beim simulierten Elastizitätsmodul der Bretter. Für eine schlüssige Erklärung wären genauere Untersuchungen bezüglich der Ästigkeit in Brettlängsrichtung erforderlich, was aber nicht Gegenstand dieser Arbeit sein soll. Fragen diesbezüglich bleiben offen.

In Bild A-48 ist oben rechts die Verteilung der simulierten kleinsten Brett-Zugfestigkeit, die sich auf einen 150 mm langen Brettabschnitt bezieht, dargestellt. Das 5%-Quantil (=5th Percentile) im Häufigkeitsdiagramm gibt an, wie hoch die Vergütung hier (und sinngemäß in den weiteren Sortierverfahren) ist. Im vorliegenden Fall beträgt die simulierte charakteristische Brett-Zugfestigkeit  $32,0 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Wert liegt etwa 10% über der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit von  $29,0 \text{ N/mm}^2$ , ermittelt nach EN 408.

In Bild 3-16 ist die Element-Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Element-Zug-Elastizitätsmodul für die Elemente von vier ausgewählten simulierten Brettern aus der Sortierung EDYN-2 dargestellt. In diesem Bild wird die Autokorrelation (der Residuen) bei diesen beiden mechanischen Eigenschaften verdeutlicht. Bei den Brettern A und C liegen die Element-Zug-Elastizitätsmoduln gleichermaßen im Bereich zwischen  $12500 \text{ N/mm}^2$  und  $19000 \text{ N/mm}^2$ . Die Streuungen der Element-Zugfestigkeiten sind bei diesen beiden Brettern aber völlig unterschiedlich. Die Elementeigenschaften der Bretter B und D verdeutlichen den umgekehrten Fall. Hier liegen die Element-Zugfestigkeiten gleichermaßen im Bereich zwischen  $40 \text{ N/mm}^2$  und  $90 \text{ N/mm}^2$  und die Streuung der Element-Zug-Elastizitätsmoduln ist unterschiedlich groß ausgeprägt.

Die charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit, die für das Sortierverfahren EDYN-2 simuliert wird, beträgt  $27 \text{ N/mm}^2$ , s. Bild 3-17. Dieser Wert ist vorbestimmt und daher ein Istwert, der aufgrund der immer gleichen Wechselwirkung zwischen den Werten der Darrohdichte-Verteilung und der Regressionsbeziehungen dem Sortierverfahren EDYN-2 stets fest zugewiesen ist – gedacht unendlich viele simulierte Werte vorausgesetzt. Da aber nun die charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit innerhalb der Studien durch Vorgabe von gestaffelten Sollwerten variiert wird, muss dieser Istwert durch die gewünschten Sollwerte ( $20\text{-}40 \text{ N/mm}^2$ ) während der Simulationen ersetzt werden. Dafür muss er zuvor als Eingabewert nicht nur für EDYN-2, sondern für alle untersuchten Sortierverfahren bekannt sein.

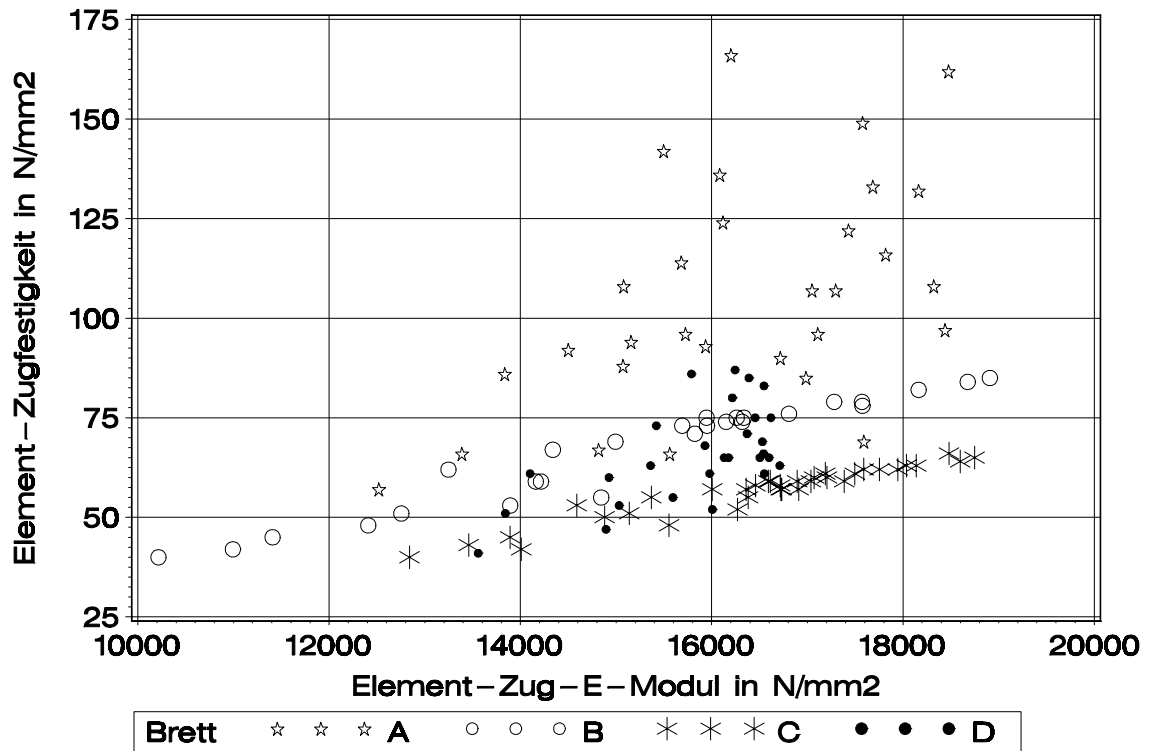


Bild 3-16 Element-Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Element-Zug-Elastizitätsmodul für die Elemente von vier ausgewählten Brettern der simulierten Sortierung EDYN-2

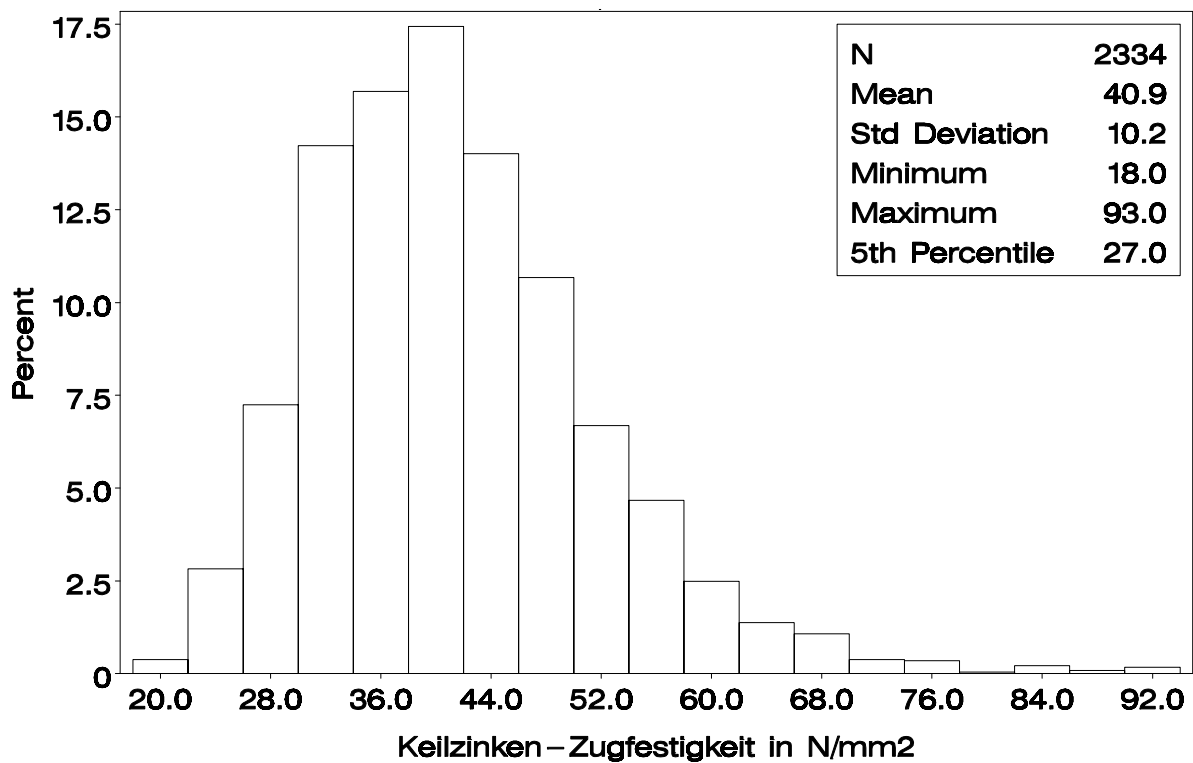


Bild 3-17 Häufigkeitsverteilung der Keilzinken-Zugfestigkeit der simulierten Sortierung EDYN-2

### 3.4.2.3 Mechanische Eigenschaften der simulierten Träger

In Bild 3-18 oben wird die mittlere Biegefestigkeit mit Dreiecken und die charakteristische Biegefestigkeit mit Punkten in Abhängigkeit von der gestaffelten charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit dargestellt. Jedes Symbol steht für einen statistischen Kennwert, der anhand von 100 simulierten Biegefestigkeiten ermittelt wurde. Erwartungsgemäß steigen beide Kennwerte mit zunehmender charakteristischer Keilzinken-Zugfestigkeit an. Die Mittelwerte oben beschreiben dabei einen etwas ruhigeren Verlauf als die darunter liegenden charakteristischen Werte.

In Bild 3-18 unten wird der Anteil des Keilzinken-Versagens (in %) in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit dargestellt. Es ist leicht nachvollziehbar, dass der Anteil bei niedrigen Keilzinken-Zugfestigkeiten größer ausfällt (88%) als bei hohen Keilzinken-Zugfestigkeiten (18%).

Diese Tatsache verdeutlicht Bild 3-19. Es zeigt jeweils für eine charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit von 20 N/mm<sup>2</sup> (oben) bzw. 40 N/mm<sup>2</sup> (unten) den Zusammenhang zwischen der simulierten Biegefestigkeit und der Nummer des Elements, in dem vom Rechenmodell der erste Riss registriert wurde. Auf der x-Achse sind die Elementnummern als Abfolge der ersten vier Lamellen aufgetragen, was  $4 \cdot 72 = 288$  Elementen entspricht. Die Elementkategorie – Holz oder Keilzinkung – ist durch Symbole gekennzeichnet. Die mittlere (gestrichelte Linie oben) sowie die charakteristische Biegefestigkeit (gestrichelte Linie unten) sind in Bild 3-19 kenntlich gemacht. In Bild 3-19 oben überwiegen Dreiecke, die für Keilzinkenverbindungen stehen. In Bild 3-19 unten ist es umgekehrt. Die Keilzinken-Zugfestigkeit ist hier so hoch, dass für die Biegefestigkeit des Trägers fast ausschließlich die Festigkeit der Holzelemente ausschlaggebend ist.

Die vorherrschende Bedeutung der Randlamelle und der darin vorhandenen Äste sowie Keilzinkenverbindungen für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit wird deutlich. Die Werte unterhalb des charakteristischen Werts stehen ausschließlich in Verbindung mit simulierten Biegeversuchen, deren Träger in der Randlamelle der Zugzone den ersten Riss aufweisen.

Die dicken vertikalen Linien kennzeichnen jeweils den Trägeranfang bzw. das Trägerende und die dünnen entsprechen der Lasteinleitung in den Drittelpunkten. Es ist erwartungsgemäß, dass Risse vorwiegend in denjenigen Elementen registriert werden, die zwischen den Lasteinleitungspunkten d.h. im Bereich des maximalen Biegemoments liegen. Das sind die Bereiche zwischen den Elementen 25-48, 97-120 usw.



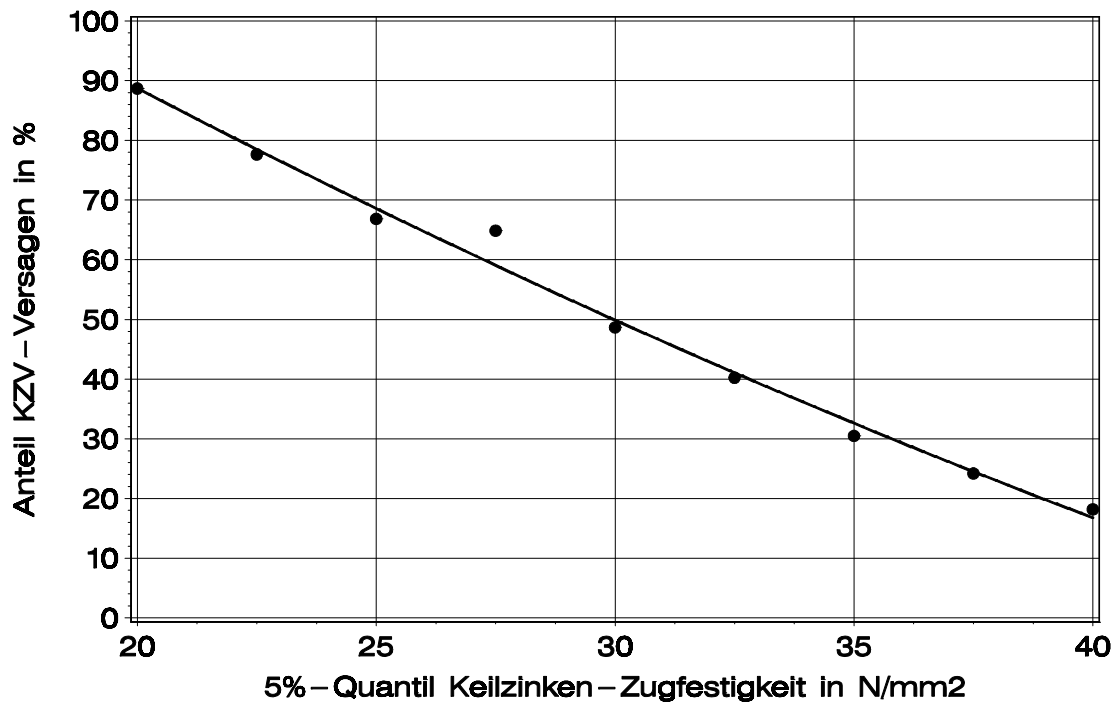
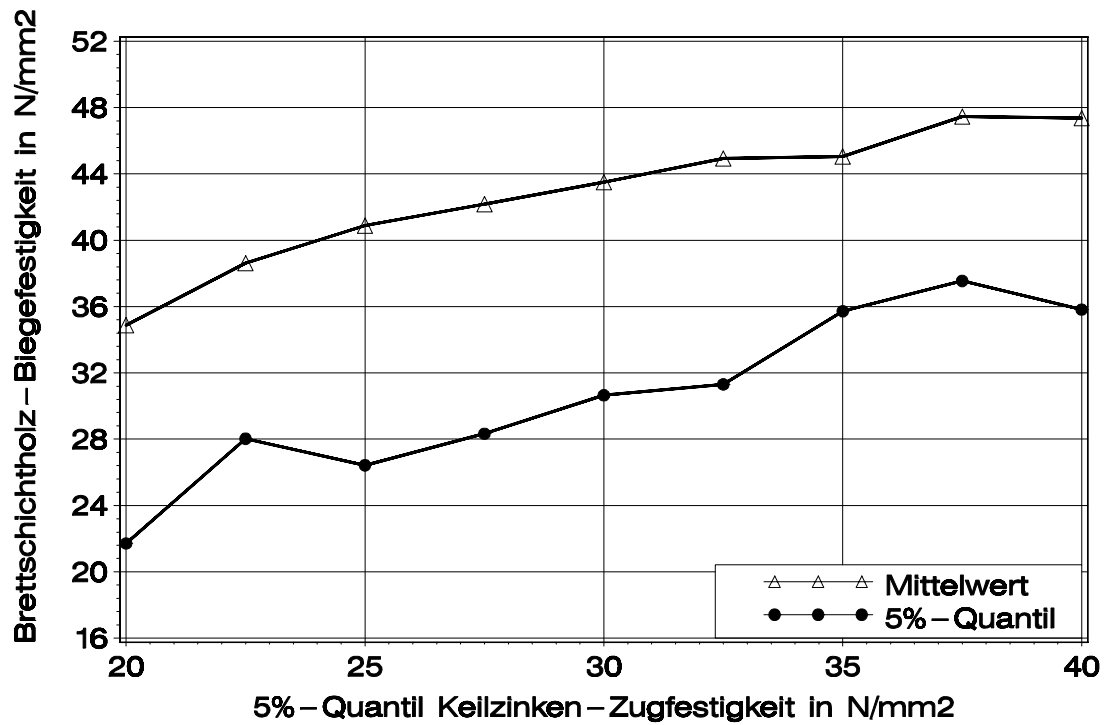


Bild 3-18 Ergebnisse einer Studie, in der die charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit von 20 N/mm<sup>2</sup> bis 40 N/mm<sup>2</sup> in neun Schritten zu 2,5 N/mm<sup>2</sup> angehoben wurde; Simulierte Biegefestigkeit über 5%-Quantil der Element Keilzinken-Zugfestigkeit (oben) simulierter Anteil Keilzinken-Versagen über 5%-Quantil der Element Keilzinken-Zugfestigkeit (unten)

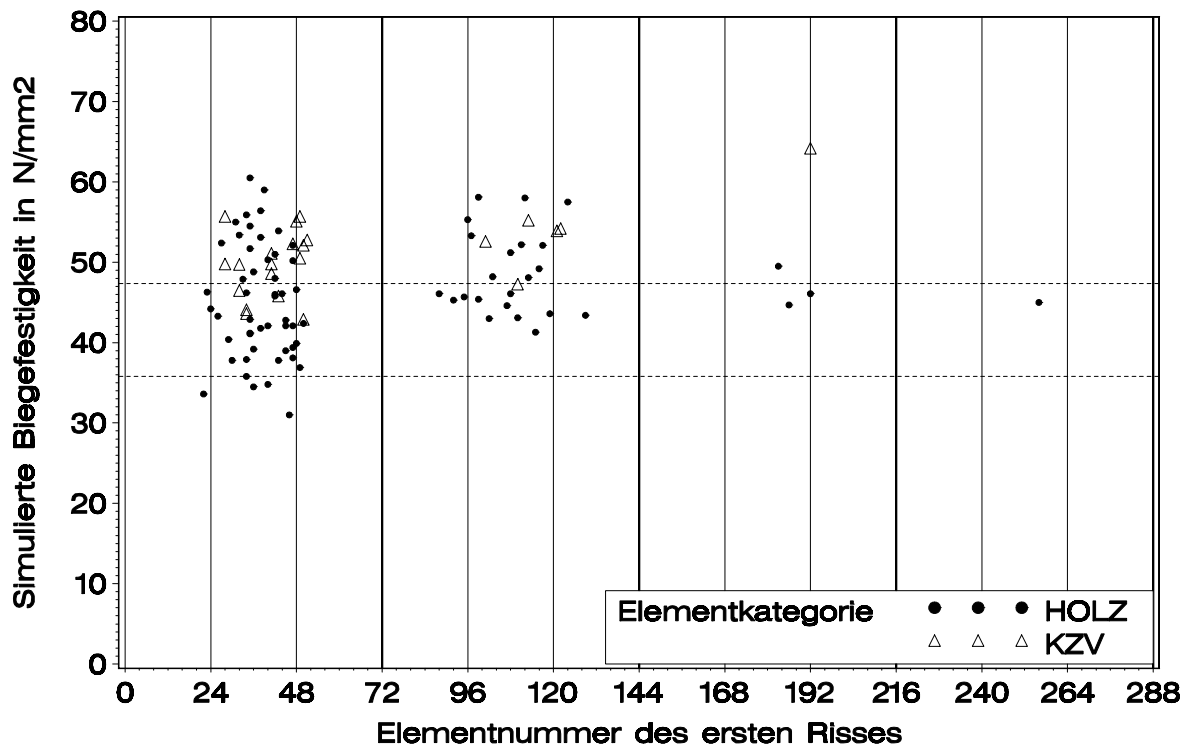
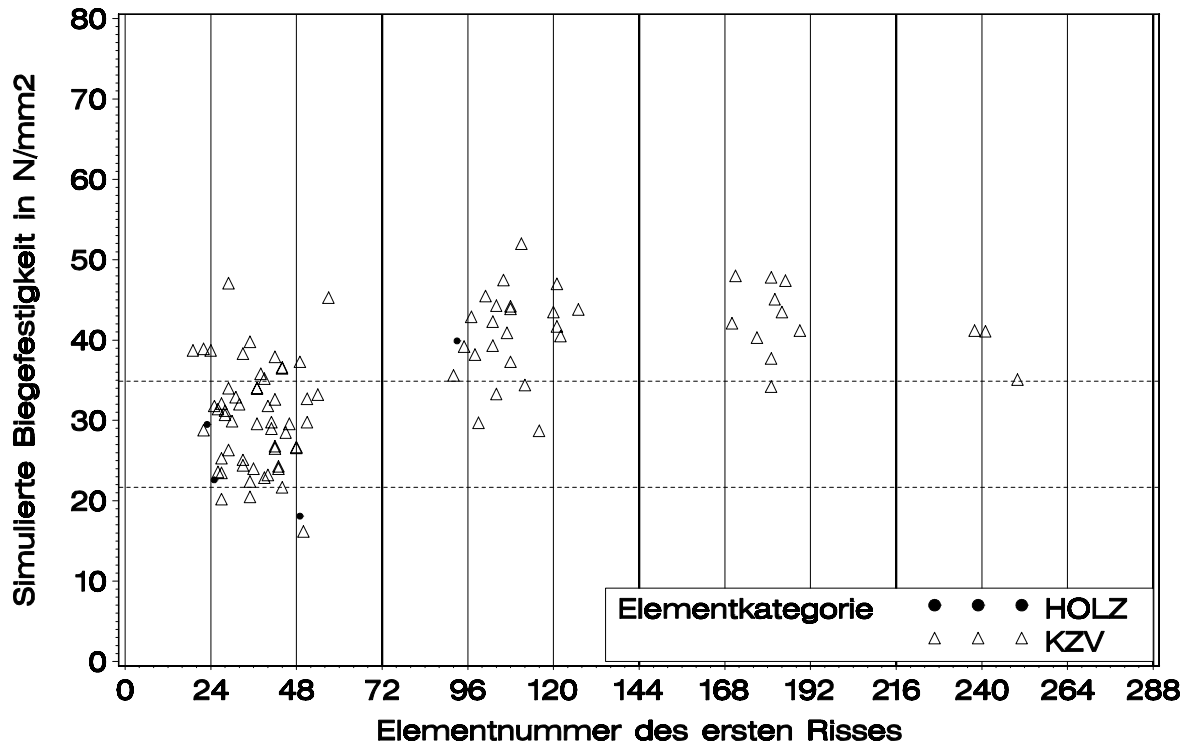


Bild 3-19 Biegefestigkeit simulierter Träger in Abhängigkeit von der Elementnummer des ersten Risses; 1. Schritt der Studie (oben): charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit = 20 N/mm<sup>2</sup> → Keilzinkenversagen überwiegt; 9. Schritt der Studie (unten): charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit = 40 N/mm<sup>2</sup> → Holzversagen überwiegt; Mittelwert und charakteristischer Wert mit horizontalen Hilfslinien hervorgehoben

### 3.5 Ergebnisse der simulierten Biegeversuche

#### 3.5.1 Allgemeines

Das vorangestellte Simulationsbeispiel zeigte das Vorgehen, wie mit dem Rechenmodell der zahlenmäßige Zusammenhang zwischen der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit und einem beliebigen Sortierverfahren sowie der variablen charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit bestimmt wird. Mit diesem Vorgehen lassen sich wirkliche Biegeversuche ersetzen, was schließlich die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes des Rechenmodells begründet. Indem nun die Darrrohdichte und die KAR-Werte von Brettern unterschiedlicher Sortierverfahren im Rechenmodell empirisch repräsentiert werden, kann deren unterschiedlich ausgeprägter Einfluss auf die Brettschichtholz-Biegefestigkeit ermittelt werden. Ebenso lässt sich der Einfluss auf die mittlere Brettschichtholz-Biegefestigkeit und auf den Anteil Keilzinkenversagen darstellen.

Die folgenden beiden Abschnitte behandeln die Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren in den Abschnitten 3.2.2 (Holzforschung München) und 3.2.3 (VTT Technical Research Centre of Finland). Aufgrund spezieller Vorgaben von VTT für die Simulation der Biegeversuche sind die Träger bezüglich des Aufbaus und der Maße in den beiden folgenden Abschnitten nicht identisch.

#### 3.5.2 Ergebnisse auf der Grundlage der Datenbasis Holzforschung München

In Bild 3-20 ist der Aufbau der simulierten Träger dargestellt. Die Höhe beträgt 600 mm und die Stützweite entspricht der 18fachen Höhe. Der Trägeraufbau ist homogen. Damit beziehen sich simulierte Biegefestigkeiten auf die Referenzhöhe von 600 mm homogener Träger.

Für die relevanten Sortierverfahren, die in Tabelle 3-2 mit einem Stern gekennzeichnet sind, wurden jeweils mehrere Studien durchgeführt. Die Ergebnisse der einzelnen Studien zeigen Bild A-42 bis Bild A-54 im Anhang A 3. Die Erläuterungen für das Simulationsbeispiel im Abschnitt 3.4.2 gelten für die Häufigkeitsdiagramme im Anhang A 3 sinngemäß. Zu den zwei Häufigkeitsdiagrammen (jeweils unten in den Bildern) sei aber noch Folgendes angemerkt:

1. Die simulierte Biegefestigkeit über dem 5%-Quantil der Keilzinken-Zugfestigkeit (jeweils links unten); Es war erforderlich, je Sortierverfahren bis zu fünf Studien durchzuführen, um den zahlenmäßigen Zusammenhang weitgehend zu stabilisieren. Das zeigt sich in einer gewissen Glättung der Kurven. Die Anzahl der Studien entspricht der Anzahl der Punkte, die jeweils über den einzelnen Stützstellen in den Diagrammen dargestellt sind. Stützstellen sind hier die konstanten charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeiten für die jeweils 100 bzw. 200 simulierte Biegeversuche durchgeführt wurden. In Tabelle 3-4 ist dazu die Anzahl der Studien und in der letzten Spalte die Gesamtanzahl der simulierten Biegeversuche je Sortierverfahren angegeben. Die drei bis fünf Studien für jeweils ein Sortierverfahren unterscheiden sich durch unterschiedliche Zufallszahlen-Folgen, die Auswirkungen auf die simulierten

strukturellen, auf die mechanischen Eigenschaften der Bretter und damit auch auf die simulierten Biegefestigkeiten der Träger haben.

2. Der simulierte Anteil des Keilzinken-Versagens über dem 5%-Quantil der Keilzinken-Zugfestigkeit (jeweils rechts unten). Diese Diagramme verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Brett- und Keilzinkenqualität. Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Brett- und Keilzinkenqualität liegt bei einem Anteil Keilzinken-Versagen von etwa 50% vor. Davon stark abweichende Anteile zeigen an, dass Brett- und Keilzinkenqualität nicht gut aufeinander abgestimmt sind.

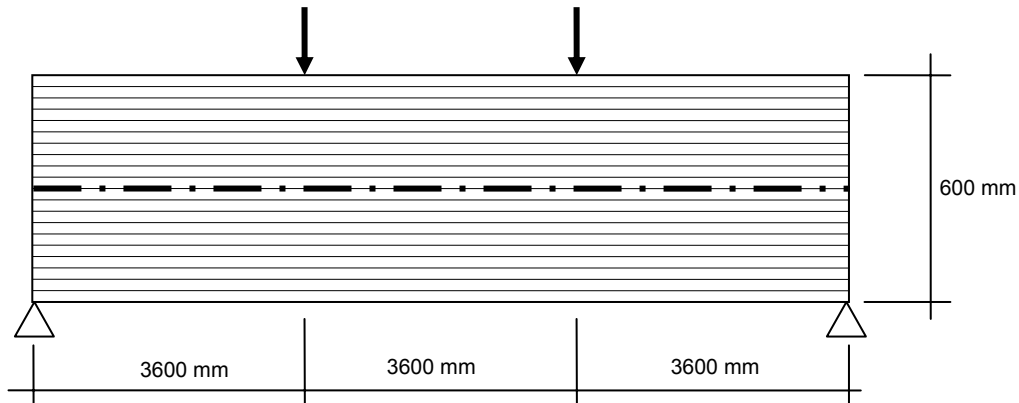


Bild 3-20 Simulierte Biegeversuche für die untersuchten Sortierverfahren aus Abschnitt 3.2.2; homogener Aufbau, 20 Lamellen, Lamellendicke 30 mm

Tabelle 3-4 Studien und simulierte Biegeversuche

Sortierverfahren	Anzahl Studien	Stützstellen	simulierte Biegeversuche je Stützstelle	Gesamtanzahl der simulierten Biegeversuche
VIS-1	3	9	200	5400
VIS-2	3			5400
VIS-3	3			5400
RHO-4	5		100	4500
RHO-5				4500
EDYN-1	4			3600
EDYN-2	4			3600
EDYN-3	5			4500
EDYN-4	4			3600
E-1	1	900		
E-2		900		
E-3		900		
E-9		900		

### 3.5.3 Ergebnisse auf der Grundlage der Datenbasis VTT Finnland

Bild 3-21 zeigt den Trägeraufbau für die Simulation der Biegeversuche, bei denen die Sortierverfahren im Abschnitt 3.2.3 berücksichtigt wurden. Es handelt sich um kombinierte Träger mit einer Höhe von 540 mm, bei denen die Randlamellen und Kernlamellen unterschiedlichen Sortierverfahren entsprechen. Die Kernlamellen haben im Vergleich mit den Randlamellen stets einen etwas geringeren Elastizitätsmodul. Die entsprechenden Verhältnisse der mittleren Elastizitätsmoduln  $E_1/E_2$  sind in Tabelle 3-5 zusammengestellt. In der letzten Zeile sind die Umrechnungsfaktoren  $\mu$  angegeben, mit denen die simulierten Biegefestigkeiten umgerechnet werden, um die Festigkeitswerte später auf homogene Träger zu beziehen. Für die untersuchten Sortierverfahren wurden die in Tabelle 3-6 angegebenen Studien durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen Bild A-55 bis Bild A-64 im Anhang A 3.

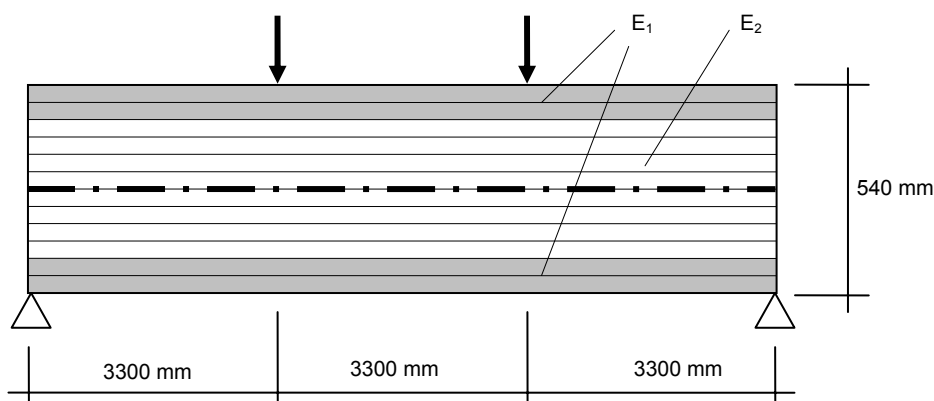


Bild 3-21 Simulierte Biegeversuche für die untersuchten Sortierverfahren aus Abschnitt 3.2.3; kombinierter Aufbau, 12 Lamellen, Lamellendicke 45 mm

Tabelle 3-5 Steifigkeitsverhältnisse und Umrechnungsfaktoren

Fall	Sortierverfahren		$E_1^*$ N/mm <sup>2</sup>	$E_2^*$ N/mm <sup>2</sup>	$\frac{E_1}{E_2}$	$\mu$
	Randlamellen	Kernlamellen				
1	B2	B3	13268	12897	1,029	1,011
2	D2	D3	13114	12800	1,025	1,007
3	D1	D2	13263	13114	1,011	1,003
4	C1	C2	13540	13152	1,030	1,009
5	A1	A2	14518	13301	1,092	1,026
6	F22	G18	13551	12464	1,087	1,026
7	G26	F22	14590	13551	1,077	1,023
8	A1+	A2	15120	13301	1,14	1,04
9	G26+	F22	14725	13551	1,087	1,026
10	X	F22	15452	13551	1,14	1,04

\* Mittelwerte in den Häufigkeitsdiagrammen im Anhang A 3 beim jeweiligen Sortierverfahren

Tabelle 3-6 Studien und simulierte Biegeversuche

Sortierverfahren	Anzahl Studien	Stützstellen	simulierte Biegeversuche je Stützstelle	Gesamtanzahl der simulierten Biegeversuche
B2/B3	1	9	200	1800
D2/D3				1800
D1/D2				1800
C1/C2				1800
A1/A2				1800
F22/G18				1800
G26/F22				1800
A1+/A2				1800
G26+/F22				1800
X/F22				1800

## **4 Modelle für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit**

### **4.1 Allgemeines**

Im folgenden Abschnitt 4.2 werden alternative Modelle für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit entwickelt. Ein Modell spezifiziert dabei einen einzigen funktionalen Zusammenhang gemäß Gleichung (1), in dem die charakteristische Brett-Zugfestigkeit und die charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit die unabhängigen Variablen sind. Es werden für qualitativ unterschiedliche Sortierverfahren für Bretter eigene und gemeinsame Modelle festgelegt und untersucht. Zu ausgewählten Modellen werden zusätzlich auch Regressionsgleichungen für die mittlere Brettschichtholz-Biegefestigkeit und für den Anteil Keilzinkenversagen angegeben.

Nur die Simulationsergebnisse aus Abschnitt 3.5.2 sind die zahlenmäßige Grundlage für die Bestimmung der Modelle. Mit den Ergebnissen aus Abschnitt 3.5.3 erfolgt eine gezielte Überprüfung, ob im vorliegenden Vergleich die Modellierung auch unabhängig von der Herkunft der Brettdaten bzw. der Bretter – Mitteleuropa und Skandinavien – ist.

In Abschnitt 4.3 folgt die Bewertung der Modelle und die Festlegung derjenigen, die für die Bestimmung der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit allein bedeutsam sind. Der Leser, der nur daran interessiert ist, möge den folgenden Abschnitt einfach überspringen.

Einflüsse aus einer von 600 mm abweichenden Trägerhöhe und aus einer von 10,8 m abweichenden Trägerlänge sowie Einflüsse aus kombinierten Trägeraufbauten auf die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit werden in den Abschnitten 4.4 und 4.5 beschrieben. Es werden Vorschläge gemacht, wie diese Einflüsse angemessen bei der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit berücksichtigt werden können. Dazu dient das Beispiel im Abschnitt 4.6. In Abschnitt 4.7 werden die relevanten Modelle anhand experimentell ermittelter Biegefestigkeiten von Brettschichtholz, die aus Veröffentlichungen bekannt sind, verifiziert. Mit Ergebnissen von weiteren 40 Biegeversuchen und von Zugversuchen an Referenzbrettern und -keilzinken erfolgt zusätzlich eine sehr gezielte Überprüfung der Modelle. Abschluss des Kapitels 4 sind Vorschläge für die Normung wie Anforderungen an die Brett-Zugfestigkeit und die Keilzinken-Biegefestigkeit sowie Vorschläge für homogene und kombinierte Träger für die Festigkeitsklassen GL24, GL28 und GL32.

### **4.2 Entwicklung der Modelle**

Vor der Beschreibung der Entwicklung der Modelle sei auf zwei grundlegende Zusammenhänge hinsichtlich des Laminierungseffekts hingewiesen:

1. Anhand der Simulationsergebnisse kann man beobachten, dass sich der Laminierungseffekt bei Brettschichtholz verringert, wenn die Streuung des Elastizitätsmoduls

der verwendeten Bretter abnimmt. Die Streuung bezieht sich dabei sowohl auf jedes einzelne Brett, in dem der Elastizitätsmodul in Längsrichtung schwankt, als auch auf die Gesamtheit der Bretter, bei der sich der Elastizitätsmodul von Brett zu Brett ändert. Diese Streuung wiederum wird sehr stark vom eingesetzten Sortierverfahren bestimmt. Erwartungsgemäß hat eine reine visuelle Sortierung eine größere und eine maschinelle Sortierung – nach dem Elastizitätsmodul – eine kleinere Streuung zur Folge. Als Beleg dafür sind in Tabelle 4-1 für die Auswahl aus den in Abschnitt 3.2.2 untersuchten Sortierverfahren die Variationskoeffizienten für den Elastizitätsmodul und für die Zugfestigkeit zusammengestellt: Die Werte des Variationskoeffizienten in Spalte vier für den Elastizitätsmodul nehmen ab, wenn die Anforderungen an die Sortierung bzw. an die Zugfestigkeit der Bretter zunehmen.

Tabelle 4-1 Mittelwerte und Variationskoeffizienten des dynamischen Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit; Auswertung für die relevanten Sortierverfahren in Tabelle 3-2, Abschnitt 3.2.2

1	2	3	4	5	6
		dynamischer Elastizitätsmodul		Zugfestigkeit, ermittelt nach EN 408	
Bezeichnung Sortierung	Verfahren	$\bar{x}$ N/mm <sup>2</sup>	v %	$\bar{x}$ N/mm <sup>2</sup>	v %
VIS-1	visuell: S10	11839	20,0	28,1	38,1
VIS-2	visuell: S10+S13	12618	21,6	32,4	41,7
VIS-3	visuell: S13	14487	18,1	41,2	34,5
RHO-4	Rohdichte+Äste	15644	13,0	43,4	32,7
RHO-5		16477	12,0	46,4	30,4
EDYN-1	dyn. E-Modul + Äste	15951	9,8	44,1	28,3
EDYN-2		16666	8,5	47,2	26,9
EDYN-3		17476	7,4	51,1	25,2
EDYN-4		17815	8,2	55,5	24,7
E-1	stat. E-Modul + Äste	16293	9,7	48,0	27,1
E-2		16984	8,9	51,7	25,9
E-3		17714	7,8	55,1	24,7
E-9		17920	8,4	57,8	24,4



2. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich der Laminierungseffekt bei Brettschichtholz aus Brettern, die aufgrund einer anspruchsvollen Festigkeitssortierung eine sehr hohe charakteristische Brett-Zugfestigkeit besitzen, nahezu verliert. Dazu zeigen Tabelle 4-2 (Spalten zwei bis vier) und Bild 4-1 das Verhältnis zwischen charakteristischer Brett-Zugfestigkeit, ermittelt nach EN 408, und simulierter charakteristischer Brett-Zugfestigkeit, ermittelt mit dem Rechenmodell und daher auf 150 mm lange Brettelemente bezogen. Die Differenz zwischen diesen beiden Werten beziffert den Hauptanteil der „Zunahme“ der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit gegenüber der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit, weil die Bretter im Verbund des Brettschichtholzes einer günstigeren Beanspruchung ausgesetzt sind als im Zugversuch gemäß EN 408. Die in Bild 4-1 dargestellte Regressionsgerade, Gleichung (12), zeigt, dass sich diese „Zunahme“ bei einer charakteristischen Zugfestigkeit, ermittelt nach EN 408, von 40 N/mm<sup>2</sup> nahezu verloren hat. Die Regressionsgerade schneidet sich mit der Geraden  $x=y$ .

$$f_{t,\ell,k} = -10,70 + 1,261 \cdot f_{t,\ell,k,\text{sim}} \quad (12)$$

Hier wird bereits deutlich, dass für Brettschichtholz mit einer charakteristischen Biegefestigkeit von 36 N/mm<sup>2</sup> (GL36) als Anforderung eine charakteristische Brett-Zugfestigkeit von 26 N/mm<sup>2</sup> unzureichend erscheint, weil der Anteil am Laminierungseffekt, der allein durch die Schichtung der Bretter begründet ist – hiermit sind alternative Lastpfade für die Zugspannungen in oberhalb und ggf. in unterhalb von Schwachstellen angeordneten Brettern gemeint –, vergleichsweise klein ist.

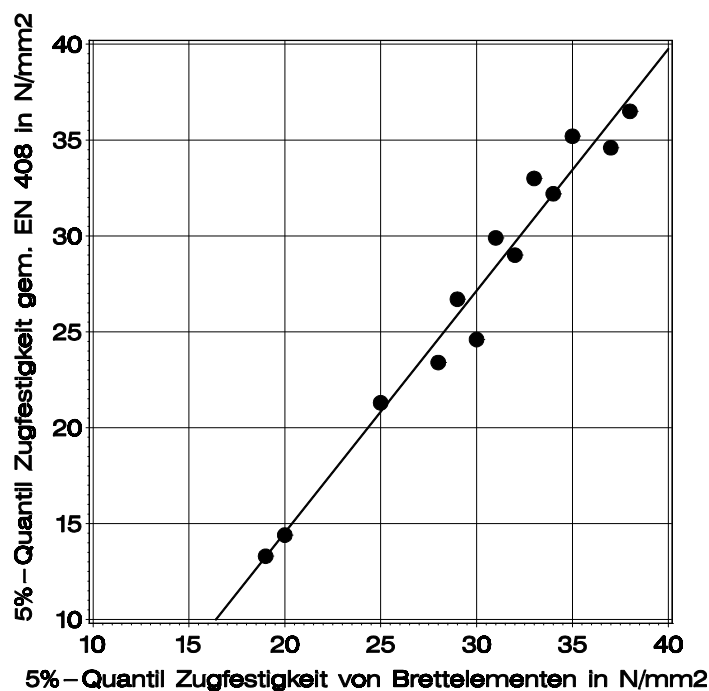


Bild 4-1 Werte in Tabelle 4-2, Spalten 2 und 3 und angenommener linearer Zusammenhang (12) zwischen der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit nach EN 408 und der simulierten charakteristischen Brett-Zugfestigkeit

Tabelle 4-2 Charakteristische Brett-Zugfestigkeit nach EN 408, simulierte charakteristische Brett-Zugfestigkeit, Zuordnung der Verfahren zu den Modellgleichungen für die charakteristische Brett-schichtholz-Biegefestigkeit; Sortierverfahren aus Abschnitt 3.2.2 (oben) und 3.2.3 (unten)

Sortierung	$f_{t,\ell,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,\ell,k,sim}$ N/mm <sup>2</sup>	$\frac{f_{t,\ell,k}}{f_{t,\ell,k,sim}}$	Modellgleichung
VIS-1	13,3	19	0,7	(20) (21) (24) (25) (26) (27)
VIS-2	14,4	20	0,72	
VIS-3	21,3	25	0,85	
RHO-4	23,4	28	0,84	(20) (21) (30) (31) (36) (37) (40) (41)
RHO-5	24,6	30	0,82	
EDYN-1	26,7	29	0,92	(20) (21) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (40) (41)
EDYN-2	29,0	32	0,91	
EDYN-3	33,0	33	1,0	
EDYN-4	34,6	37	0,94	
E-1	29,9	31	0,96	(42) (43)
E-2	32,2	34	0,95	
E-3	35,2	35	1,0	
E-9	36,5	38	0,96	

Sortierung Randlamellen	$f_{t,\ell,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{t,\ell,k,sim}$ N/mm <sup>2</sup>	$\frac{f_{t,\ell,k}}{f_{t,\ell,k,sim}}$	Modellgleichung
B2	24,4	24	1,02	(44) (45)
D2	22,3	24	0,93	
D1	25,4	26	0,98	
C1	27,3	27	1,01	
A1	26,8	28	0,96	
F22	23,2	25	0,93	
G26	26,4	28	0,94	
A1+	28,4	31	0,92	
G26+	27,5	30	0,92	
X	28,8	31	0,93	

Ein Beispiel zur Verdeutlichung: Die simulierte charakteristische Brett-Zugfestigkeit beträgt für das Verfahren EDYN-1 29 N/mm<sup>2</sup> (Bild A-47 oben rechts). Für Keilzinken-Zugfestigkeiten über 35 N/mm<sup>2</sup> stabilisiert sich die höchst mögliche charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit bei etwa 34 N/mm<sup>2</sup> (Bild A-47 unten links). Nun wird angenommen, dass der Einfluss der Höhe und der Trägerlänge auf die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit erst bei 1800 mm Höhe bzw. 32,4 m Länge abgeklungen ist und dass bei diesen Maßen die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit 85% des Referenzwertes – es wird hier auf den Verlauf des  $k_H$ -Faktors in Bild 4-16 vorgegriffen – beträgt. Daher deckt sich die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit eines solchen Trägers mit der simulierten charakteristischen Brett-Zugfestigkeit. Es ist:  $34 \cdot 0,85 = 28,9 \approx 29$  N/mm<sup>2</sup>. Die Ähnlichkeit dieser beiden Werte macht deutlich, dass hier der Laminierungseffekt unwesentlich vom geschichteten Aufbau mit möglichen alternativen Lastpfaden abhängt. Die analoge Untersuchung der übrigen Sortierverfahren, die auf Rohdichte und dynamischem Elastizitätsmodul basieren, zeigt die gleiche Tendenz. Nur bei den drei visuellen Sortierverfahren, VIS-1 bis VIS-3, liegt die mit 85% sinngemäß berechnete Brettschichtholz-Biegefestigkeit um zwei bis drei N/mm<sup>2</sup> über der simulierten charakteristischen Brett-Zugfestigkeit.

Die zahlenmäßige Grundlage für die Entwicklung der einzelnen Modelle setzt sich nun aus den folgenden drei Festigkeitswerten zusammen:

- Die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit, die mithilfe der simulierten Biegeversuche in Abschnitt 3.5 jeweils für die untersuchten Sortierverfahren bestimmt wurde
- Die experimentelle charakteristische Brett-Zugfestigkeit nach EN 408 (Tabelle 4-2, Spalte zwei), die jeweils ein Ergebnis der untersuchten Sortierverfahren ist
- Die auf 150 mm lange Abschnitte bezogene charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit, die während der simulierten Biegeversuche innerhalb der zahlreichen Studien variiert wurde

Die drei Festigkeitswerte liegen in Form von mehreren hundert Tripels vor. Diese sind die Datenbasis für eine multiple Regressionsanalyse, in der eine Regression der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit auf die charakteristische Brett-Zugfestigkeit und die charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit durchgeführt wird. Die Regression hat schließlich die Modelle für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit zum Ergebnis. Es werden zwei unterschiedliche funktionale Zusammenhänge untersucht, die in den Gleichungen (13) und (14) dargestellt sind.

$$f_{m,g,k} = A + B \cdot f_{t,j,k,\ell=150} + C \cdot f_{t,j,k,\ell=150}^2 + E \cdot f_{t,j,k,\ell=150} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (13)$$

$$f_{m,g,k} = A + B \cdot f_{t,j,k,\ell=150} + C \cdot f_{t,j,k,\ell=150}^2 + D \cdot f_{t,\ell,k}^2 + E \cdot f_{t,j,k,\ell=150} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (14)$$

Der zusätzliche quadratische Term der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit in Gleichung (14) bewirkt – im Gegensatz zu Gleichung (13) – im Bereich niedriger charak-

teristischer Keilzinken-Zugfestigkeiten eine bessere Anpassung der Modelle an die simulierten charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeiten. Die Modellgleichungen werden schließlich auch in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit angegeben, weil diese Größe bei der Produktüberwachung dominiert. Zur Umrechnung dient die aus Erfahrung gewonnene Beziehung (15) (Colling et al. 1991 und Frese 2006).

$$f_{m,j,k} \approx 1,40 \cdot f_{t,j,k,\ell=150} \quad (15)$$

Auflösen der beiden Ungleichungen (16) und (17) in EN 1194 nach der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit und Gleichsetzen führt auf Gleichung (18). Die Übereinstimmung mit Gleichung (15) zeigt, dass es regelrecht ist, die Modellgleichungen auch für charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeiten zu verwenden, die nach EN 408 mit einer astfreien Länge von 200 mm zu bestimmen sind.

$$f_{t,j,k,\ell=200} \geq 5 + f_{t,\ell,k} \quad (16)$$

$$f_{m,j,k} \geq 8 + 1,4 \cdot f_{t,\ell,k} \quad (17)$$

$$f_{m,j,k} = 1 + 1,4 \cdot f_{t,j,k,\ell=200} \approx 1,4 \cdot f_{t,j,k,\ell=200} \quad (18)$$

Die charakteristischen Biegefestigkeiten der Versuche aus Abschnitt 3.5.3, die mit kombinierten Querschnitten simuliert wurden, werden mit Gleichung (19) auf homogene Referenzträger bezogen. Dazu wurden die Umrechnungsfaktoren  $\mu$  für die 10 unterschiedlichen kombinierten Querschnitte in Tabelle 3-5 angegeben. Eine weitere Umrechnung wegen der von 600 mm abweichenden Trägerhöhe ist entbehrlich.

$$f_{m,g,k,\text{homogen}} \approx \mu \cdot f_{m,g,k,\text{kombiniert}} \quad (19)$$

Ausgangsbasis für die Entwicklung der Modelle für qualitativ unterschiedliche Sortierungen ist zunächst das Universalmodell in Bild 4-2 (Abschnitt 4.2.1). Es beruht auf den ersten neun in Tabelle 4-2 aufgeführten Sortierverfahren gleichermaßen. In Bild 4-2 wird deutlich, dass der Laminierungseffekt bei visuell sortierten Brettern geringer als erwartet ausfällt. Mit den visuellen Sortierungen S10 bzw. S13 und den charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeiten von 30 N/mm<sup>2</sup> bzw. 35 N/mm<sup>2</sup> scheint weder GL24 noch GL28 möglich zu sein. Hier wird deutlich, dass ein Universalmodell den Laminierungseffekt – wie sich später auch zeigen wird – in Teilbereichen unzutreffend erfasst.

Es werden daher für Sortierverfahren mit ähnlichem Laminierungseffekt jeweils getrennte und gemeinsame Modelle aufgestellt (Abschnitte 4.2.2 bis 4.2.10). In Tabelle 4-2 sind die untersuchten Sortierverfahren den entsprechenden Modellgleichungen zugeordnet. Diese werden anhand der Kurven in Bild 4-3 bis Bild 4-11 nur in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit dargestellt. Die entsprechenden Modellgleichungen, in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Zug- und -Biegefestigkeit, stehen jeweils direkt unter den Bildern.

Das finnische Universalmodell wird in seinem Bild 4-11 für die charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten 23, 25, 27 und 29 N/mm<sup>2</sup> ausgewertet. Damit wird es in seinem

Gültigkeitsbereich für die charakteristische Brett-Zugfestigkeit dargestellt (vgl.  $f_{t,r,k}$  in Tabelle 4-2 unten). Es ist damit zugleich mit den vorherigen Modellen gut vergleichbar, deren Kurven teilweise diesen vier Werten entsprechen.

Die Kurven der Modelle für qualitativ ähnliche Sortierverfahren werden zwecks besserer Gegenüberstellung mit dem Universalmodell in Bild 4-2 in derselben Farbe wiedergegeben. Graduelle Unterschiede innerhalb der qualitativ ähnlichen Sortierverfahren werden dann durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet.

Zu den drei Modellen, Universalmodell, Visuelles Modell-II und Rohdichtedynamischer-E-Modul-Modell-I, wurden zusätzlich Regressionsgleichungen für die Abschätzung der mittleren Brettschichtholz-Biegefestigkeit und des Anteils Keilzinkenversagen ermittelt. Die Werte dieser beiden abhängigen Variablen sind ebenso Ergebnisse der simulierten Biegeversuche. Die unabhängigen Variablen sind die charakteristische Brett-Zugfestigkeit und die charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit. Auf eine Darstellung dieser Gleichungen in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit wurde verzichtet. Diese ließen sich mit Gleichung (15) einfach herleiten.

In Tabelle 4-3 sind für alle zehn Modell- und die zusätzlichen Regressionsgleichungen die Anzahl der Tripel, das Bestimmtheitsmaß der Regression und die Standardabweichung der Residuen zusammengestellt.

Im Anhang A4, Residualanalyse, sind in Bild A-65 bis Bild A-74 die normierten Residuen über dem Vorhersagewert, der anhand der Modellgleichungen (Regressionsgleichungen für die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit) berechnet wurde, aufgetragen. Residuen sind Abweichungen zwischen Beobachtung und Vorhersage. Diese Diagramme zeigen im Detail, wie zutreffend jedes einzelne Sortierverfahren mit einem Modell wiedergegeben wird und in welchen Bereichen der Vorhersagewerte tendenzielle Abweichungen zwischen Beobachtung – hier im Sinne von Simulation – und Vorhersage vorliegen. Die normierten Residuen liegen fast ausschließlich zwischen -3 und +3. Damit gibt es fast keine Ausreißer.

Tabelle 4-3 Umfang  $n$  der den Modellgleichungen (Regressionsgleichungen) zugrunde liegenden Tripel, Bestimmtheitsmaß  $r^2$  und Standardabweichung der Residuen  $s_R$

Modell	Gl.	$n$	$r^2$	$s_R$ N/mm <sup>2</sup>
Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit				
Universalmodell	(20) (21)	333	0,894	1,650
Visuelles Modell-I	(24) (25)	80 <sup>1</sup>	0,881	1,068
Visuelles Modell-II <sup>2</sup>	(26) (27)	80 <sup>1</sup>	0,900	,9794
Rohdichte-Modell	(30) (31)	90	0,869	1,741
Dynamischer-E-Modul-Modell-I	(32) (33)	162	0,915	1,456
Dynamischer-E-Modul-Modell-II <sup>2</sup>	(34) (35)	162	0,918	1,433
Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I	(36) (37)	252	0,904	1,569
Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-II <sup>2</sup>	(40) (41)	252	0,905	1,567
Statischer-E-Modul-Modell	(42) (43)	36	0,890	2,022
Finnisches Universalmodell	(44) (45)	89 <sup>1</sup>	0,893	1,209
Mittlere Brettschichtholz-Biegefestigkeit				
Universalmodell	(22)	333	0,966	0,958
Visuelles Modell-II <sup>2</sup>	(28)	81	0,966	0,631
Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I	(38)	252	0,969	0,803
Anteil Keilzinkenversagen				
Universalmodell	(23)	333	0,927	6,77%
Visuelles Modell-II	(29)	81	0,940	5,77%
Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I	(39)	252	0,931	6,01%
<sup>1</sup> ein Tripel (=Ausreißer) in der Regression nicht berücksichtigt <sup>2</sup> mit quadratischem Term aus charakteristischer Brett-Zugfestigkeit				

4.2.1 Universalmodell

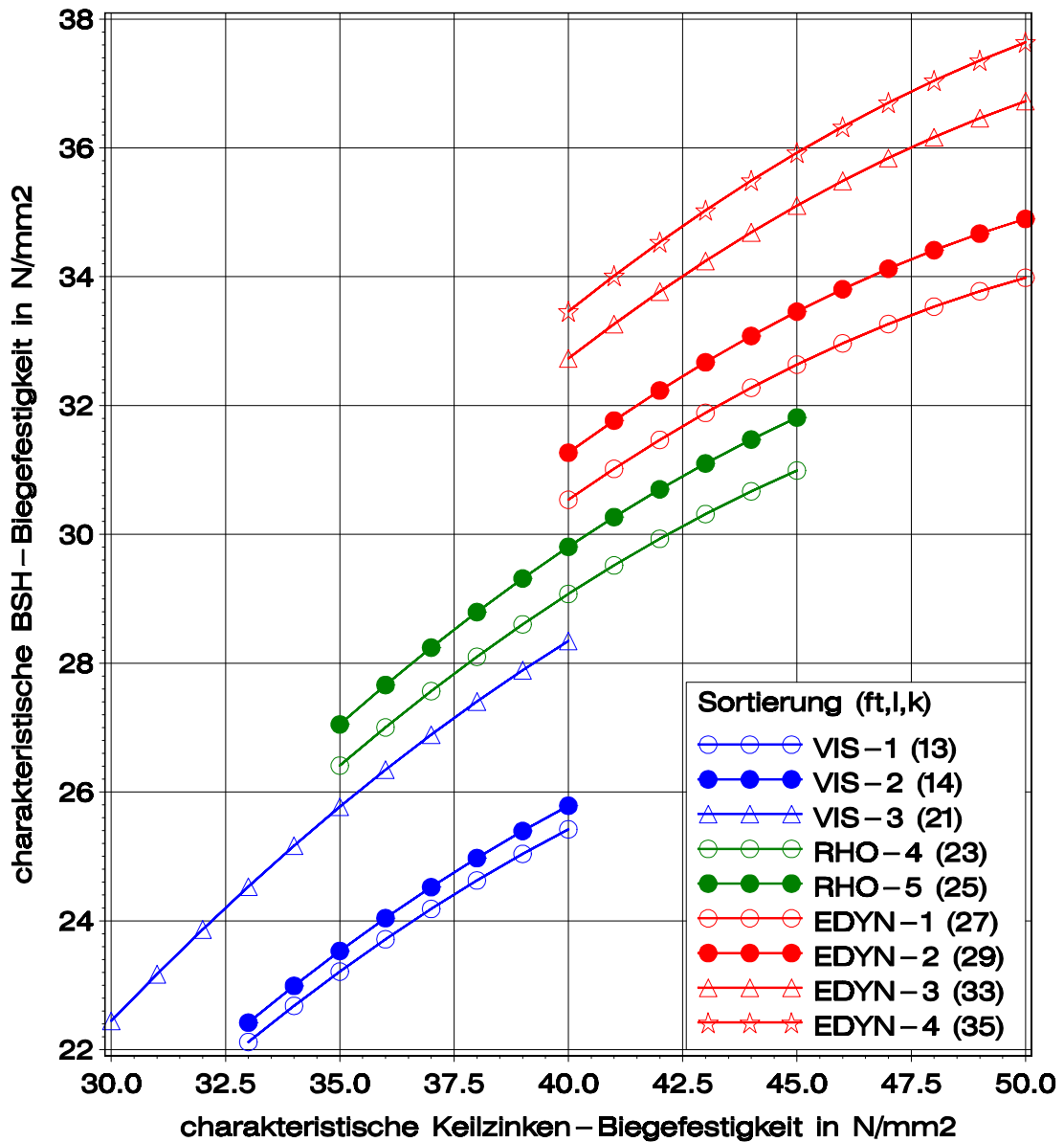


Bild 4-2 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (21)

$$f_{m,g,k} = -13,25 + 2,027 \cdot f_{t,j,k} - 0,02940 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,01279 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (20)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -13,25 + 1,448 \cdot f_{m,j,k} - 0,01500 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,009137 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (21)$$

$$f_{m,g,mean} = 7,08 + 0,940 \cdot f_{m,j,k} - 0,00994 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,0119 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (22)$$

$$\eta_{j,crack} \approx 109,0 - 2,39 \cdot f_{m,j,k} + 1,58 \cdot f_{t,\ell,k} \quad (23)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

$\eta_{j,crack}$  in %

## 4.2.2 Visuelles Modell-I

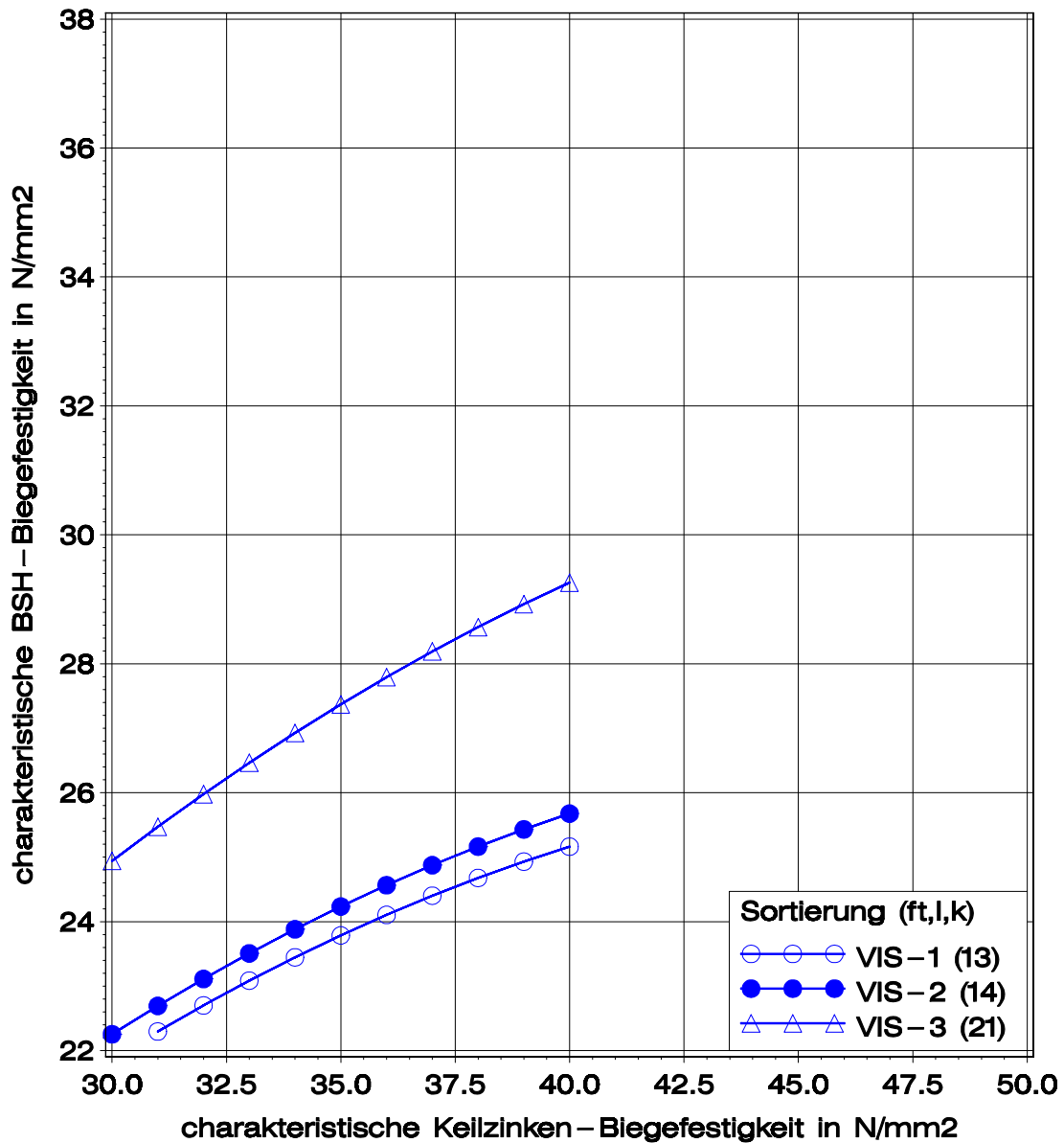


Bild 4-3 Charakteristische Brett-schichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (25)

$$f_{m,g,k} = -0,9721 + 1,287 \cdot f_{t,j,k} - 0,02117 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,01792 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (24)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -0,9721 + 0,9190 \cdot f_{m,j,k} - 0,01080 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,01280 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (25)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>



## 4.2.3 Visuelles Modell-II

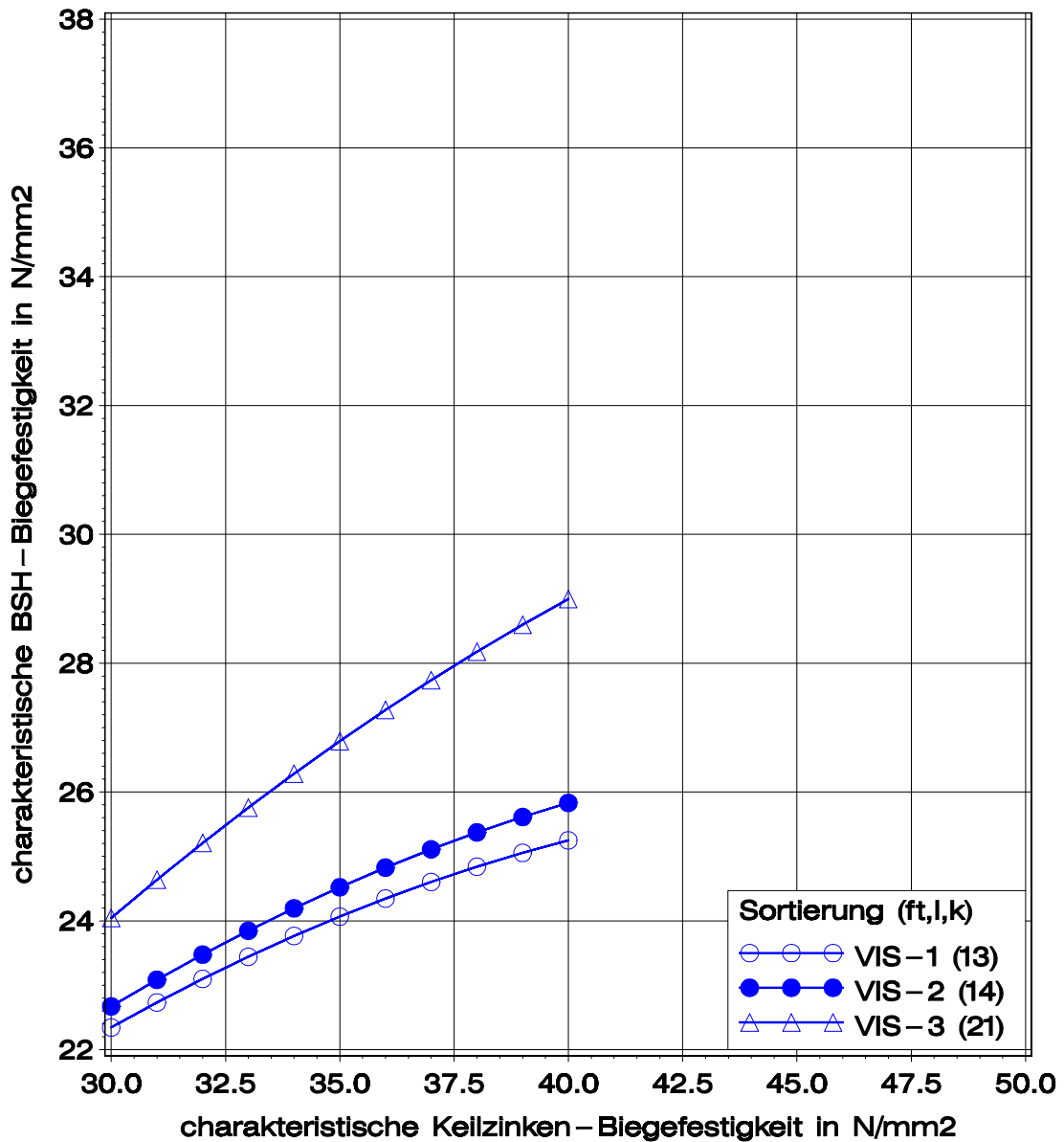


Bild 4-4 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (27)

$$f_{m,g,k} = 3,454 + 0,9975 \cdot f_{t,j,k} - 0,02113 \cdot f_{t,j,k}^2 - 0,01632 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,03582 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (26)$$

oder

$$f_{m,g,k} = 3,454 + 0,7125 \cdot f_{m,j,k} - 0,01078 \cdot f_{m,j,k}^2 - 0,01632 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,02558 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (27)$$

$$f_{m,g,mean} = 11,8 + 0,686 \cdot f_{m,j,k} - 0,00955 \cdot f_{m,j,k}^2 - 0,0108 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,0234 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (28)$$

$$\eta_{j,crack} \approx 93,5 - 2,35 \cdot f_{m,j,k} + 2,29 \cdot f_{t,\ell,k} \quad (29)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

$\eta_{j,crack}$  in %

## 4.2.4 Rohdichte-Modell

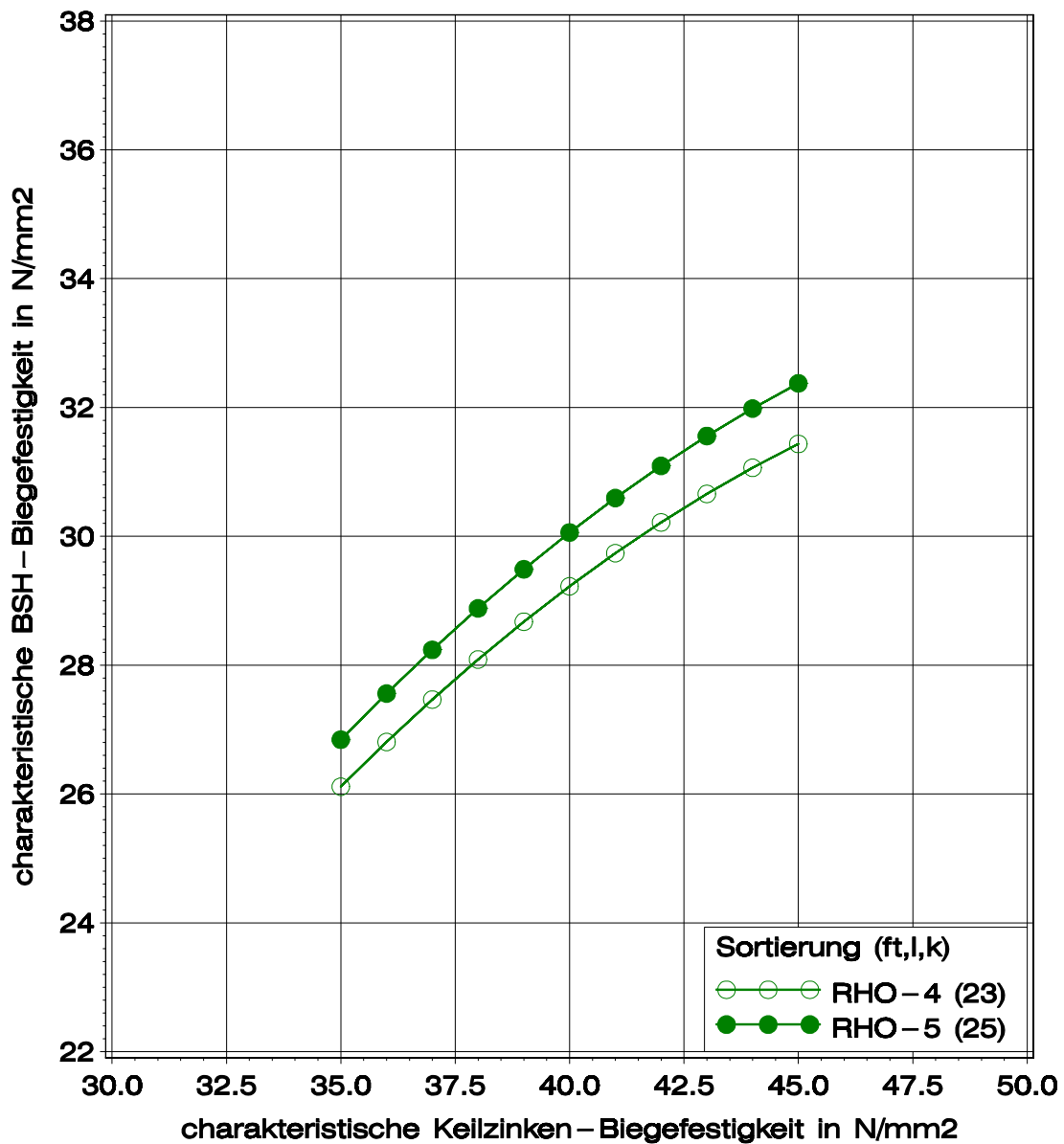


Bild 4-5 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (31)

$$f_{m,g,k} = -20,86 + 2,425 \cdot f_{t,j,k} - 0,03529 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,01461 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (30)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -20,86 + 1,732 \cdot f_{m,j,k} - 0,0180 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,01044 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (31)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

## 4.2.5 Dynamischer-E-Modul-Modell-I

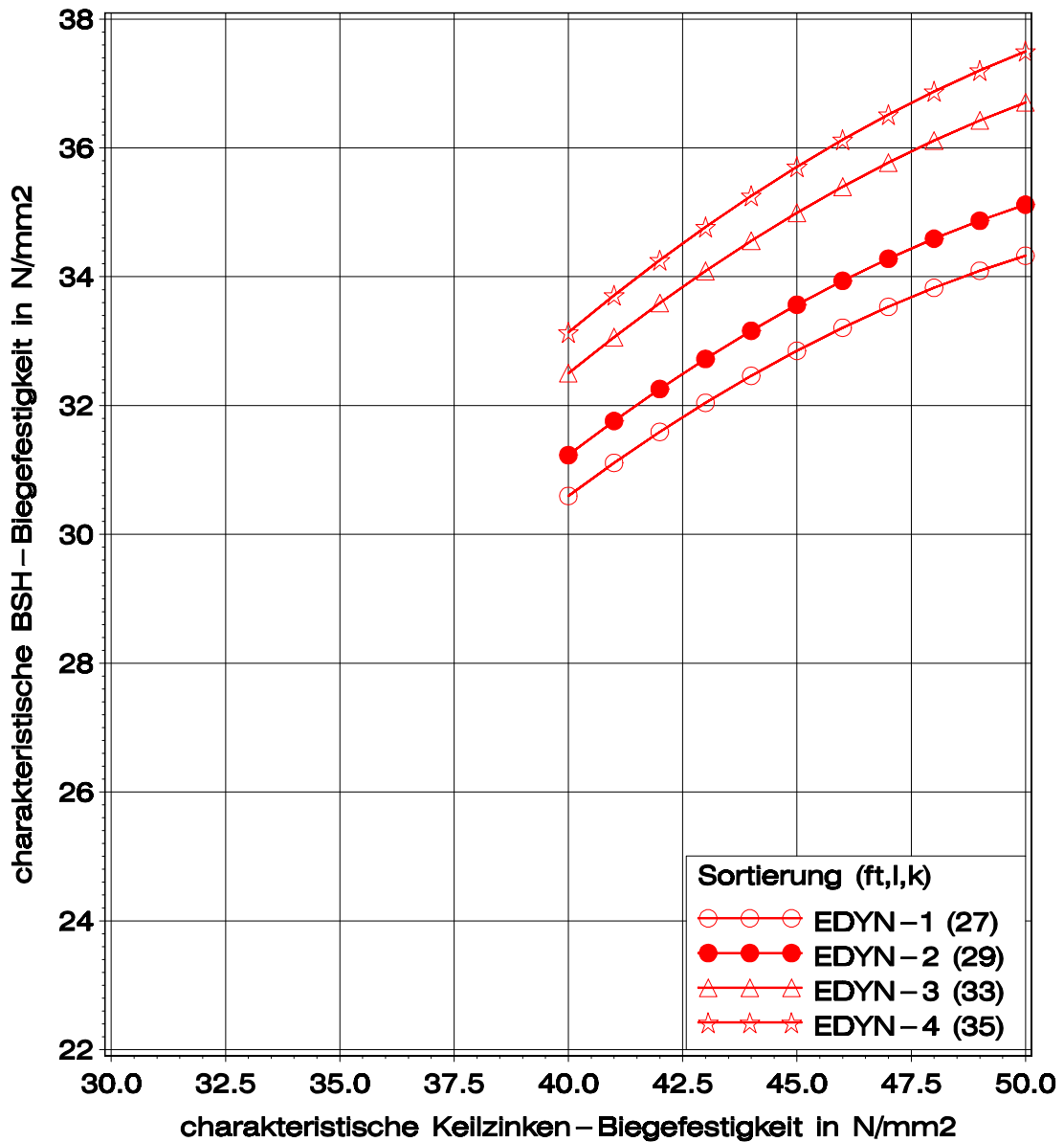


Bild 4-6 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (33)

$$f_{m,g,k} = -15,46 + 2,184 \cdot f_{t,j,k} - 0,03053 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,001111 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (32)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -15,46 + 1,560 \cdot f_{m,j,k} - 0,01557 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,007934 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (33)$$

Festigkeitswerte in N/mm²

## 4.2.6 Dynamischer-E-Modul-Modell-II

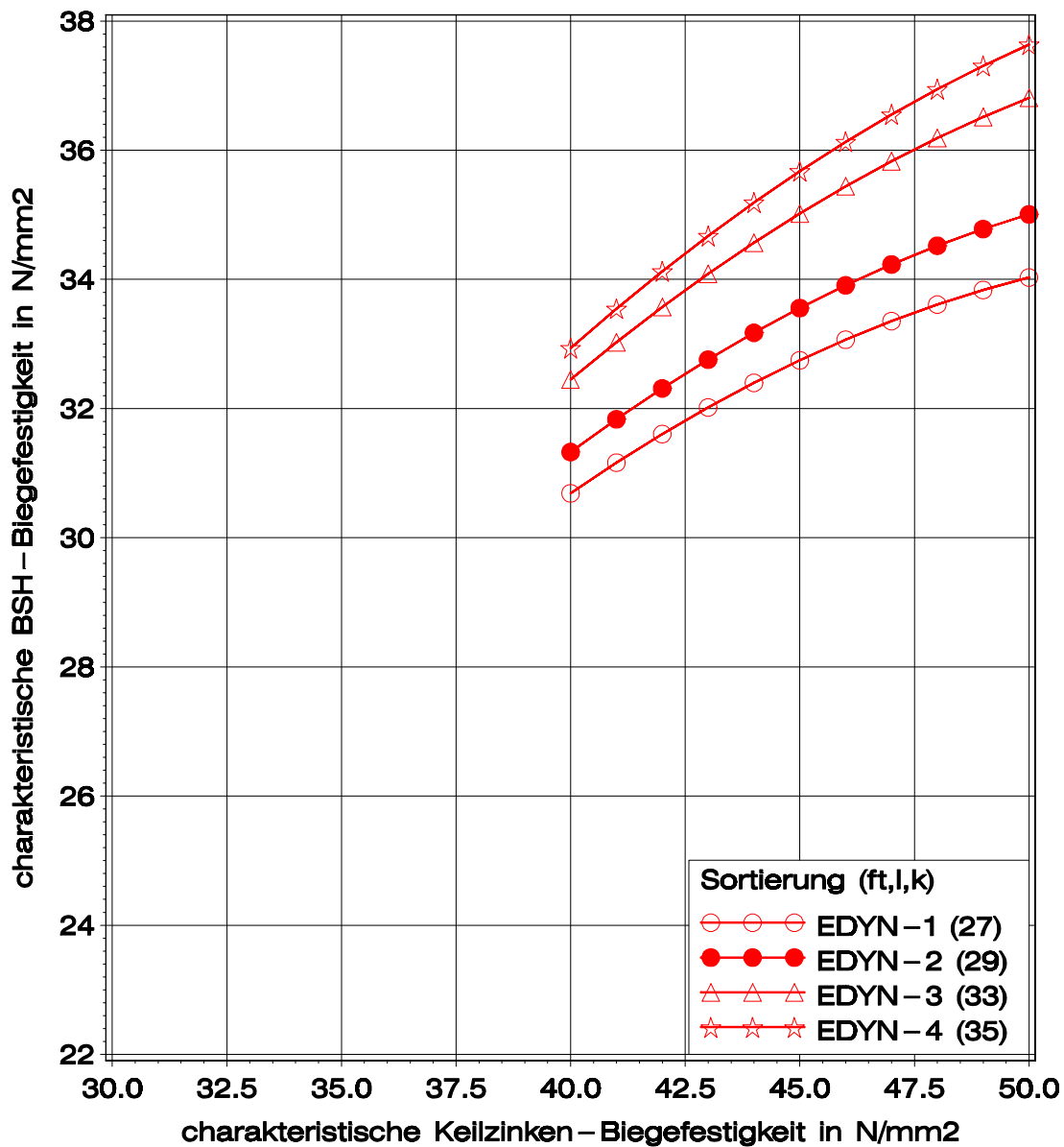


Bild 4-7 Charakteristische Brett-schichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (35)

$$f_{m,g,k} = -9,135 + 1,788 \cdot f_{t,j,k} - 0,03053 \cdot f_{t,j,k}^2 - 0,006424 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,02377 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (34)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -9,135 + 1,277 \cdot f_{m,j,k} - 0,01557 \cdot f_{m,j,k}^2 - 0,006424 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,01698 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (35)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

4.2.7 Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I

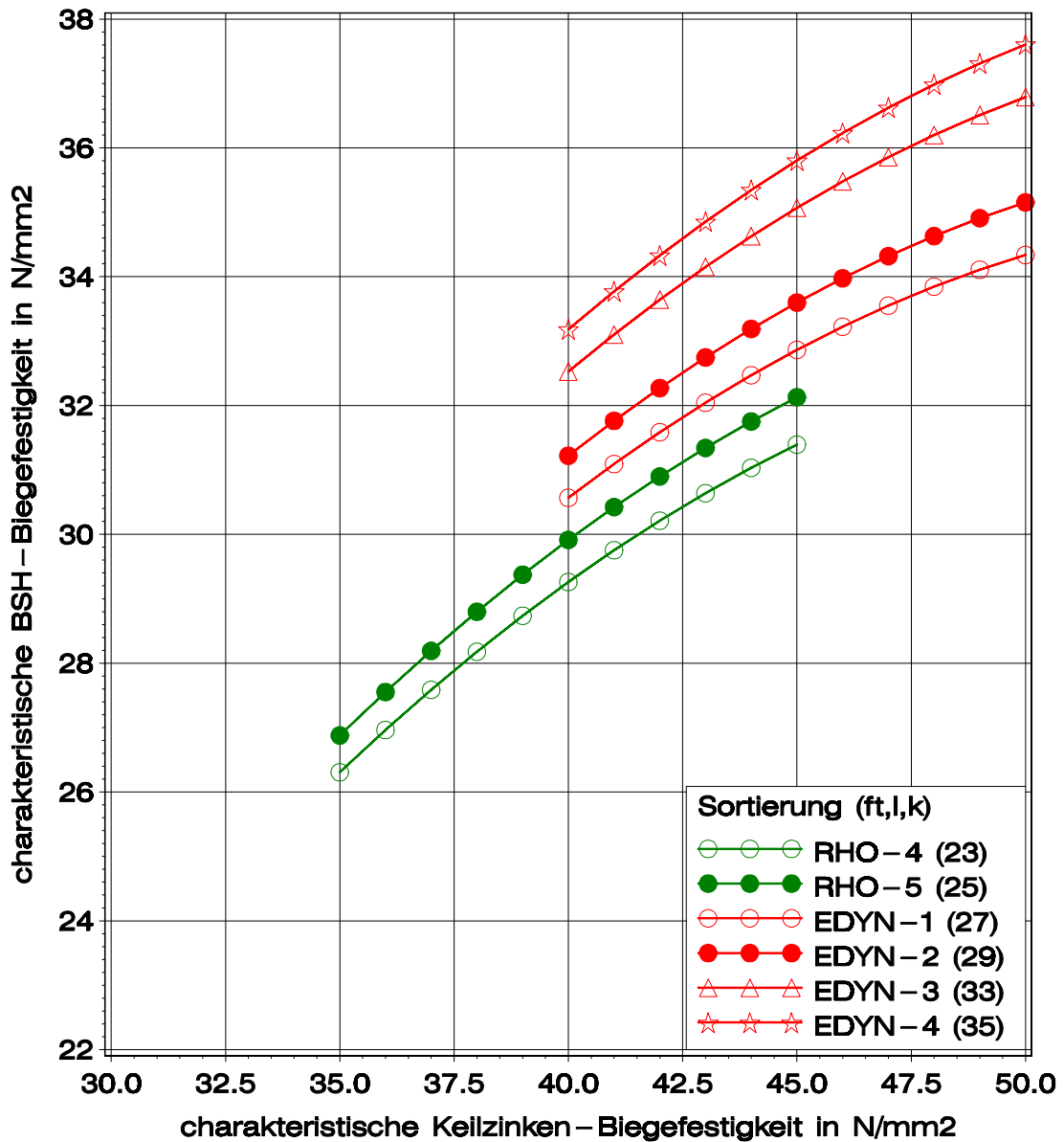


Bild 4-8 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (37)

$$f_{m,g,k} = -17,39 + 2,290 \cdot f_{t,j,k} - 0,03223 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,01144 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (36)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -17,39 + 1,636 \cdot f_{m,j,k} - 0,01644 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,008169 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (37)$$

$$f_{m,g,mean} = 6,49 + 1,04 \cdot f_{m,j,k} - 0,0101 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,00915 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (38)$$

$$\eta_{j,crack} \approx 131 - 2,40 \cdot f_{m,j,k} + 0,873 \cdot f_{t,\ell,k} \quad (39)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

$\eta_{j,crack}$  in %

## 4.2.8 Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-II

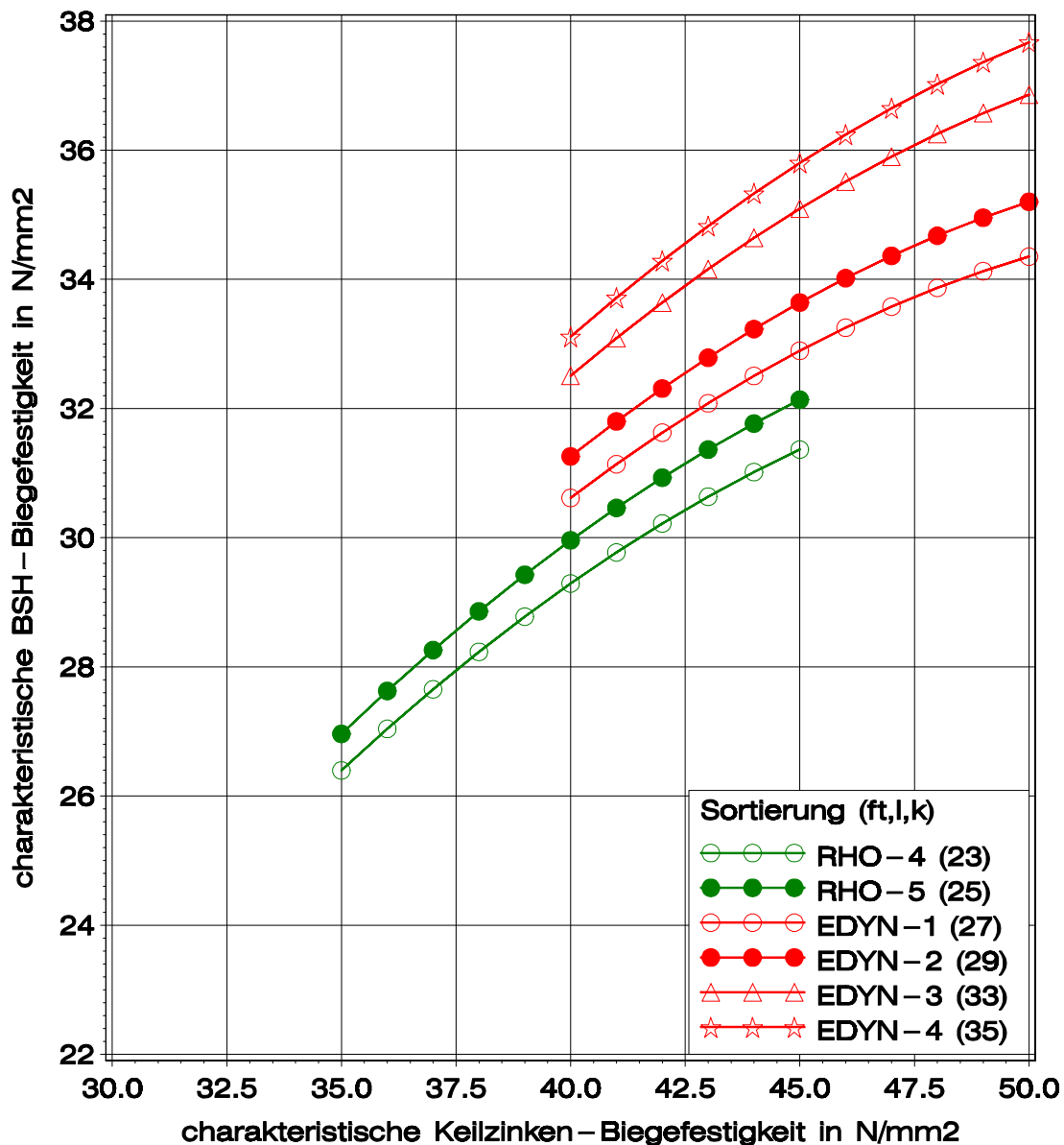


Bild 4-9 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (41)

$$f_{m,g,k} = -16,05 + 2,206 \cdot f_{t,j,k} - 0,03223 \cdot f_{t,j,k}^2 - 0,001593 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,01438 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (40)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -16,05 + 1,576 \cdot f_{m,j,k} - 0,01644 \cdot f_{m,j,k}^2 - 0,001593 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,01027 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (41)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

## 4.2.9 Statischer-E-Modul-Modell

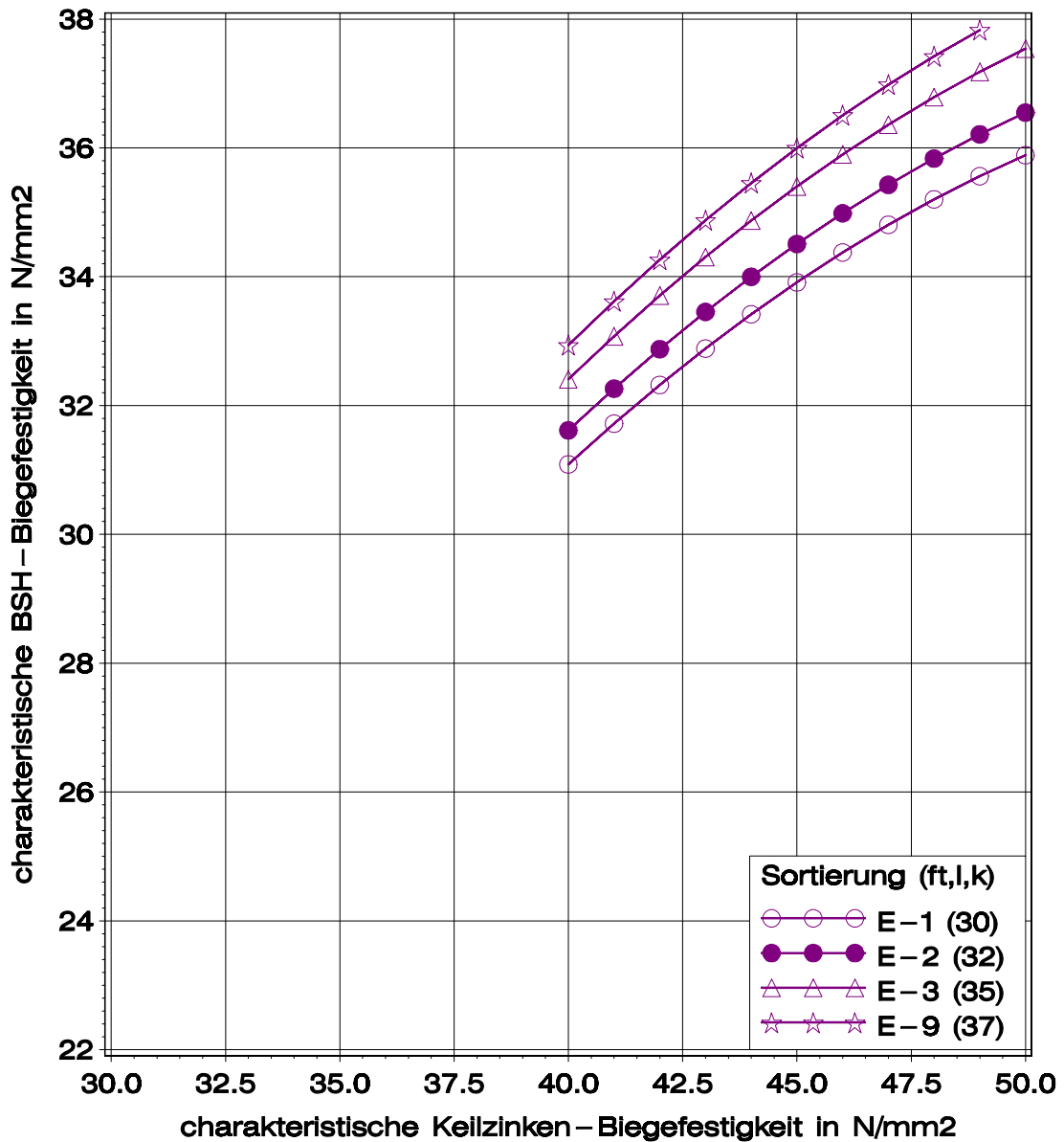


Bild 4-10 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (43)

$$f_{m,g,k} = -22,3 + 2,546 \cdot f_{t,j,k} - 0,03348 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,009257 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (42)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -22,3 + 1,819 \cdot f_{m,j,k} - 0,01708 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,006612 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (43)$$

Festigkeitswerte in N/mm²

## 4.2.10 Finnisches Universalmodell

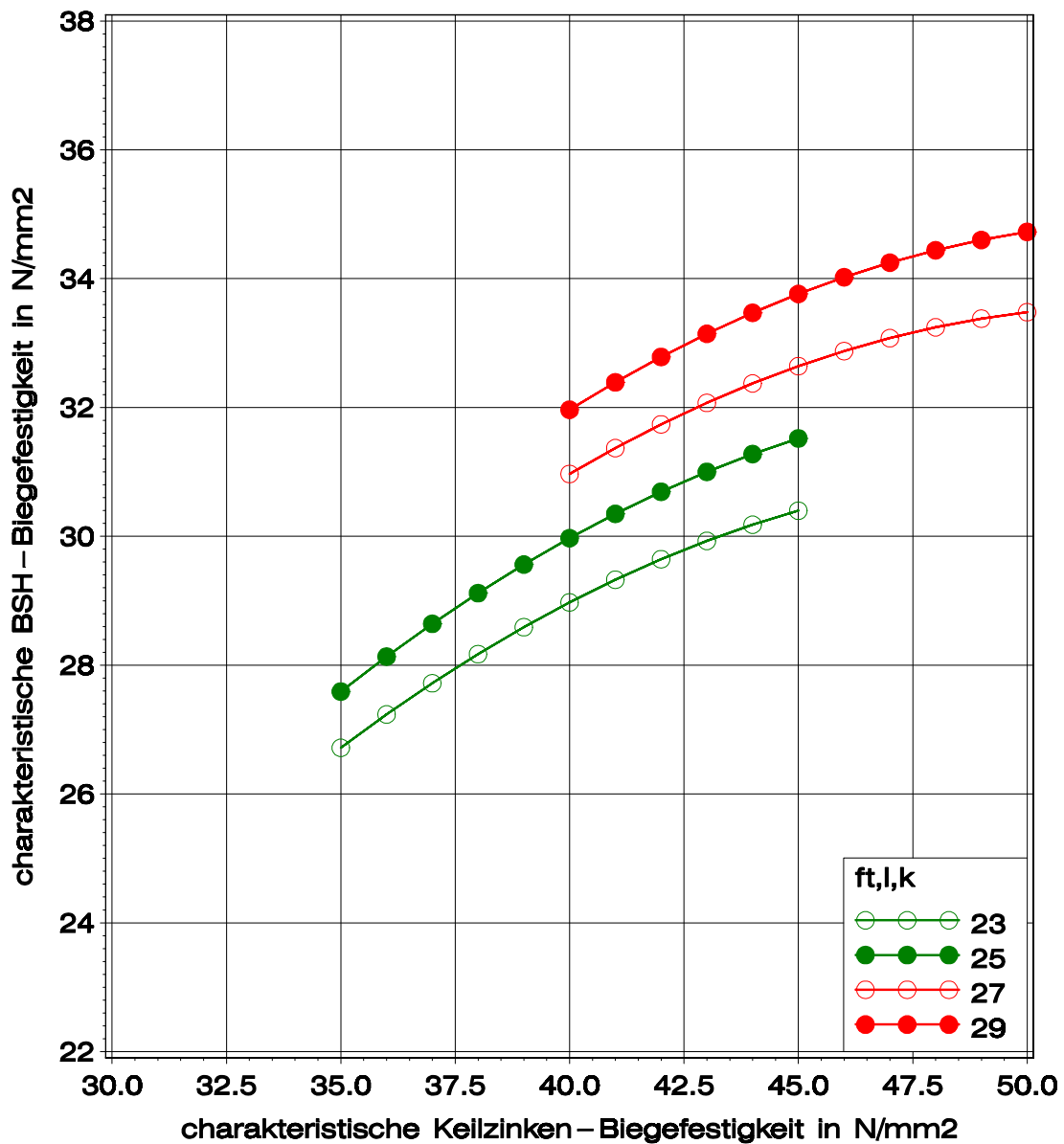


Bild 4-11 Charakteristische Brett-schichtholz-Biegefestigkeit über charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit; Darstellung von Gleichung (45)

$$f_{m,g,k} = -12,44 + 1,982 \cdot f_{t,j,k} - 0,03269 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,01744 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,l,k} \quad (44)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -12,44 + 1,416 \cdot f_{m,j,k} - 0,01668 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,01246 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,l,k} \quad (45)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>



### 4.3 Diskussion und Auswahl der relevanten Modelle

Für die Bestimmung der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit von homogen aufgebauten Querschnitten aus visuell sortierten Brettern ist das visuelle Modell-II, Gleichungen (26) oder (27), geeignet. Weder das Universalmodell noch das visuelle Modell-I ohne den quadratischen Term aus charakteristischer Brett-Zugfestigkeit beschreiben die simulierte charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit für niedrige charakteristische Keilzinkenfestigkeiten mit derselben Genauigkeit wie das visuelle Modell-II. Dieses gibt die im Anhang A 3 dargestellten simulierten Verläufe der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit für die drei visuellen Sortierverfahren mit einer einzigen Gleichung am besten wieder.

Selbstverständlich ist es für eine maschinell durchgeführte visuelle Sortierung, die hinsichtlich der Beschaffenheit des sortierten Brettmaterials (vgl. hierzu Tabelle 4-1) einer manuell durchgeführten visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 ebenbürtig ist, ebenso gültig. Die Forderung nach gleicher Beschaffenheit wirft natürlich die generelle Frage auf, wie die vielfältigen Brettsortimente, die bei der gleichzeitigen maschinellen Sortierung von z.B. drei Sortierklassen entstehen, hinsichtlich der Gültigkeit der Modellgleichung zu bewerten sind. Eine Antwort auf diese Frage gibt die vorliegende Arbeit nicht. Die Fragestellung kann aber Gegenstand zukünftiger Forschung werden.

Visuelle Sortierung:

$$f_{m,g,k} = 3,45 + 0,998 \cdot f_{t,j,k} - 0,0211 \cdot f_{t,j,k}^2 - 0,0163 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,0358 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (26)$$

oder

$$f_{m,g,k} = 3,45 + 0,713 \cdot f_{m,j,k} - 0,0108 \cdot f_{m,j,k}^2 - 0,0163 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,0256 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (27)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

Referenzhöhe: 600 mm

gültig für einen homogenen Aufbau

Der Vergleich zwischen den Modellen in den Abschnitten 4.2.4 bis 4.2.8 zeigt keine wesentlichen Unterschiede bezüglich der Kurvenverläufe. Es ist daher nahe liegend, die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit von homogen aufgebauten Querschnitten aus maschinell sortierten Brettern, das betrifft sowohl kombinierte visuelle und Rohdichte basierte als auch kombinierte visuelle und Elastizitätsmodul basierte Verfahren, mit dem Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I, Gleichung (36) oder (37), gleich zu behandeln. Ein quadratischer Term aus charakteristischer Brett-Zugfestigkeit ist offensichtlich entbehrlich.

Maschinelle Sortierung:

$$f_{m,g,k} = -17,4 + 2,29 \cdot f_{t,j,k} - 0,0322 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,0114 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (36)$$

oder

$$f_{m,g,k} = -17,4 + 1,64 \cdot f_{m,j,k} - 0,0164 \cdot f_{m,j,k}^2 + 0,00817 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (37)$$

Festigkeitswerte in N/mm<sup>2</sup>

Referenzhöhe: 600 mm

gültig für einen homogenen Aufbau

Zur Vereinfachung sei nun eine vom Sortierverfahren unabhängige Anwendung der zwei relevanten Modelle dadurch festgelegt, dass die Gleichungen (26) oder (27) bis zu einer charakteristischen Brett-Zugfestigkeit von etwa 21 N/mm<sup>2</sup> anzuwenden sind und darüber hinaus die Gleichungen (36) oder (37). Es entfällt damit die entwicklungsbedingte Kopplung zwischen den Modellgleichungen und den Sortierverfahren. Diese Kopplung wird durch die Gültigkeitsgrenze 21-22-N/mm<sup>2</sup> für die charakteristische Brett-Zugfestigkeit ersetzt.

Gleichung (26) oder (27) für  $13 \text{ N/mm}^2 \leq f_{t,\ell,k} \leq 21 \text{ N/mm}^2$

Gleichung (36) oder (37) für  $22 \text{ N/mm}^2 \leq f_{t,\ell,k} \leq 35 \text{ N/mm}^2$

Auf eine rein rechnerische Unstetigkeit in der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit im Übergangsbereich von 21 N/mm<sup>2</sup> und 22 N/mm<sup>2</sup> bei gleichen charakteristischen Keilzinkenfestigkeiten sei hingewiesen. Da aber bei maschinell sortierten Brettern höhere Keilzinkenfestigkeiten zu erwarten sind als bei visuell sortierten, ist diese Unstetigkeit bei der Festlegung von Anforderungen an Bretter und Keilzinken unbedeutend.

Da Modell 4.2.9 einen theoretischen Charakter hat, weil der Zug-Elastizitätsmodul, ermittelt nach EN 408, kein praktisch messbarer maschineller Sortierparameter ist, findet dieses Modell keine weitere Verwendung. Es wurde für Vergleichszwecke aufgeführt.

Das finnische Universalmodell in Abschnitt 4.2.10 stimmt mit dem Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I sehr gut überein. Damit wird deutlich, dass die von unterschiedlichen Forschungsstellen unabhängig voneinander entwickelten Sortierverfahren (s. Abschnitte 3.2.2 sowie 3.2.3) und ermittelten charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten auf sehr ähnliche Modelle führen. Dieser Vergleich stützt die Objektivität des Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I und seine umfassendere Gültigkeit.

#### **4.4 Einfluss des kombinierten Trägeraufbaus auf die Biegefestigkeit**

Ab einer gewissen Trägerhöhe werden Querschnitte mit einem kombinierten Aufbau bevorzugt. Die im Vergleich mit einem homogenen Aufbau anderen Verhältnisse der Elastizitätsmoduln bewirken vor allem eine höhere Biegebeanspruchung der Randlamellen im kombinierten Querschnitt, wenn in beiden Querschnitten ein betragsmäßig gleiches Biegemoment wirkt. Diese höhere Biegebeanspruchung kann anhand des Kernlamellenanteils  $\beta$  und anhand des Verhältnisses  $E_1/E_2$  auf der Grundlage der Verbundtheorie abgeschätzt werden. Der Kernlamellenanteil  $\beta$  und das Verhältnis  $E_1/E_2$  sowie die Zunahme der Randspannung beim kombinierten Querschnitt im Vergleich mit dem homogenen Querschnitt sind in Bild 4-12 erläutert. Diese Zunah-

me, ausgedrückt durch den Umrechnungsfaktor  $\mu$ , kann in Bild 4-13 in Abhängigkeit von  $\beta$  und vom Verhältnis  $E_1/E_2$  ermittelt werden.

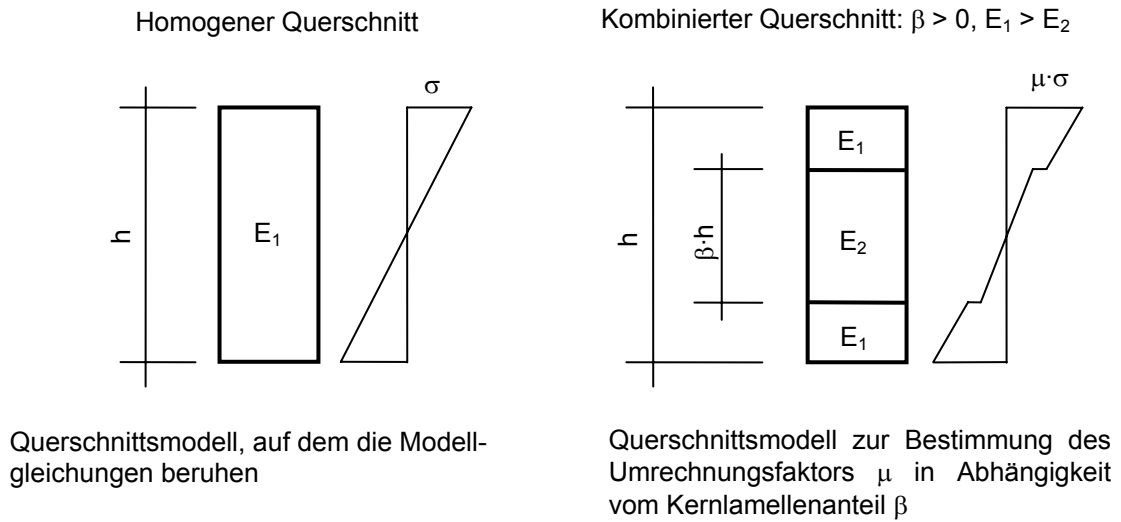


Bild 4-12 Biegerandspannung des homogenen Querschnitts im Vergleich mit der Biegerandspannung des kombinierten Querschnitts, wenn in beiden Querschnitten das betragsmäßig gleiche Biegemoment wirksam ist; Erläuterung der in Bild 4-13 verwendeten Bezeichnungen

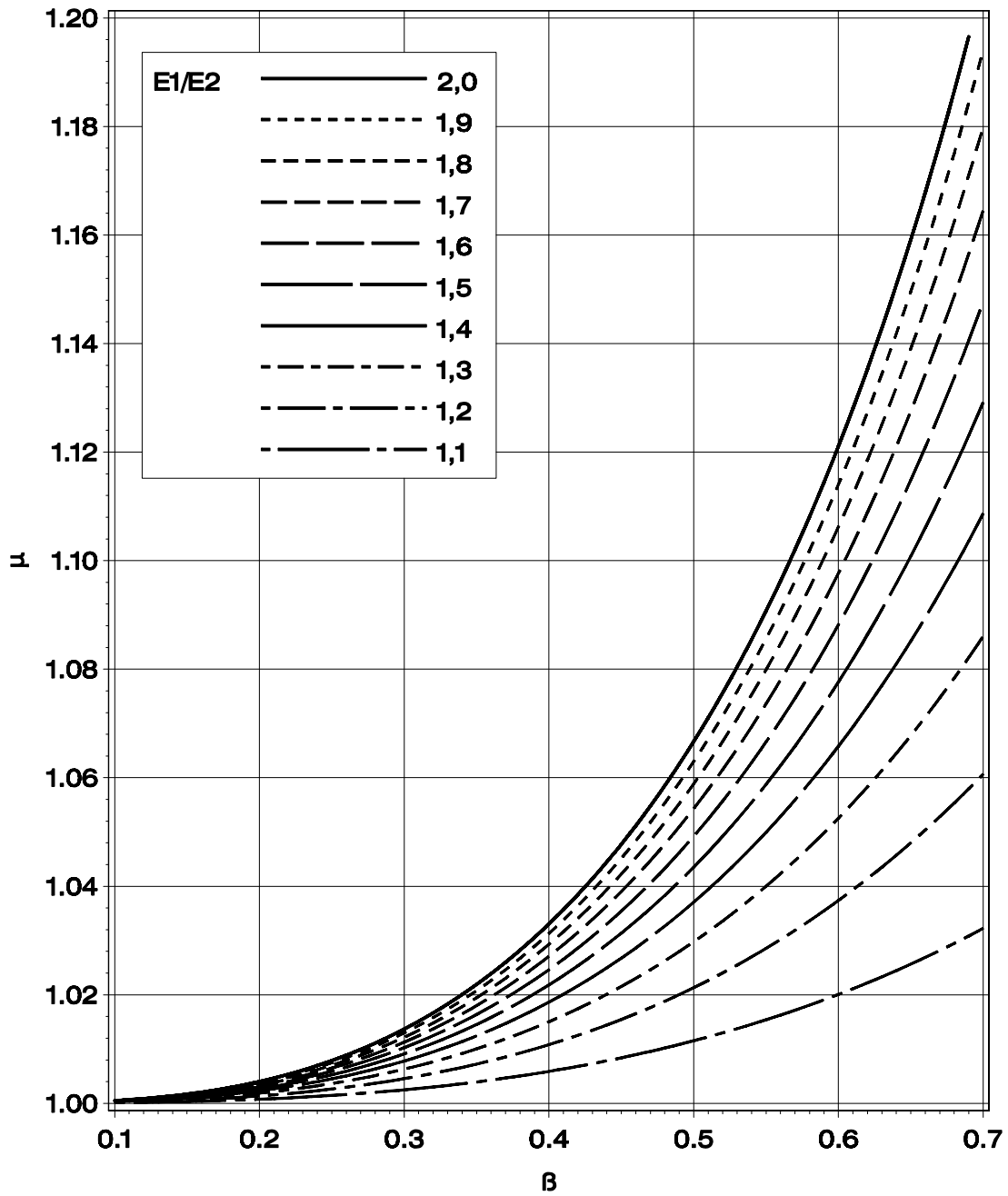


Bild 4-13 Umrechnungsfaktor  $\mu$  in Abhängigkeit vom Kernlamellenanteil  $\beta$  sowie in Abhängigkeit vom Verhältnis Elastizitätsmodul der Randlamellen ( $E_1$ ) zu Elastizitätsmodul der Kernlamellen ( $E_2$ )

#### 4.5 Einfluss der Trägerhöhe und der Trägerlänge auf die Biegefestigkeit

Die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit, die mit den Modellen in Abschnitt 4.3 ermittelt wird, bezieht sich auf einen Referenzträger mit 600 mm Höhe und 10,8 m Stützweite (18fache Höhe), der in den Drittelpunkten mit gleich großen Einzellasten belastet ist. Träger mit davon abweichenden Maßen werden andere charakteristische Biegefestigkeiten besitzen. Diese Änderung wird z.B. in DIN 1052 oder EN 1995-1-1 mit dem  $k_h$ -Faktor berücksichtigt, allerdings nur bei Trägerhöhen kleiner 600 mm. Die Festigkeitsabnahme bei Trägerhöhen über 600 mm muss vom Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  aufgefangen werden (DIN 1055-100, S. 20)!

Hier wird mit dem Rechenmodell untersucht, bei welcher Trägerhöhe, größer 600 mm, und Stützweite, 18fache Höhe, die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit einen Grenzwert erreicht. Zu diesem Zweck wurden sechs unterschiedliche Sortierverfahren ausgewählt. Es sind die Verfahren VIS-1, VIS-3, RHO-4, RHO-5, EDYN-2 und EDYN-4. Die Verfahren VIS-1 bzw. EDYN-4 wurden für GL24h bzw. GL36h angepasst. Die Verfahren VIS-3 und RHO-4 bzw. RHO-5 und EDYN-2 wurden für GL28h bzw. GL32h angepasst (Tabelle 4-4). Dafür waren die Sollwerte der charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit im Einzelnen so festzulegen, dass die Nennwerte der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit bei einer Trägerhöhe von 600 mm annähernd erfüllt werden.

Für alle sechs Sortierverfahren und für die Trägerhöhen 300, 600, 900, 1200, 1500 und 1800 wurden jeweils 200 Biegeversuche simuliert. Der Verlauf der mittleren und der charakteristischen Biegefestigkeit ist in Bild 4-14 dargestellt. Aus beiden Teilbildern wird deutlich, dass die Mittelwerte und die charakteristischen Werte ab einer Trägerhöhe von 1800 mm gegen Grenzwerte streben. In Bild 4-15 wird die charakteristische Biegefestigkeit durch den dimensionslosen  $k_h$ -Faktor ersetzt. Der Nenner, als jeweilige Bezugsgröße, wurde dabei so festgelegt, dass alle sechs Kurven bei 600 mm einen Wert von 1,0 für  $k_h$  besitzen. In Bild 4-16 ersetzt eine einzige Regressionskurve mit der Gleichung (46) die einzelnen Verläufe in Bild 4-15. Diesem Verlauf entsprechend erreicht der  $k_h$ -Faktor bei einer Trägerhöhe von 1800 mm seinen Grenzwert von 0,85. Die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit beträgt dann 85% des Referenzwertes.

$$k_h = 1,19 - 3,73 \cdot 10^{-4} \cdot h + 1,04 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 \quad h \text{ in mm} \quad (46)$$

Tabelle 4-4 Zuordnung der untersuchten Sortierverfahren zu beabsichtigten Festigkeitsklassen

Sortierverfahren	Zielgröße
VIS-1	GL24h
VIS-3 und RHO-4	GL28h
RHO-5 und EDYN-2	GL32h
EDYN-4	GL36h

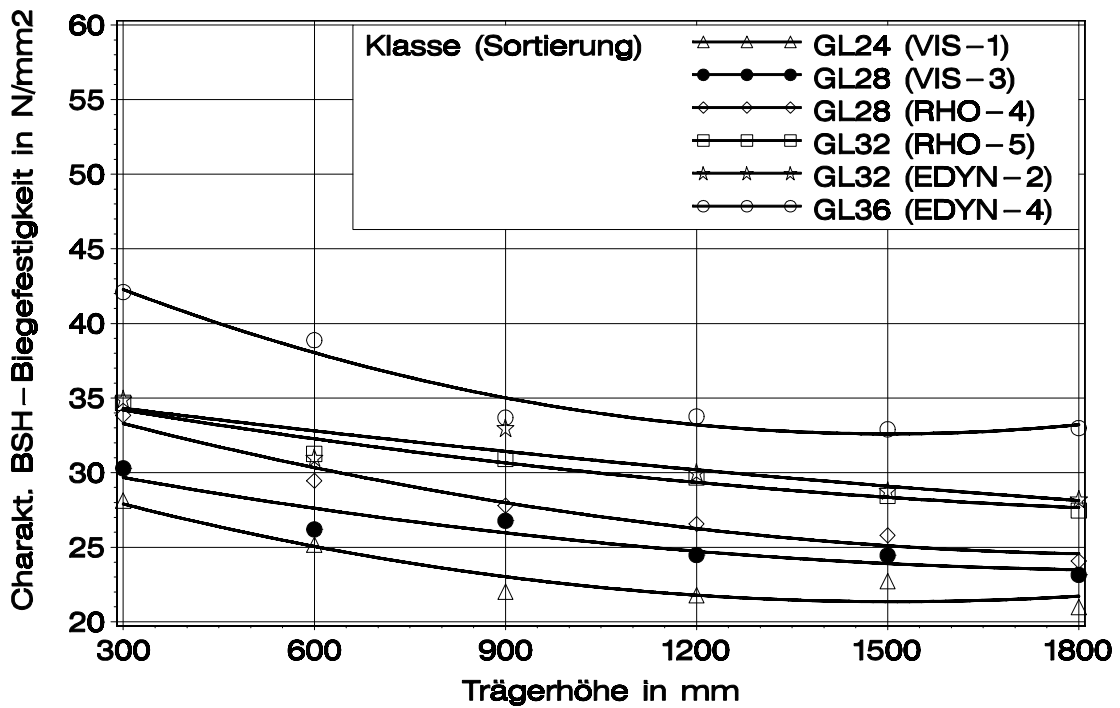
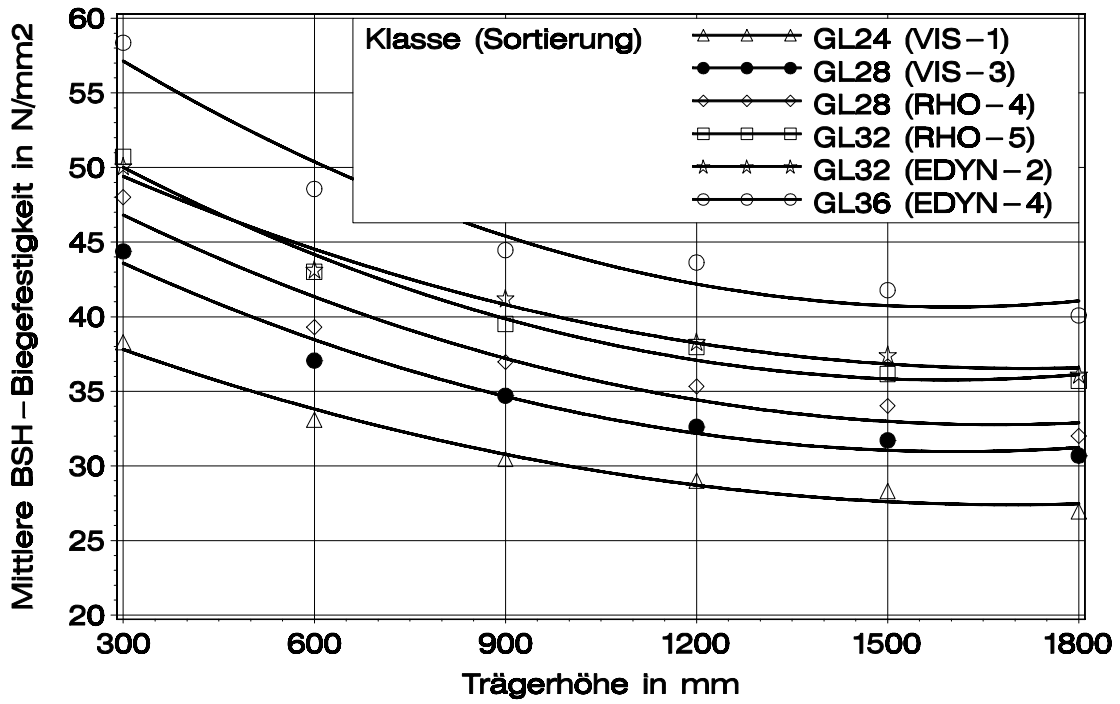


Bild 4-14 Simulierte mittlere Brettschichtholz-Biegefestigkeit (oben) und simulierte charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit (unten) in Abhängigkeit von der Trägerhöhe

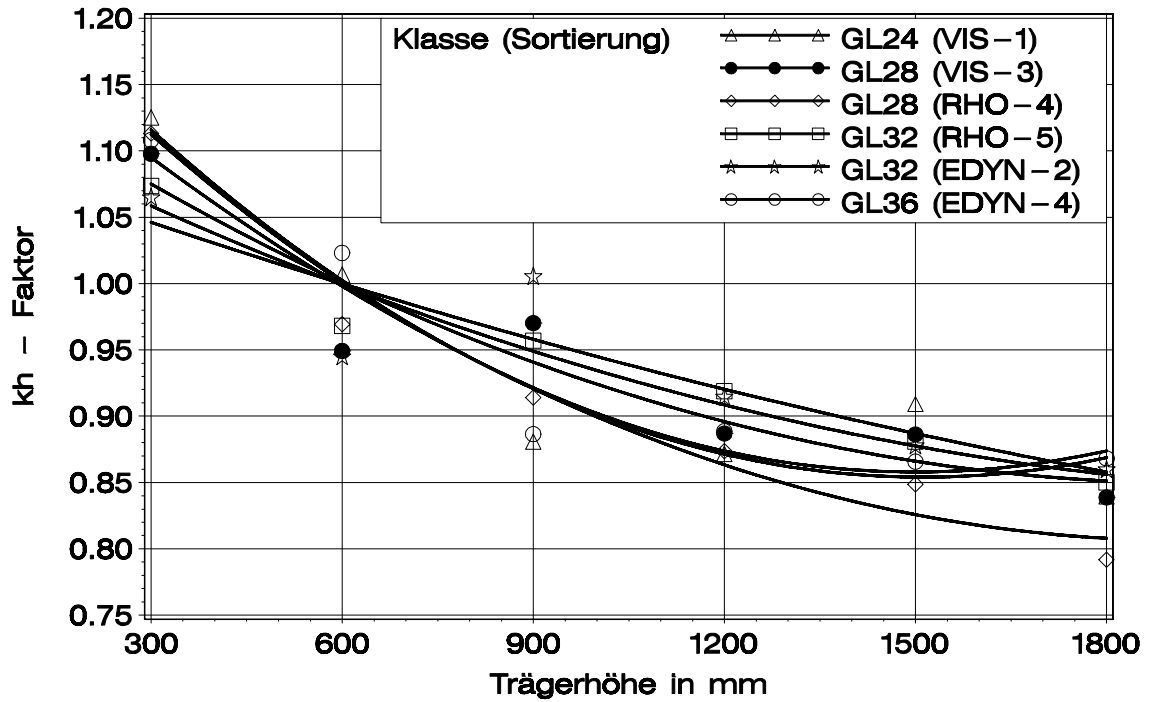


Bild 4-15  $k_h$ -Faktor in Abhängigkeit von der Trägerhöhe; individuelle Regressionskurven für jedes Sortierverfahren; bei allen Kurven  $k_h = 1,0$  für  $h = 600$  mm

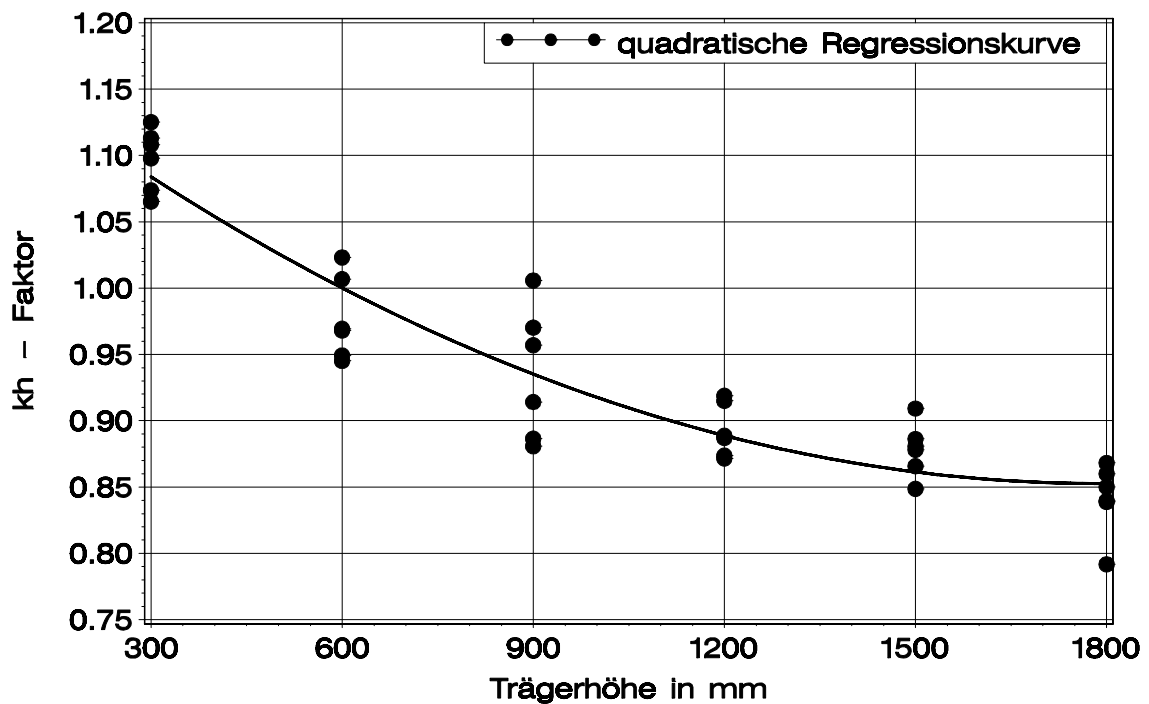


Bild 4-16  $k_h$ -Faktor in Abhängigkeit von der Trägerhöhe; gemeinsame quadratische Regressionskurve gemäß Gleichung (46); Sie ist an alle Werte bzw. Sortierverfahren in Bild 4-15 angepasst. Die unterschiedlichen Symbole in Bild 4-15 werden in diesem Diagramm einheitlich als Punkte wiedergegeben.

#### 4.6 Beispiel für einen kombinierten Träger der Klasse GL32c

In diesem Beispiel wird gezeigt, wie mit den Angaben in den Abschnitten 4.3 bis 4.5 Anforderungen an die charakteristische Brett-Zugfestigkeit und die charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit für Brettschichtholzträger zu ermitteln sind. Das Beispiel bezieht sich damit auf die in der Einleitung gestellte Aufgabe, geeignete Anforderungen für Brettschichtholzklassen festzulegen. Daneben soll es die Transparenz der vorgeschlagenen Festigkeitsmodellierung verdeutlichen.

Angaben:

Klasse GL32c

Trägerhöhe 1200 mm

Maschinell sortierte Bretter

Kombinierter Aufbau mit  $\beta = 67\%$

geschätzt  $E_1/E_2=1,2$

Anforderungen:

Mit Bild 4-13  $\rightarrow$  Umrechnungsfaktor  $\mu = 1,055$

Die erforderliche charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit ergibt sich damit zu:

$$\text{erforderlich } f_{m,g,k} = \mu \cdot 32 = 1,055 \cdot 32 = 33,8 \text{ N/mm}^2.$$

Mit Gleichung (37) erfüllen die Werte  $f_{t,l,k} = 29 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{m,j,k} = 46 \text{ N/mm}^2$  diese Forderung. Mit Gleichung (39) beträgt der Anteil Keilzinkenversagen etwa 46%. Das spricht für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den beiden Werten Brett- und Keilzinkenfestigkeit.

$$f_{m,g,k} = -17,4 + 1,64 \cdot 46 - 0,0164 \cdot 46^2 + 0,00817 \cdot 46 \cdot 29 = 34,0 \geq 33,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\eta_{j,\text{crack}} \approx 131 - 2,40 \cdot 46 + 0,873 \cdot 29 = 46\%$$

Im Vergleich mit dem kombinierten Aufbau ergeben die Werte  $f_{t,l,k} = 27 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{m,j,k} = 43 \text{ N/mm}^2$  für einen homogenen Aufbau:

$$f_{m,g,k} = -17,4 + 1,64 \cdot 43 - 0,0164 \cdot 43^2 + 0,00817 \cdot 43 \cdot 27 = 32,0 \text{ N/mm}^2,$$

$$\eta_{j,\text{crack}} \approx 131 - 2,40 \cdot 43 + 0,873 \cdot 27 = 51\%.$$

Dieses Ergebnis ist erwartungsgemäß (vgl. Bild 4-8).

Bei einer Trägerhöhe von beispielsweise 1200 mm könnte gemäß Bild 4-16 ein  $k_h$ -Faktor von 0,89 für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit zusätzlich berücksichtigt werden. Damit würde das Sicherheitsniveau im Vergleich mit 600 mm hohen Trägern nicht sinken. Für die Berechnung des Bemessungswertes der Biegefestigkeit beträgt dann die effektive charakteristische Brettschichtholzbiegefestigkeit:

$$f_{m,g,k,\text{eff}} = k_h \cdot f_{m,g,k} = 0,89 \cdot 32 = 28,5 \text{ N/mm}^2.$$



## 4.7 Verifikation der Modelle

### 4.7.1 Collings Modell

Anhand der Anforderungen gemäß EN 1194 und DIN 1052 an Bretter und Keilzinken (vgl. Tabelle 2-1) werden die Modellgleichungen (27) (visuelles Modell-II) und (37) (Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I) Collings Modell gegenübergestellt. Der Vergleich in Tabelle 4-5 zeigt für die vier Wertepaare überraschend gute Übereinstimmung, wenn man bedenkt, dass beide Festigkeitsmodelle, Collings und das hier vorgeschlagene, einen unterschiedlichen technischen Entwicklungshintergrund haben. Die Quotienten aus Modell- und Vergleichswert stehen in der letzten Spalte jeweils in Klammern. Das gilt auch für die folgenden tabellarischen Vergleiche.

Tabelle 4-5 Übereinstimmung mit Collings Modell

Collings Modell				Modellwerte
Brettklasse	$f_{t,t,k}$ EN 1194 N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,j,k}$ DIN 1052 N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,g,k}$ nach Bild 2-3 N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,g,k}$ Gleichung (27) N/mm <sup>2</sup>
C24	14,5	30	21,8	22,9 (1,05)
C30	18	35	25,7	26,0 (1,01)
				Gleichung (37)
C35	22	40	29,3	28,9 (0,99)
C40	26	45	32,9	32,5 (0,99)

### 4.7.2 Versuche aus den Abschnitten 2.1 und 2.2

Bei den 19 Biegefestigkeiten für GL32c beträgt das theoretische 5%-Quantil 27,1 N/mm<sup>2</sup> (Bild A-5 oben). Das 95%-Vertrauensintervall ist [23,8 N/mm<sup>2</sup>; 29,1 N/mm<sup>2</sup>]. Bei diesen Versuchsträgern ist – eine wirksame maschinelle Sortierung vorausgesetzt – anzunehmen, dass Brettmaterial und Keilzinken mindestens die Anforderungen 22 N/mm<sup>2</sup> bzw. 40 N/mm<sup>2</sup> erfüllten. Dann beträgt der Modellwert mit Gleichung (37) 28,9 N/mm<sup>2</sup>. Mit dem Umrechnungsfaktor  $\mu \approx 1,04$  für einen kombinierten Aufbau wegen  $\beta = 0,60$  und  $E_1/E_2=1,2$  folgt:

$$f_{m,g,k} = \frac{28,9}{1,04} = 27,8 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \frac{27,8}{27,1} = 1,03.$$

Der Modellwert 27,8 N/mm<sup>2</sup> liegt im 95%-Vertrauensintervall. Er übersteigt das theoretische 5%-Quantil von 27,1 N/mm<sup>2</sup> um lediglich 3%.

Für die 19 Biegefestigkeiten für GL36c gilt sinngemäß: theoretisches 5%-Quantil 27,6 N/mm<sup>2</sup> (Bild A-5 unten); 95%-Vertrauensintervall [22,7 N/mm<sup>2</sup>; 30,7 N/mm<sup>2</sup>]; Brettmaterial und Keilzinken erfüllten mindestens die Anforderungen 26 N/mm<sup>2</sup> bzw. 45 N/mm<sup>2</sup>. Modellwert:

$$f_{m,g,k} = \frac{32,5}{1,04} = 31,3 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \frac{31,3}{27,6} = 1,13.$$

Dieser übersteigt geringfügig die obere Grenze des Vertrauensintervalls und liegt sogar um 13% über dem theoretischen 5%-Quantil von 27,6 N/mm<sup>2</sup>. Hier ist die Prognose der Modellgleichung sogar um 13% höher als der Versuchswert.

Beide oben angeführte Vergleiche wurden mit Schätzwerten für die Festigkeit der Bretter und Keilzinken berechnet, und zwar unter der Annahme, dass die maschinelle Festigkeitssortierung und die Herstellbedingungen für die Keilzinkenproduktion zu den Mindestwerten 22/40 bzw. 26/45 führten. Grundsätzlich sollte man aber bei einer zuverlässigen maschinellen Festigkeitssortierung annehmen, dass die im Brettschichtholz wirksamen Festigkeiten von Brettern und Keilzinken sogar höher waren. Dann lägen die Modellwerte mehr als 3% bzw. 13% über den theoretischen 5%-Quantilen.

#### 4.7.3 Weitere Versuche

Für eine zuverlässige Überprüfung der Modelle wurden im Zuge dieser Forschungsarbeit im Juli 2008 noch weitere 40 Biegeversuche an Brettschichtholzträgern durchgeführt (Blaß et al. 2009). Um diese Überprüfung im Vorfeld besonders aussagekräftig anzulegen, wurden zusätzlich etliche Referenzproben für Bretter und Keilzinken entnommen, mit denen die charakteristischen Brett- und Keilzinken-Zugfestigkeiten, die in der Biegezugzone der Versuchsträger wirksam waren, sicher abgeschätzt werden konnten. Insofern waren bei der Festlegung der wirksamen Brett- und Keilzinken-Zugfestigkeiten im Gegensatz zu den zwei Vergleichen in Abschnitt 4.7.2 keine von der Zuverlässigkeit der maschinellen Sortierung abhängigen Annahmen erforderlich. Alle Referenzproben wurden so ausgewählt, dass sie die strukturellen und mechanischen Eigenschaften des Brettmaterials in der Biegezugzone der Träger bestmöglich repräsentierten.

##### 4.7.3.1 Material, Methoden und Ergebnisse

20 Träger entsprachen hinsichtlich des Aufbaus der Festigkeitsklasse GL32c. Neben den Brettern für die Biegezugzone der Versuchsträger wurde Material für 108 Brett- und 82 Keilzinken-Zugproben sortiert. Dazu diente eine kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung in die Festigkeitsklasse C35: Die Bretter sollten mindestens der Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1 entsprechen und abhängig von ihrer Breite und Dicke, 110 mm bzw. 44,5 mm, eine Bruttorehdichte größer gleich 450 kg/m<sup>3</sup> aufweisen.

Weitere 20 Träger entsprachen der Festigkeitsklasse GL36c. Hier wurden zusätzlich zum Materialbedarf für die Biegezugzone Bretter für 100 Brett- und 77 Keilzinken-Zugproben sortiert. Für die maschinelle Sortierung wurde die Sortiermaschine Golden Eye MS 80/2, basierend auf Röntgentechnologie, verwendet.

Das Brettmaterial für die GL32c-Träger und die entsprechenden Referenzproben war mitteleuropäischer und dasjenige für die GL36c-Träger und ihre Referenzproben skandinavischer Herkunft. Der Hersteller der Versuchsträger aus den Abschnitten 2.1 und 2.2 und derjenige der 40 weiteren Versuchsträger waren nicht identisch. Den

Aufbau der kombinierten Träger zeigt Bild A-2. Alle Träger hatten eine Höhe von 600 mm, eine Breite von 100 mm. Die Stützweite betrug 10,8 m. Die Biegeversuche wurden gemäß EN 408 mit Lasteinleitung in den Drittelpunkten durchgeführt.

Bild 4-17 zeigt die Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul für alle 40 Träger. Hinsichtlich der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls liegt eine klare Trennung zwischen beiden Kollektiven, GL32c und GL36c, vor. In Bild 4-18 sind die Verteilungen der Biegefestigkeit der GL32c- und GL36c-Träger dargestellt. Das empirische 5%-Quantil – in beiden Proben der Kleinstwert – beträgt für GL32c 25,8 N/mm<sup>2</sup> und für GL36c 38,2 N/mm<sup>2</sup>. Die 95%-Vertrauensgrenzen sind [21,0 N/mm<sup>2</sup>; 27,6 N/mm<sup>2</sup>] bzw. [33,7 N/mm<sup>2</sup>; 38,4 N/mm<sup>2</sup>]. Unter der Annahme normalverteilter Werte beträgt das theoretische 5%-Quantil für GL32c 25,2 N/mm<sup>2</sup> (s. Bild 4-18 oben) und für GL36c 36,7 N/mm<sup>2</sup> ( $= 41,9 - 1,65 \cdot 3,17$ ).

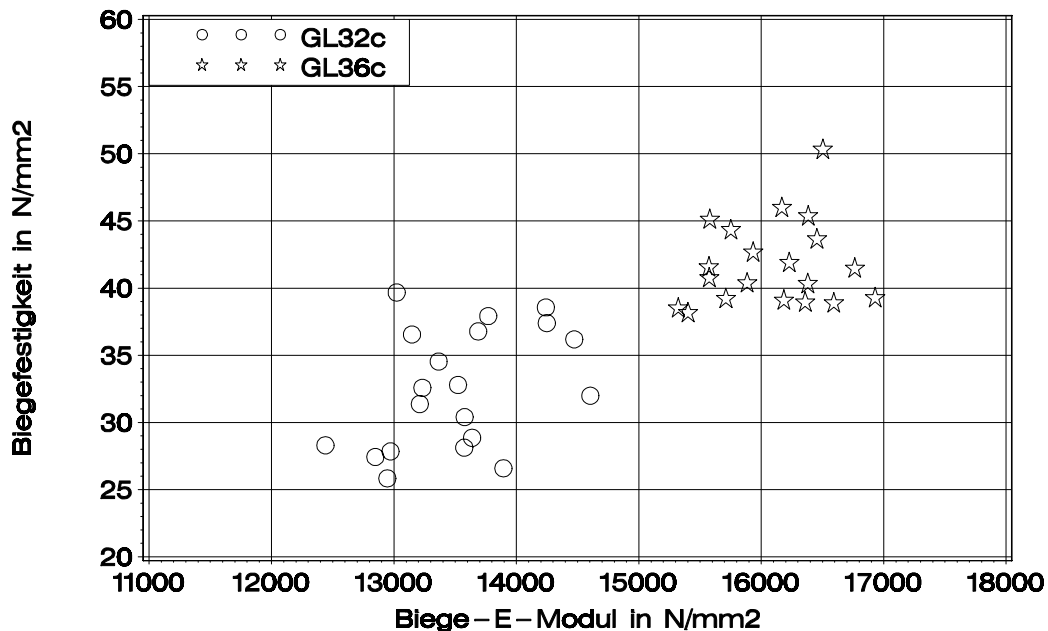


Bild 4-17 Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul

Bild A-75 zeigt die Verteilungen des Biege-Elastizitätsmoduls für beide Festigkeitsklassen. Für die GL32c-Träger beträgt der Mittelwert 13.521 N/mm<sup>2</sup>. Das sind 99% des Rechenwertes für die Festigkeitsklasse GL32c. Überraschend hoch ist der Mittelwert der GL36c-Träger, der mit 16.084 N/mm<sup>2</sup> den Rechenwert um etwa 10% übersteigt.

In Tabelle A-8 bzw. Tabelle A-9 sind die Biegefestigkeit, Beobachtungen und Positionen der lokalen Bruchstellen für die GL32c- bzw. GL36c-Träger zusammengestellt. In beiden Tabellen befinden sich Verweise auf ausgewählte Fotografien (Bild A-76 bis Bild A-98), die das Biegeversagen der einzelnen Träger zeigen. Um die Position einer lokalen Bruchstelle im Träger zu dokumentieren, wurde die Stützweite der Träger in 72 Spalten mit 15 cm Länge unterteilt. Die Positionen 1 bis 24 bzw. 49 bis 72 sind demnach die Spalten von einem Auflager bis zur ersten Lasteinleitung und von

der zweiten bis zum anderen Auflager. Die Positionen 25 bis 48 entsprechen den 24 Spalten im mittleren Drittel. Hier ist die Biegezugbeanspruchung der Randlamellen am höchsten. Erwartungsgemäß wurden die meisten Bruchstellen im mittleren Drittel (Pos. 25 bis 48) beobachtet. Auf die Gleichheit der Verhältnisse zwischen den experimentellen Beobachtungen und Bild 3-19, in dem Ergebnisse simulierter Biegeversuche dargestellt sind, sei hingewiesen.

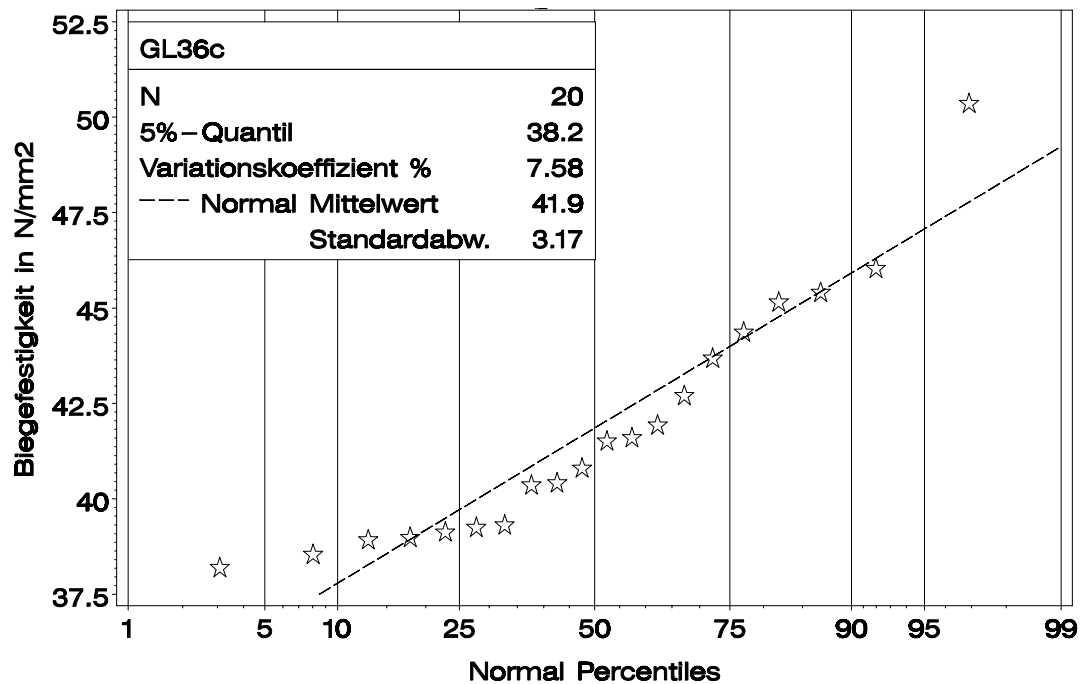
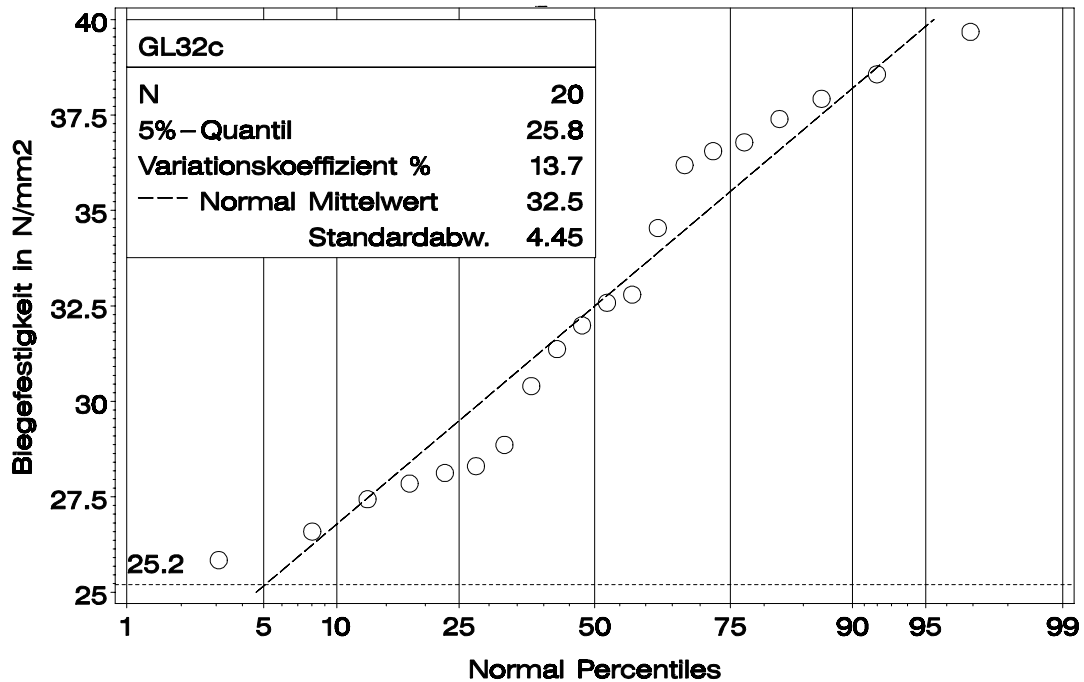


Bild 4-18 Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung der Biegefestigkeit; GL32c-Träger (oben) und GL36c-Träger (unten)

Die Verteilungen der Zugfestigkeiten für die Referenzproben sind im Bild A-99 und Bild A-100 dargestellt. Die empirischen 5%-Quantile für Brett- und Keilzinken-Zugfestigkeit betragen im Falle von C35 17,7 bzw. 28,9 N/mm<sup>2</sup> und im Falle von C40 31,6 bzw. 38,6. Die Werte für die Brett-Zugfestigkeiten beziehen sich auf die tatsächliche Breite von 110 mm, und zwar ohne Umrechnung gemäß EN 384 auf eine Breite von 150 mm.

Anmerkung: Für das 5%-Quantil der Brett-Zugfestigkeit wäre für die kombinierte maschinelle und visuelle Sortierung in C35 ein Wert von 21 N/mm<sup>2</sup> erwartungsgemäß gewesen. Dass er tatsächlich nur bei 17,7 N/mm<sup>2</sup> liegt, ist auf etliche Astansammlungen zurückzuführen, deren DAB-Werte größer 0,50 sind (s. Bild A-101). Das Brettmaterial entsprach damit nicht der Sortierklasse S10. Für eine korrekte Sortierung in S10, bei der DEB- und DAB-Werte kleiner gleich 0,33 bzw. 0,50 sind, betrüge das 5%-Quantil der Brett-Zugfestigkeit 20,0 N/mm<sup>2</sup> (s. Auswertung in Bild A-102). Das entspricht fast der Zielgröße von 21 N/mm<sup>2</sup>, die mit dem kombinierten maschinellen und visuellen Verfahren bei gegebenen Einstellwerten mindestens erreicht wird. Für die Überprüfung der Modelle ist der Unterschied zwischen 17,7 und 21 N/mm<sup>2</sup> bedeutungslos. Hierfür ist es nur notwendig, den Wert der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit der Bretter in der Biegezugzone anhand der Referenzproben so genau wie möglich abzuschätzen. Das Niveau ist dabei also unerheblich.

#### 4.7.3.2 Verifikation

Aus wissenschaftlicher Sicht ist es von Vorteil, dass die Modelle für zwei sehr unterschiedliche Brett- und Keilzinken-Zugfestigkeiten, 17,7 bzw. 28,9 N/mm<sup>2</sup> einerseits und 31,6 bzw. 38,6 N/mm<sup>2</sup> andererseits, überprüft werden.

Da 17,7 unterhalb der 21-22-N/mm<sup>2</sup>-Gültigkeitsgrenze liegt (vgl. Abschnitt 4.3), wird mit den drei Festigkeitswerten der GL32c-Träger für Bretter, Keilzinken und Biegefestigkeit das Modell für visuelle Sortierungen überprüft. Dass die Festigkeitswerte der Referenzproben und der GL36c-Träger unerwartet hoch sind, ermöglicht die Überprüfung des Modells für maschinelle Sortierung für außergewöhnlich hohe Werte.

Nachstehend die Verifikation mit den drei Festigkeitswerten der GL32c-Träger: Einsetzen von  $f_{t,\ell,k} = 17,7$  N/mm<sup>2</sup> und  $f_{t,j,k} = 28,9$  N/mm<sup>2</sup> in Gleichung (26) ergibt:

$$f_{m,g,k} = 3,454 + 0,9975 \cdot f_{t,j,k} - 0,02113 \cdot f_{t,j,k}^2 - 0,01632 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,03582 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} = 27,8 \text{ N/mm}^2.$$

Mit  $n = E_1/E_2 = 13704/10929 = 1,25$  (Verhältnis der dynamischen Elastizitätsmoduln der Bretter in den kombinierten Trägern) und  $\beta = 0,6$  beträgt der Umrechnungsfaktor  $\mu = 1,044$  (Bild 4-13) und es folgt:

$$f_{m,g,k} = \frac{27,8}{\mu} = \frac{27,8}{1,044} = 26,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow \frac{26,6}{25,8(25,2^*)} = 1,03(1,06^*). \quad * \text{mit Wert aus } N(32,5;4,45)$$

Der Modellwert von 26,6 N/mm<sup>2</sup> liegt im 95%-Vertrauensintervall [21,0 N/mm<sup>2</sup>; 27,6 N/mm<sup>2</sup>] und ist um 3% (6%) höher als der Kleinstwert der Biegefestigkeit (das theoretische 5%-Quantil).

Nachstehend die Verifikation mit den drei Festigkeitswerten der GL36c-Träger: Einsetzen von  $f_{t,\ell,k} = 31,6$  N/mm<sup>2</sup> und  $f_{t,j,k} = 38,6$  N/mm<sup>2</sup> in Gleichung (36) ergibt:

$$f_{m,g,k} = -17,39 + 2,290 \cdot f_{t,j,k} - 0,03223 \cdot f_{t,j,k}^2 + 0,01144 \cdot f_{t,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} = 36,9 \text{ N/mm}^2.$$

Mit  $n = E_1/E_2 = 16366/15077 = 1,085$  (Verhältnis der dynamischen Elastizitätsmoduln der Bretter in den kombinierten Trägern) und  $\beta = 0,6$  ist  $\mu \approx 1,02$  (Bild 4-13) und es folgt:

$$f_{m,g,k} = \frac{36,9}{\mu} = \frac{36,9}{1,02} = 36,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow \frac{36,2}{38,2(36,7^*)} = 0,95(0,99^*). \quad * \text{ mit Wert aus } N(41,9; 3,17)$$

Der Modellwert von 36,2 N/mm<sup>2</sup> liegt in der Mitte des 95%-Vertrauensintervalls [33,7 N/mm<sup>2</sup>; 38,4 N/mm<sup>2</sup>] und ist um 5% (1%) kleiner als der Kleinstwert der Biegefestigkeit (das theoretische 5%-Quantil).

Beide Vergleiche zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen dem Kleinstwert bzw. dem theoretischem 5%-Quantil jeweils auf Grundlage der Stichprobe und der Vorhersage mittels der beiden Modelle.

## 4.7.4 Versuche von Schickhofer 1996

Aus der Publikation Schickhofer 1996 werden Ergebnisse von 101 Biegeversuchen an homogenem Brettschichtholz und von entsprechenden Zugversuchen an Brettern und Keilzinken für die Verifikation herangezogen. Die Bretter für diese Versuche stammten aus österreichischen Sägewerken und wurden mit einer Biegemaschine sowie einem Röntgenscanner festigkeitssortiert. Der Vergleich in Tabelle 4-6 zwischen Schickhofers Versuchswerten – sowohl empirische als auch theoretische 5%-Quantile – mit Modellwerten nach den Gleichungen (26) bzw. (36) zeigt gute Übereinstimmung, wobei die Modellwerte tendenziell über den Versuchswerten liegen. Da die Anzahl der Biegeträger in den fünf Stichproben 23, 30, 20, 10 und 18 betrug, ist der Vergleich mit den theoretischen 5%-Quantilen aussagekräftiger.

Tabelle 4-6 Verifikation mit Versuchswerten aus Schickhofer 1996

Empirische 5%-Quantile				Modellwerte
Brettklasse	$f_{t,t,k}$ N/mm <sup>2</sup> (b = 160 mm)	$f_{t,j,k}$ N/mm <sup>2</sup> (b = 160 mm)	$f_{m,g,k}$ N/mm <sup>2</sup> (h = 600 mm)	$f_{m,g,k}$ N/mm <sup>2</sup> Gleichung (26)
MS10	11,7 <sup>1</sup>	25,9 <sup>2</sup>	20,6 <sup>3</sup>	23,7 (1,15)
MS13	18,1 <sup>1</sup>	21,4 <sup>2</sup>	24,4 <sup>3</sup>	23,7 (0,97)
				Gleichung (36)
MS17	22,2 <sup>1</sup>	33,3 <sup>2</sup>	30,5 <sup>3</sup>	31,7 (1,04)
			(h = 594 mm)	Gleichung (26)
MS10	11,7 <sup>1</sup>	25,9 <sup>2</sup>	19,5 <sup>4</sup>	23,7 (1,22)
				Gleichung (36)
MS17	22,2 <sup>1</sup>	33,3 <sup>2</sup>	30,0 <sup>4</sup>	31,7 (1,06)
Theoretische 5%-Quantile				
Brettklasse	$f_{t,t,k}$ N/mm <sup>2</sup> (b = 160 mm)	$f_{t,j,k}$ N/mm <sup>2</sup> (b = 160 mm)	$f_{m,g,k}$ N/mm <sup>2</sup> (h = 600 mm)	$f_{m,g,k}$ N/mm <sup>2</sup> Gleichung (26)
MS10	11,6 <sup>1</sup>	24,7 <sup>2</sup>	20,6 <sup>3</sup>	23,3 (1,13)
MS13	17,5 <sup>1</sup>	24 <sup>2</sup>	24 <sup>3</sup>	25,3 (1,05)
				Gleichung (36)
MS17	21,9 <sup>1</sup>	34,8 <sup>2</sup>	29,8 <sup>3</sup>	32,0 (1,07)
			(h = 594 mm)	Gleichung (26)
MS10	11,6 <sup>1</sup>	24,7 <sup>2</sup>	21,5 <sup>4</sup>	23,3 (1,08)
				Gleichung (36)
MS17	21,9 <sup>1</sup>	34,8 <sup>2</sup>	31,2 <sup>4</sup>	32,0 (1,03)
<sup>1</sup> aus „Table 6“ <sup>2</sup> aus „Table 9“ <sup>3</sup> aus „Table 12“, Serie 1, 2 und 3 mit $k_h=1,09$ von 297 auf 600 mm umgerechnet <sup>4</sup> aus „Table 12“, Serie 6 und 7				

#### 4.7.5 Versuche von Falk et al. 1992

Für die Verifikation eignen sich aus dieser Arbeit drei bezüglich Brett-Zugfestigkeit unterschiedliche Versuchsreihen C30, C37 und C37/C30. Die Bretter, Herkunft Norwegen, wurden visuell und mit einer Biegemaschine festigkeitssortiert. Die charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeiten basieren auf insgesamt 312 Biegeversuchen. Die drei Vergleiche in Tabelle 4-7 zwischen den publizierten Versuchswerten und den Modellwerten der Gleichung (37) zeigt im Mittel Übereinstimmung.

Tabelle 4-7 Verifikation mit Versuchswerten aus Falk et al. 1992

Empirische 5%-Quantile				Modellwerte
Brettklasse	$f_{t,t,k}$ N/mm ( $b = 90 \text{ mm}$ ) <sup>2</sup>	$f_{m,j,k}$ N/mm <sup>2</sup> ( $b = 90 \text{ mm}$ )	$f_{m,g,k}$ N/mm <sup>2</sup> ( $h = 600 \text{ mm}$ )	$f_{m,g,k}$ N/mm <sup>2</sup> Gleichung (37)
C30	22 <sup>1</sup>	49,5 <sup>2</sup>	30,1 <sup>3</sup>	32,2 (1,07)
C37	26,5 <sup>1</sup>	52,2 <sup>2</sup>	36,1 <sup>3</sup>	34,5 (0,96)
C37/C30	26,5 <sup>1</sup>	52,2 <sup>2</sup>	35,8 <sup>4</sup>	34,5 (0,96)

<sup>1</sup> aus empirischer Verteilungsfunktion in „Figure 21“  
<sup>2</sup> aus „Table 10“  
<sup>3</sup> aus „Table 12“, mit  $k_h=1,09$  von 300 mm auf 600 mm umgerechnet  
<sup>4</sup> aus „Table 12“, mit  $k_h=1,09$  von 300 mm auf 600 mm und mit  $\mu=1,03$  auf homogenen Aufbau umgerechnet

#### 4.7.6 Versuche von Aicher und Höfflin 2006

Dieses Forschungsvorhaben betrifft ursprünglich die Tragfähigkeit von Brettschichtholz mit Durchbrüchen. Für Vergleichszwecke wurde daher die maximale rechnerische Biegerandspannung für ausgewählte Biegeversuche ermittelt. Sie ist diejenige Randspannung, die beim Versagen im Versuchsträger herrschte. Versagensarten waren Durchbruch-, Biegeversagen oder eine Kombination aus beidem. Es kommen jeweils 15 gerade Träger aus GL32h mit 450 mm und 900 mm Höhe für die vergleichende Betrachtung in Frage. Berücksichtigt wurden damit die Testserien 450\_5h\_0,3, 450\_5h\_0,4, 900\_5h\_0,2 bis 900\_5h\_0,4. Die Träger waren 120 mm breit und die Stützweite betrug 4,68 m ( $< 18 \cdot 0,45 = 8,10 \text{ m}$ ) bzw. 9,45 m ( $< 18 \cdot 0,9 = 16,2 \text{ m}$ ) und lag damit weit unter dem in EN 408 geforderten Wert.

Bild 4-19 zeigt die Verteilung der maximalen rechnerischen Biegerandspannung. Bei den zwei Trägern, denen die geringsten Werte, nämlich 20,8 N/mm<sup>2</sup> und 22,6 N/mm<sup>2</sup>, zugeordnet sind, wurde Biegeversagen beobachtet. Deshalb kann für die Biegefestigkeit – unabhängig von der Versagensart der übrigen Träger – ein 5%-Quantil von 21,7 N/mm<sup>2</sup> für die uneinheitliche Stichprobe mittels Interpolation abgezählt werden. Die Auswertung der Stichprobe zeigt einen kritischen Unterschied zwischen dem Nenn- und Istwert der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit. Das steht im Einklang mit der Erkenntnis, dass gegenwärtige Anforderungen an Bretter und Keilzinken im Fall von GL32h nicht ausreichend sind.



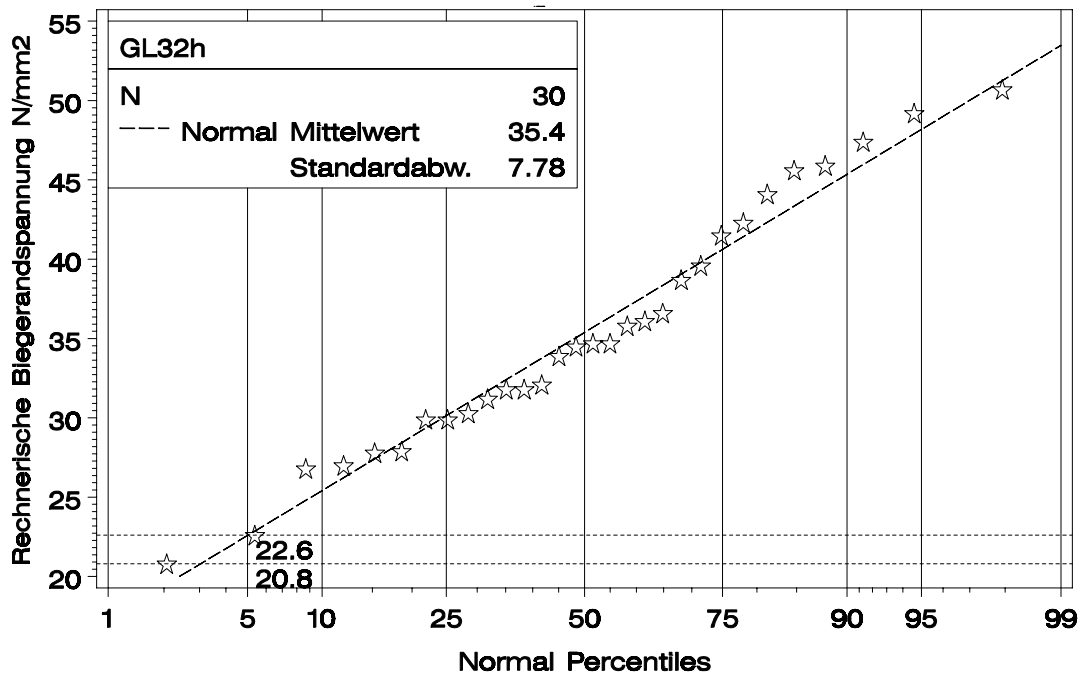


Bild 4-19 Empirische Verteilung der rechnerischen Biegegrandspannung beim Versagen; Auswertung von Versuchen in Aicher und Höfflin 2006

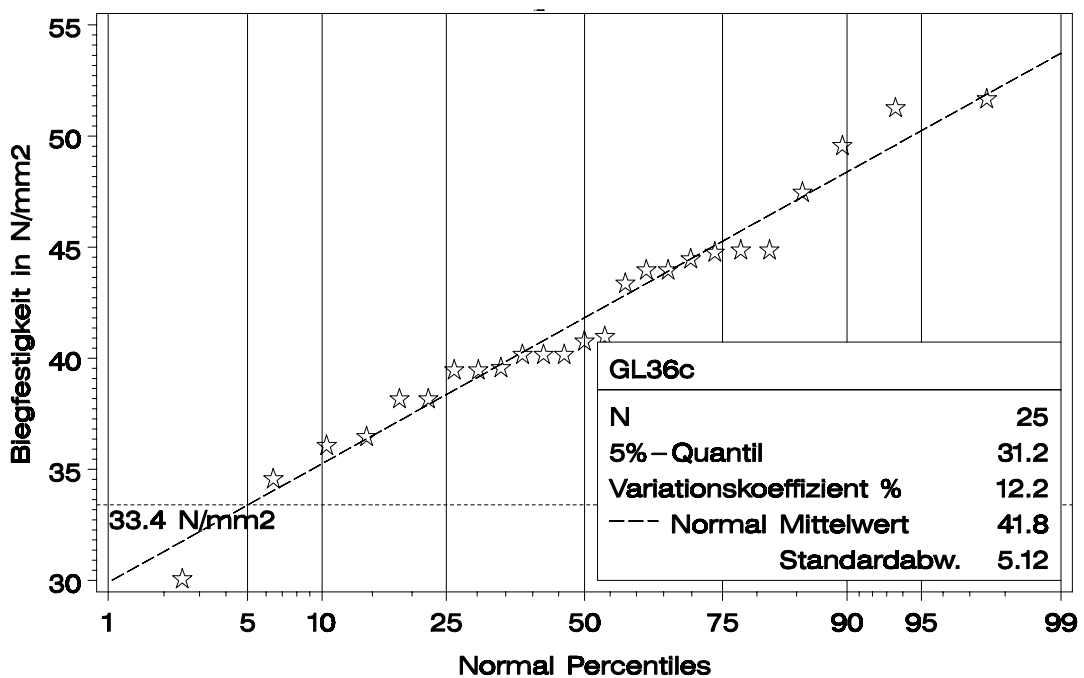


Bild 4-20 Empirische Verteilung der Brett-schichtholz-Biegefestigkeit; Werte wurden aus Brandner und Schickhofer 2008 abgelesen. Es ergeben sich daher geringfügige Rundungsdifferenzen.

#### 4.7.7 Versuche von Brandner und Schickhofer 2008

Brandner und Schickhofer berichten von 25 Biegeversuchen an 600 mm hohen und 160 mm breiten Brett-schichtholzträgern der Festigkeitsklasse GL36h. Das erforderliche Brettmaterial wurde gezielt maschinell festigkeitssortiert, so dass eine charakte-

ristische Brett-Zugfestigkeit von etwa 28 N/mm<sup>2</sup> erreicht wurde. Sie berichten von einer charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit von 31,1 N/mm<sup>2</sup>, was mit Gleichung (15) einer Biegefestigkeit von etwa 44 N/mm<sup>2</sup> entspräche. Die Trägerversuche wurden nach EN 408 durchgeführt.

In Bild 4-20 ist die Verteilung der Versuchswerte dargestellt. Das empirische 5%-Quantil (mittels Interpolation berechnet) beträgt 31,2 N/mm<sup>2</sup> mit einem 95%-Vertrauensintervall von [29,3 N/mm<sup>2</sup>; 36,0 N/mm<sup>2</sup>]. Das theoretische 5%-Quantil aus der angepassten Normalverteilung ist 33,4 N/mm<sup>2</sup>. Diese Ergebnisse passen widerspruchsfrei in den Zusammenhang in Bild 4-6, dessen Kurven das Modell für maschinelle Sortierung darstellen. Selbst mit einer charakteristischen Brett-Zugfestigkeit von etwa 28 N/mm<sup>2</sup> wird der Nennwert von 36 N/mm<sup>2</sup> sehr unwahrscheinlich erreicht.

#### 4.7.8 Bewertung der Verifikation

Die vergleichenden Gegenüberstellungen und die Auswertung relevanter Versuche von Aicher und Höfflin 2006 sowie Brandner und Schickhofer 2008 zeigen durchweg, dass die Prognosen der Modellgleichungen (26) bzw. (27) (visuelles Modell-II) und (36) bzw. (37) (Rohdichte-dynamischer-E-Modul-Modell-I) in guter Übereinstimmung mit den Versuchswerten stehen. Der mit den Stichprobenumfängen gewichtete, mittlere Quotient aus Modell- und Versuchswert ist 1,018. In diesem Verhältnis sind insgesamt 491 (= 38 + 40 + 101 + 312) relevante Biegeversuche berücksichtigt. Jeweils unterschiedliche Wuchsgebiete der Bretter, Sortiermaschinen, Brettschichtholzhersteller, Zeitpunkte der Herstellung und Forscher sind in diesem Verhältnis anteilig erfasst. Vor dem Hintergrund der jetzigen Erkenntnismöglichkeiten darf davon ausgegangen werden, dass die vorgeschlagene Modellierung der Wirklichkeit sehr nahe kommt.

Dass Modellwerte in Einzelfällen bis zu 13% über den Versuchswerten liegen, ist eine Tatsache, die mannigfaltige und nachvollziehbare Gründe haben kann. Diese teilweise ungünstigen Abweichungen von den Modellwerten, die die Bedeutung von charakteristischen Werten bekommen sollen, müssen im Sicherheitskonzept vom Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaft  $\gamma_M$  aufgefangen werden.

### 4.8 Vereinfachte Modellgleichungen für die Normung

Tabelle 4-8 zeigt mittelbar die Umsetzung der relevanten Modellgleichungen in einen kompakten Normungsvorschlag für homogenes Brettschichtholz. Die Festigkeitsklassen sind von GL24h bis GL36h in 2-N/mm<sup>2</sup>-Schritten gestaffelt. Für den Vorschlag werden anhand der relevanten Modellgleichungen (27) und (37), die auf der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit beruhen, Anforderungen an Bretter und Keilzinken so festgelegt, dass die Werte in Spalte 4 mit dem Nennwert der Festigkeitsklasse übereinstimmen. Es wurde dabei berücksichtigt, dass bis GL28h die Modellgleichung (27) gültig ist und ab GL30h Gleichung (37), weil zwischen diesen beiden Klassen die Gültigkeitsgrenze 21-22-N/mm<sup>2</sup>, die für die charakteristische Brett-Zugfestigkeit gilt, übersprungen wird. Das Verhältnis zwischen der charakteristischen

Brett-Zugfestigkeit und der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit wurde jeweils so gewählt, dass der Anteil Keilzinkenversagen bei etwa 50% liegt. Das zeigen die Anteile in Spalte 6, die mit den Gleichungen (29) und (39) berechnet wurden. An die Beziehung zwischen den Nennwerten in Spalte 1 und die Zugfestigkeiten in Spalte 2 lässt sich nun der nichtlineare Zusammenhang (47) anpassen:

$$f_{m,g,k} = 16,8 + 0,450 \cdot f_{t,\ell,k} + 0,00408 \cdot f_{t,\ell,k}^2 \quad (47)$$

In dieser Gleichung wird nur noch implizit die Unterscheidung in visuelle und maschinelle Sortierung bzw. die Gültigkeitsgrenze 21-22-N/mm<sup>2</sup> berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen den Anforderungen an Bretter und Keilzinken in den Spalten 2 und 3 lässt sich erschöpfend mit Gleichung (48) erfassen.

$$f_{m,j,k} = 40,1 - 1,85 \cdot f_{t,\ell,k} + 0,1196 \cdot f_{t,\ell,k}^2 - 0,001737 \cdot f_{t,\ell,k}^3 \quad (48)$$

$$(\text{lineare Alternative: } f_{m,j,k} = 21,9 + 0,769 \cdot f_{t,\ell,k} )$$

Beide Gleichungen sind in Bild 4-21 dargestellt. Sie stehen im Einklang mit dem in EN 1194 verwendeten Format für Modellgleichungen: Brettschichtholz-Biegefestigkeit nur in Abhängigkeit von der Brett-Zugfestigkeit und zusätzlich Anforderungen an Keilzinken nur in Abhängigkeit von der Brett-Zugfestigkeit. Eine gemeinsame Darstellung mit dem Festigkeitsmodell in EN 1194 ist daher möglich.

Im Anhang A 6 befindet sich ein in englischer Sprache ausgearbeiteter Entwurf für den Abschnitt „Strength and stiffness properties of glued laminated timber“ in prEN 14080. Darin werden unter anderem auch die Anforderungen an Bretter und Keilzinken von kombiniertem Brettschichtholz festgelegt. Im Anhang A 7 wird zusätzlich noch eine Alternative für charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften für Brett lamellen angegeben.

Tabelle 4-8 Anforderungen an Bretter und Keilzinken für homogenes Brettschichtholz

1	2	3	4	5	6	7
Festigkeitsklasse	$f_{t,\ell,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,j,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,g,k}$ N/mm <sup>2</sup>	Werte in Sp. 4 mit	$\eta_{j,crack}$ %	Werte in Sp. 6 mit
GL24h	14	33	23,8	Gl. (27)	48	Gl. (29)
GL26h	18	35	26,0		53	
GL28h	21	38	28,2		52	
GL30h	24	41	30,1	Gl. (37)	54	Gl. (39)
GL32h	27	43	32,0		51	
GL34h	30	45	34,0		49	
GL36h	33	47	35,9		47	

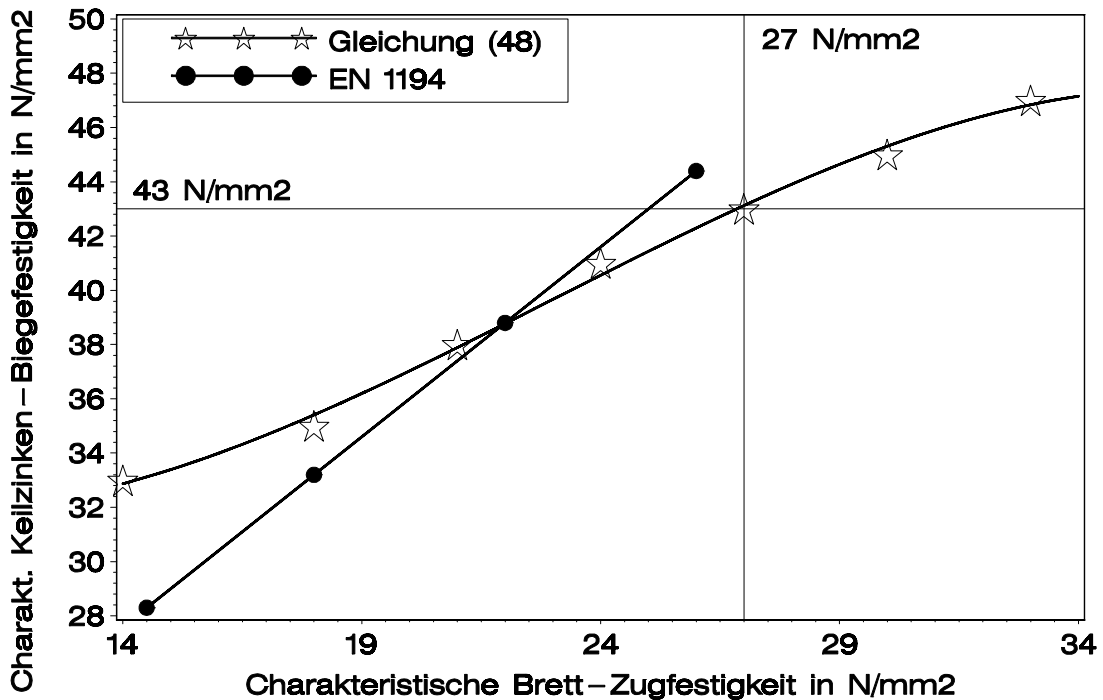
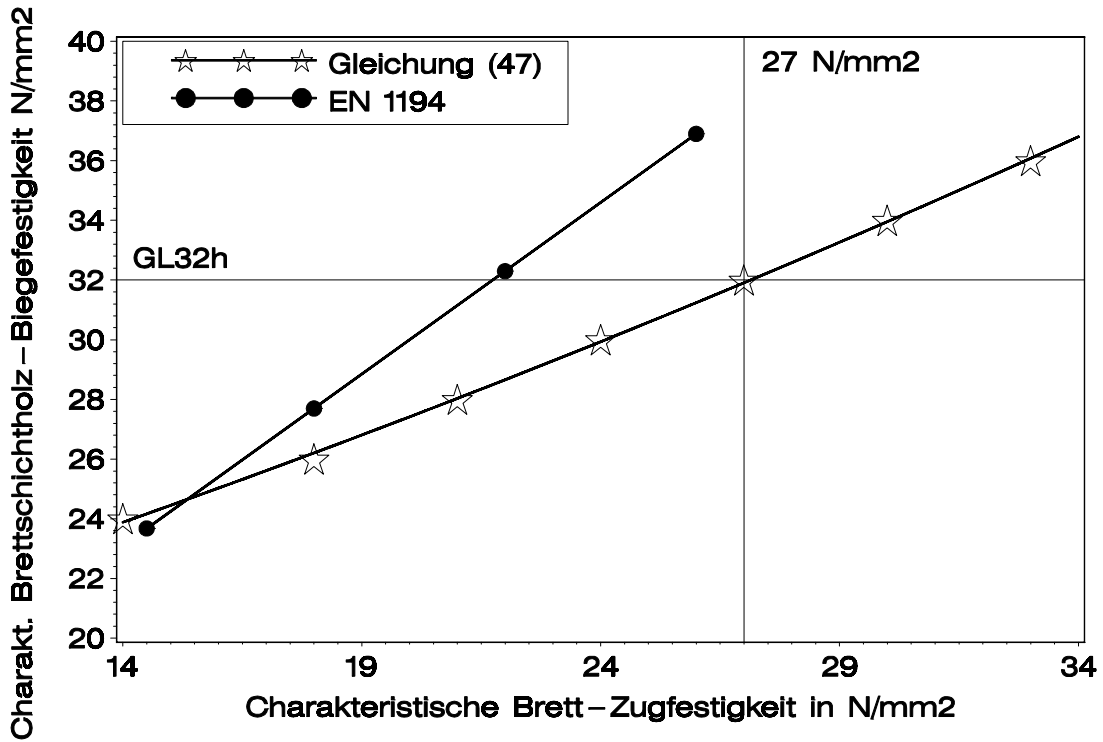


Bild 4-21 Charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit (oben) und charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit (unten) in Abhängigkeit von der charakteristischen Brett-Zugfestigkeit; Gleichungen (47) und (48) bzw. Festigkeitsmodell in EN 1194; Die Hilfslinien verdeutlichen Anforderungen für GL32h.

## 4.9 Vorschläge für homogene und kombinierte Querschnitte

### 4.9.1 Allgemeines

Die folgenden Vorschläge sind unabhängig vom Normungsvorschlag im Abschnitt 4.8 und Anhang A 6. Die Lamellenfestigkeitsklassen, hier vorgeschlagen, werden auf der Basis von Zugversuchen nach EN 408 definiert. Dabei liegen folgende Vorgaben zu Grunde:

- Es wird zwischen visueller und maschineller Sortierung unterschieden. Dem bei der visuellen Sortierung stärker ausgeprägten Laminierungseffekt wird Rechnung getragen.
- Es werden maximal vier Lamellenfestigkeitsklassen ausgewiesen. Damit soll erreicht werden, dass die Trägeraufbauten überschaubar und die Sortierung wirtschaftlich bleiben.
- Es werden sowohl homogene als auch kombinierte Trägeraufbauten berücksichtigt.
- Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL36 wird nicht in die Untersuchung einbezogen, weil durch die hohen Anforderungen an die Lamellen keine wirtschaftlichen Ausbeuten erzielt werden.

Variable, die für den Vorschlag eines kombinierten Trägers berücksichtigt werden müssen, sind:

- charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit,
- charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit,
- charakteristische Brett-Zugfestigkeit,
- Verhältnis der E-Moduln von Rand- und Kernlamellen ( $E_1/E_2$ ), Kernlamellenanteil  $\beta$  und Umrechnungsfaktor  $\mu$ , s. Abschnitt 4.4.

Der bisherige Brettschichtholzaufbau sieht für kombinierte Träger einen Anteil von je einem Sechstel Randlamellen und von zwei Dritteln Kernlamellen bei einem  $E_1/E_2$ -Verhältnis von 1,2 vor. Die von der Holzforschung München durchgeführten Simulationen zeigen, dass dieser Brettschichtholzaufbau unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens nicht wirtschaftlich ist. Wird für kombinierte Träger ein Anteil von einem Viertel Randlamellen und von zwei Vierteln Kernlamellen und ein  $E_1/E_2$ -Verhältnis von 1,3 gewählt, sind geringere charakteristische Brett-Zugfestigkeiten erforderlich und es ergeben sich damit höhere Ausbeuten.

In den folgenden Beispielen für Trägeraufbauten mit visuell sortierten Lamellen wird berücksichtigt, dass die Keilzinken-Biegefestigkeit auch von der Lamellenqualität abhängt. Für Trägeraufbauten mit maschinell sortierten Lamellen wird vorausgesetzt, dass für GL32, GL28 und GL24 charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeiten von 45 N/mm<sup>2</sup>, 40 N/mm<sup>2</sup> und 35 N/mm<sup>2</sup> erreichbar sind.

#### 4.9.2 Visuelle Sortierung

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen keine größeren Abweichungen von der bisherigen Regelung von Brettschichtholz aus visuell sortiertem Schnittholz. Für einen homogen aufgebauten Brettschichtholzträger der Festigkeitsklasse GL24h oder GL28h sind verschiedene Kombinationen aus charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit und charakteristischer Brett-Zugfestigkeit möglich. Bild 4-22 zeigt den Zusammenhang zwischen Keilzinken-Biegefestigkeit und resultierender Brett-Zugfestigkeit gemäß Gleichung (27).

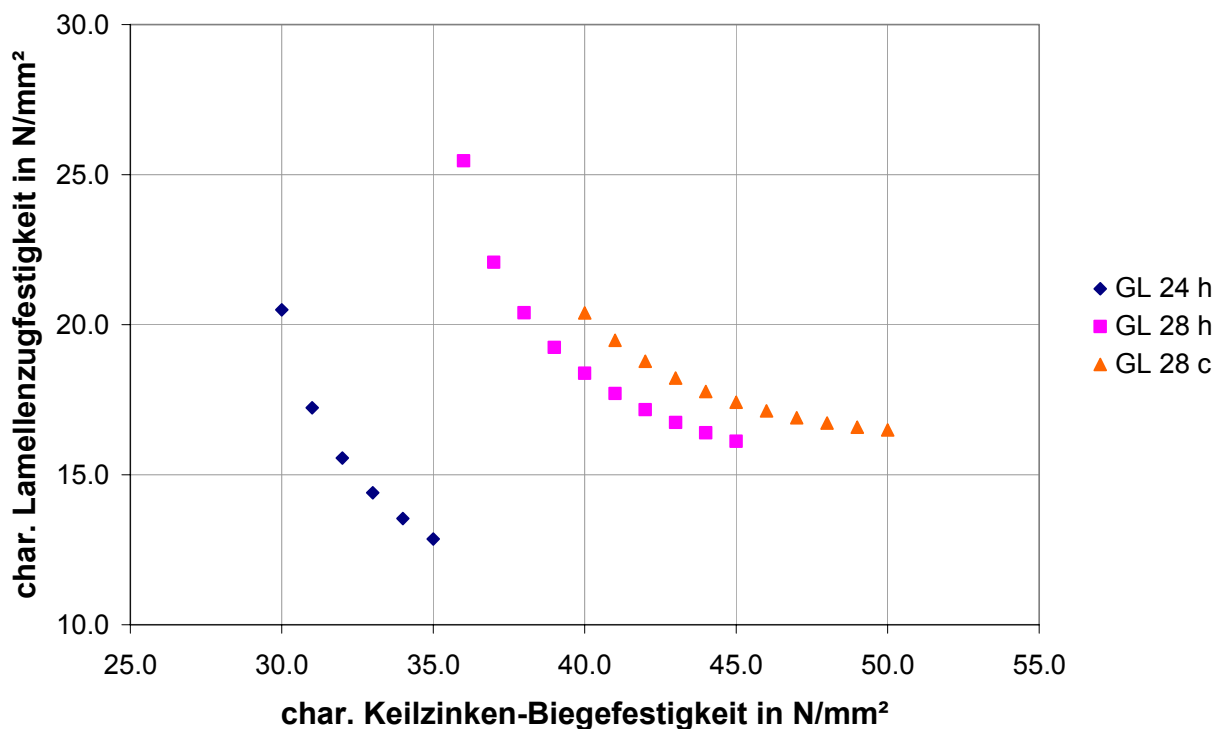


Bild 4-22 Zusammenhang zwischen charakteristischer Keilzinken-Biegefestigkeit und charakteristischer Brett-Zugfestigkeit.

Die Bretter eines homogenen Brettschichtholzträgers der Festigkeitsklasse GL24h müssen bei einer charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit von 30,0 N/mm<sup>2</sup> eine charakteristische Brett-Zugfestigkeit von 20,5 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Diese Anforderung erfüllt das Sortierverfahren VIS-3 (visuell: S13). Bei einer charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit von 35,0 N/mm<sup>2</sup> reduziert sich die Anforderung an die Lamellen auf 12,9 N/mm<sup>2</sup>. Diese Anforderung wird von allen visuellen Sortierverfahren erfüllt. Bei einem Träger der Festigkeitsklasse GL28h beträgt die erforderliche charakteristische Brett-Zugfestigkeit 18,4 N/mm<sup>2</sup> bei einer charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit von 40,0 N/mm<sup>2</sup>. Kann eine charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit von 45,0 N/mm<sup>2</sup> gewährleistet werden, reduziert sich die geforderte charakteristische Brett-Zugfestigkeit auf 16,1 N/mm<sup>2</sup>. Bei beiden Möglichkeiten erfüllt das Verfahren VIS-3 die Anforderung an die charakteristische Brett-Zugfestigkeit.

Bei einem kombinierten Aufbau von GL28c, einem Kernlamellenanteil  $\beta = 0,5$  und einem  $E_1/E_2$ -Verhältnis von 1,3 müssen die Randlamellen eine charakteristische Brett-Zugfestigkeit von  $20,4 \text{ N/mm}^2$  aufweisen, wenn die charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit  $40,0 \text{ N/mm}^2$  beträgt. Bei einer charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit von  $45,0 \text{ N/mm}^2$  beträgt die Anforderung an die charakteristische Brett-Zugfestigkeit  $17,4 \text{ N/mm}^2$ . Auch das ist mit einer visuellen Sortierung in S13 möglich. Die Anforderungen an die Kernlamellen erfüllt die Sortierklasse S10.

#### 4.9.3 Maschinelle Sortierung

Bild 4-23 zeigt einen möglichen Aufbau von homogenem GL32h und kombiniertem GL28c und GL24c aus insgesamt drei Lamellenfestigkeitsklassen, wobei in einem Querschnitt höchstens zwei Lamellenklassen vorgesehen sind. Bei diesem Beispiel betragen die geforderten charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeiten für GL32h, GL28c und GL24c jeweils  $45 \text{ N/mm}^2$ ,  $40 \text{ N/mm}^2$  und  $35 \text{ N/mm}^2$ . Die Vorgaben aus Abschnitt 4.9.1 gelten entsprechend und die charakteristischen Brett-Zugfestigkeiten sind mit Gleichung (37) berechnet. In Tabelle 4-9 sind die Lamellenklassen T25 E14, T18 E11 und T11 E8.5 – abweichend vom Anhang A 6 und A 7 – für dieses Beispiel definiert. Es wird hier berücksichtigt, dass alle drei Lamellenklassen in einem Sortierdurchgang sortiert werden.

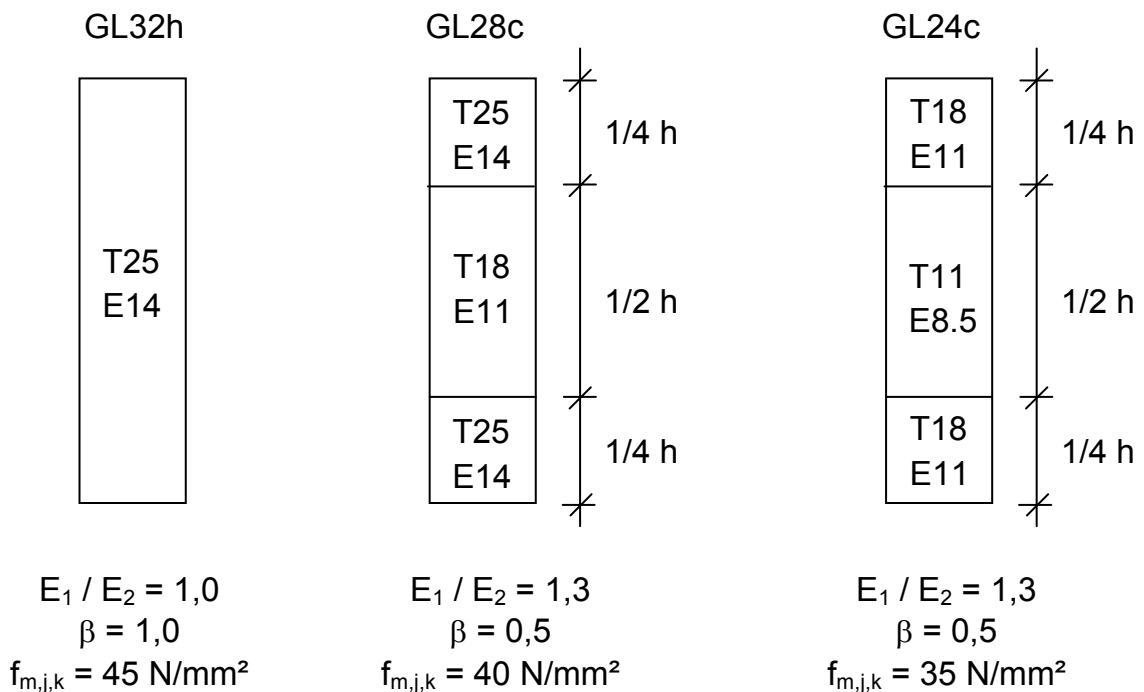


Bild 4-23 Beispiel für Trägeraufbauten

Tabelle 4-9 Charakteristische Werte der Lamellenklassen (Entwürfe)

Lamellenklasse	$f_{t,\ell,k}$ N/mm <sup>2</sup>	$E_{\text{mean}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\rho_{12}$ kg/m <sup>3</sup>	Ausbeute %
T25 E14	25,0	14 000	400	38
T18 E11	18,0	11 000	370	24
T11 E8.5	11,0	8 500	340	38
Ausschuss	-	-	-	0%

Der homogene Aufbau von GL32h ist vorteilhaft, weil sich geringere Anforderungen an die charakteristische Brett-Zugfestigkeit ergeben, als bei kombinierten Trägern. Außerdem eignen sich die Bretter der Klasse T25 E14 sowohl für einen homogenen GL32 als auch für die Randlamellen eines kombinierten GL28. Die Lamellenklasse T18 E11 ist für die Kernlamellen des GL28c und für die Randlamellen des GL24c vorgesehen. Kernlamellen des GL24c sind Bretter der Klasse T11 E8.5.

Mit diesem Ansatz gelingt es, mit wenigen Sortierklassen alle wirtschaftlich relevanten Trägerklassen produzieren zu können. Die verfügbaren Lamellenqualitäten werden dabei bestmöglich genutzt und Ausschuss, der beim Sortieren anfällt, wird weitgehend vermieden.



## 5 Zusammenfassung

Es wurden 38 Brettschichtholzträger aus Nadelholz in Biegeversuchen geprüft. Die Träger mit genormtem Aufbau entsprachen den Festigkeitsklassen GL32c und GL36c. Die gemäß EN 408 ermittelten charakteristischen Biegefestigkeiten betragen nur 80% der für die Festigkeitsklassen GL32c und GL36c erforderlichen Werte. Dieses bedenkliche Ergebnis hat die vorliegende Forschungsarbeit ausgelöst.

Es war das Ziel der Arbeit, diese niedrigen, experimentellen Festigkeitswerte zu erklären. Dazu wurde die Festigkeitsmodellierung der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit – in Form von Modellgleichungen – neu entwickelt und bewertet.

Mithilfe eines Rechenmodells, mit dem unterschiedliche Sortierverfahren für Bretter simuliert und dann die mechanischen Eigenschaften von Brettern berechnet werden können, wurden Biegeversuche an Brettschichtholzträgern simuliert und deren Biegefestigkeit berechnet. Um unterschiedliche Sortierverfahren wirklichkeitsnah im Rechenmodell umzusetzen, wurden vorab Bretter aus Mitteleuropa und Skandinavien anhand erhobener Daten von Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul computergestützt sortiert. Diese Sortierergebnisse waren die Grundlage für entsprechende Eingabedaten in das Rechenmodell. Die Biegefestigkeit der simulierten Biegeversuche, variierte Keilzinkenfestigkeiten und die Zugfestigkeit der Bretter, die aufgrund von Ergebnissen aus Zugversuchen den unterschiedlichen Sortierverfahren zugeordnet sind, bilden eine Matrix. Diese ist die zahlenmäßige Grundlage für die Herleitung der neuen Modellgleichungen. In diesen Gleichungen ist die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit abhängig von der charakteristischen Brett- und charakteristischen Keilzinken-Zugfestigkeit. Mithilfe einer multiplen Regressionsanalyse wurden insgesamt zehn Modellgleichungen spezifiziert. Als Alternative wurden die Gleichungen auch in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinken-Biegefestigkeit angegeben. Es konnte gezeigt werden, dass zwei dieser Gleichungen für die Ermittlung der charakteristischen Brettschichtholz-Biegefestigkeit besonders zutreffend und damit ausreichend sind: eine Gleichung bis zur Festigkeitsklasse GL28h vor allem für visuell sortierte Bretter und eine weitere ab GL30h aufwärts für maschinell sortierte Bretter.

Anhand von etwa 450 Biegeversuchen an Brettschichtholz, über die geeignete Ergebnisse im Schrifttum bekannt sind, wurden die Modellgleichungen verifiziert. In einem Teilprojekt wurden weitere 40 Biegeversuche und Zugversuche an Brettern und Keilzinken für eine besonders zuverlässige, unabhängige Überprüfung der Modellgleichungen durchgeführt. Im Vergleich mit den Ergebnissen der insgesamt 490 Versuche liegt die charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit der Modellgleichungen im Mittel nur 2% über den charakteristischen Versuchswerten. Die neuen Modellgleichungen stehen auch im Einklang mit den wissenschaftlichen Ergebnissen von Colling, die Ende der 1980er Jahre publiziert wurden.

Mit den beiden Gleichungen kann gezeigt werden, dass die gegenwärtigen Anforderungen an Bretter und Keilzinken in EN 1194 nicht ausreichen, um die Nennwerte der charakteristischen Biegefestigkeit von GL24h bis GL36h zu gewährleisten. Diese Erkenntnis bedeutet für GL32h: Während in EN 1194 charakteristische Werte von 22 N/mm<sup>2</sup> bzw. 38,8 N/mm<sup>2</sup> für die Brett-Zugfestigkeit und die Keilzinken-Biegefestigkeit gefordert werden, wären nach der neuen Modellgleichung für maschinell sortierte Bretter 27 N/mm<sup>2</sup> bzw. 43 N/mm<sup>2</sup> erforderlich, also 23 % bzw. 11 % höhere Werte. Für GL36h sind statt 26 N/mm<sup>2</sup> bzw. 44,4 N/mm<sup>2</sup> nunmehr 33 N/mm<sup>2</sup> bzw. 47 N/mm<sup>2</sup> angezeigt, also 27% bzw. 6% höhere Werte. Bei entsprechenden kombinierten Trägern fallen die Anforderungen an Bretter und Keilzinken noch höher aus.

Nach den gegenwärtigen Erkenntnismöglichkeiten waren zu geringe Anforderungen an Bretter und Keilzinken der Grund für die niedrigen Festigkeitswerte der 38 Versuchsträger.

Welche Änderungen im Allgemeinen hinsichtlich der Normung von homogenem und kombiniertem Brettschichtholz zu erwarten wären, wird im Hinblick auf prEN 14080 bereits in dieser Forschungsarbeit dargelegt.

## 6 Literatur

Aicher S, Höfflin L (2006). Tragfähigkeit und Bemessung von Brettschichtholzträgern mit runden Durchbrüchen – Sicherheitsrelevante Modifikationen der Bemessungsverfahren nach Eurocode 5 und DIN 1052. Forschungsbericht der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut, Abteilung Holzbau

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

Blaß HJ, Frese M (2006). Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz. Band 6. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Universitätsverlag Karlsruhe: Karlsruhe 2006

Blaß HJ, Frese M, Glos P, Hunger F (2009). Versuche an Brettschichtholz, Brettern und Keilzinkenverbindungen zur Verifikation von Festigkeitsmodellen für Brettschichtholz. Forschungsbericht der Holzforschung München, TU München und der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH). Unveröffentlicht

Blaß HJ, Schmid M (2005). Optimierung der Bemessung von Brettschichtholz mit maschinell sortierten Lamellen. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH). Unveröffentlicht

Brandner R, Schickhofer G (2008). Strength models for GLT – Statements in regard to the TUG / hbf proposal concerning prEN 14080. In: CEN TC124 / WG3 Meeting. Wien 3.4.2008

Burschel P, Huss J (2003). Grundriss des Waldbaus. 3. Auflage. Eugen Ulmer GmbH & Co.: Stuttgart 2003

Colling F (1990). Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen. Universität Karlsruhe (TH). Dissertation

Colling F (1995). Brettschichtholz unter Biegebeanspruchung. Step 3. Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.: Düsseldorf 1995

Colling F, Ehlbeck J, Görlacher R (1991). Glued Laminated Timber – Contribution to the Determination of the Bending Strength of Glulam Beams. CIB-W18A/24-12-1, Oxford, United Kingdom

Ehlbeck J, Colling F, Görlacher R (1985). Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Holz als Roh- und Werkstoff 43: 333-337, 369-373, 439-442

Ehlbeck J, Colling F (1987). Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elastizitätsmodul, Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie der Trägerhöhe. Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH)

Falk R, Solli K, Aasheim E (1992). The performance of glued laminated beams manufactured from machine stress graded Norwegian spruce. Norsk Treteknisk Institut. Meddelelse 77

Frese M (2006). Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt. Band 5. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Universitätsverlag Karlsruhe: Karlsruhe 2006. Dissertation

Fritz P (2006). Ökologischer Waldumbau in Deutschland – Fragen, Antworten, Perspektiven. Oekom Verlag: München 2006

Fronius K (1989). Spaner Kreissägen Bandsägen. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.: Leinfelden-Echterdingen 1989

Görlacher R (1990). Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. Universität Karlsruhe (TH). Dissertation

Hanhijärvi A, Ranta-Maunus A, Sarkama H, Poussa M, Kohsaku M, Puttonen J (2007). Analysis of tension and bending strength of graded spruce timber. CIB-W18/40-6-3, Bled, Slovenia

Ranta-Maunus A (2007). Strength of Finnish Timber. VTT Publications 668

Reiter JMG (2005). Fichtenstarkholz (*Picea abies* (L.) Karst.) – Untersuchungen zur Rundholzqualität und deren Einfluss auf die Schnittholzqualität. Technische Universität München. Dissertation

Schickhofer G (1996). Development of Efficient Glued Laminated Timber. CIB-W18/29-12-1, Bordeaux, France

DIN 1052:2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau

DIN 1055-100:2001-03. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln

DIN 4074-1:2003-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Teil 1: Nadel-schnittholz

EN 384:2004. Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte

---

EN 408:1995. Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

EN 1194:1999. Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte

EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln für den Hochbau



## 7 Bezeichnungen

$f_m$	Biegefestigkeit
$f_{m,g,k}$	charakteristische Brettschichtholz-Biegefestigkeit
$f_{m,g,mean}$	mittlere Brettschichtholz-Biegefestigkeit
$f_{m,j,k}$	charakteristische Keilzinken-Biegefestigkeit
$f_{t(c)}$	Vorhersagewert der Zugfestigkeit (Druckfestigkeit) für ein 150 mm langes Brettelement
$f_{t(c),j}$	Vorhersagewert der Zugfestigkeit (Druckfestigkeit) für ein 150 mm langes Keilzinkenelement
$f_{t,j,k}$	charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit, ermittelt nach EN 1194 bzw. EN 408 (entspricht auch $f_{t,j,k,\ell=200}$ )
$f_{t,j,k,\ell=150}$	simulierte charakteristische Keilzinken-Zugfestigkeit, bezogen auf ein 150 mm langes Keilzinkenelement
$f_{t,\ell,k}$	charakteristische Brett-Zugfestigkeit, ermittelt nach EN 408
$f_{t,\ell,k,sim}$	simulierte charakteristische Brett-Zugfestigkeit, bezogen auf ein 150 mm langes Brettelement
$h$	Höhe
$i$	Ordnungsnummer
$k_h$	Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Trägerhöhe auf die Biegefestigkeit
$\ell$	Stützweite
max	größter Wert (Maximum)
min	kleinster Wert (Minimum)
$n$	Anzahl an Versuchswerten (N)
$r$	Pearsonscher Korrelationskoeffizient
$r^2$	Bestimmtheitsmaß
$s$	Standardabweichung (Std Deviation)
$s_R$	Standardabweichung von Residuen
$u$	Holzfeuchte
$\Delta u$	schrittweise eingeprägte Verformung
$v$	Variationskoeffizient
$\bar{x}$	arithmetisches Mittel (Mean)
Alpha	1. Formparameter der Betaverteilung
Beta	2. Formparameter der Betaverteilung
DAB	Ästigkeit A für die Astansammlung nach DIN 4074-1
DEB	Ästigkeit A für den Einzelast nach DIN 4074-1

$E_{\text{dyn}}$	Elastizitätsmodul bei dynamischer Beanspruchung in Längsrichtung eines Brettes
$E_{\text{stat}}$	Elastizitätsmodul bei statischer Beanspruchung in Längsrichtung eines Brettes, fallweise gemäß EN 408 oder bei Berechnung aus simulierten Einzelwerten auf die gesamte Brettlänge bezogen
$E_{t(c)}$	Vorhersagewert des Zug-Elastizitätsmoduls (Druck-Elastizitätsmoduls) für ein 150 mm langes Brettelement
$E_{t(c),j}$	Vorhersagewert des Zug-Elastizitätsmoduls (Druck-Elastizitätsmoduls) für ein 150 mm langes Keilzinkenelement
$E_i$	Veränderlicher Elastizitätsmodul eines bestimmten 150 mm langen Brettelements innerhalb eines simulierten Brettes
$E_1$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls der Randlemellen bei kombiniertem Brettschichtholz
$E_2$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls der Kernlamellen bei kombiniertem Brettschichtholz
$F$	Last
$F_{\text{max}}$	maximale Last
$K_i$	Quotient zweier in der Größe aufeinander folgender KAR-Werte in einem Brett
KAR	Astflächensumme bez. auf den Querschnitt eines Brettabschnitts von 150 mm Länge
$N(\bar{x};s)$	Normalverteilung mit Mittelwert und Standardabweichung einer Stichprobe
Scale	Spannweite der Betaverteilung
Threshold	untere Schranke der Betaverteilung
$W$	Widerstandsmoment
$\beta$	Kernlamellenanteil bei kombiniertem Brettschichtholz
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoffeigenschaft
$\eta_{j,\text{crack}}$	Anteil Keilzinkenversagen
$\mu$	Mittelwert der Grundgesamtheit; Umrechnungsfaktor für Festigkeitswerte von kombinierten auf homogene Querschnitte und umgekehrt
$\rho_0$	Darrrohdichte eines Brettelements; mittlere Darrrohdichte eines Brettes
$\rho_{0,\text{min}}$	kleinere Darrrohdichte von zwei keilgezinkten Brettabschnitten
$\sigma$	Standardabweichung der Grundgesamtheit



# Anlagen

## A 1 Biegeversuche an Brettschichtholzträgern

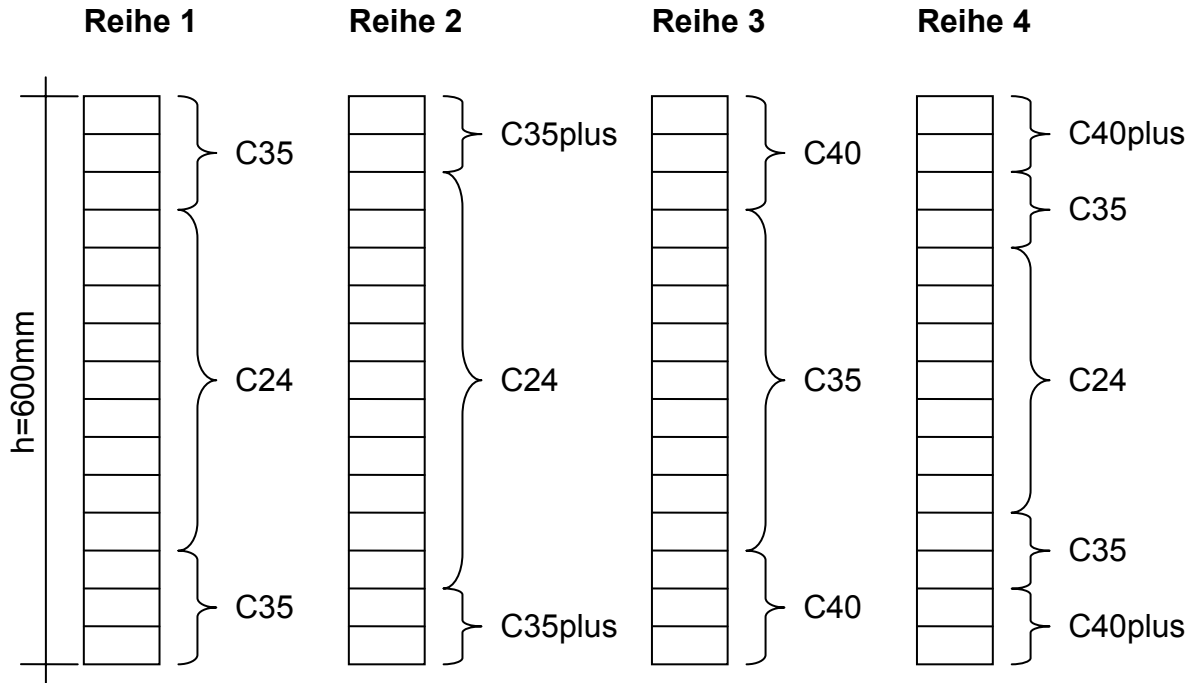


Bild A-1 Aufbau der kombinierten Träger; Reihe 1 bis 4

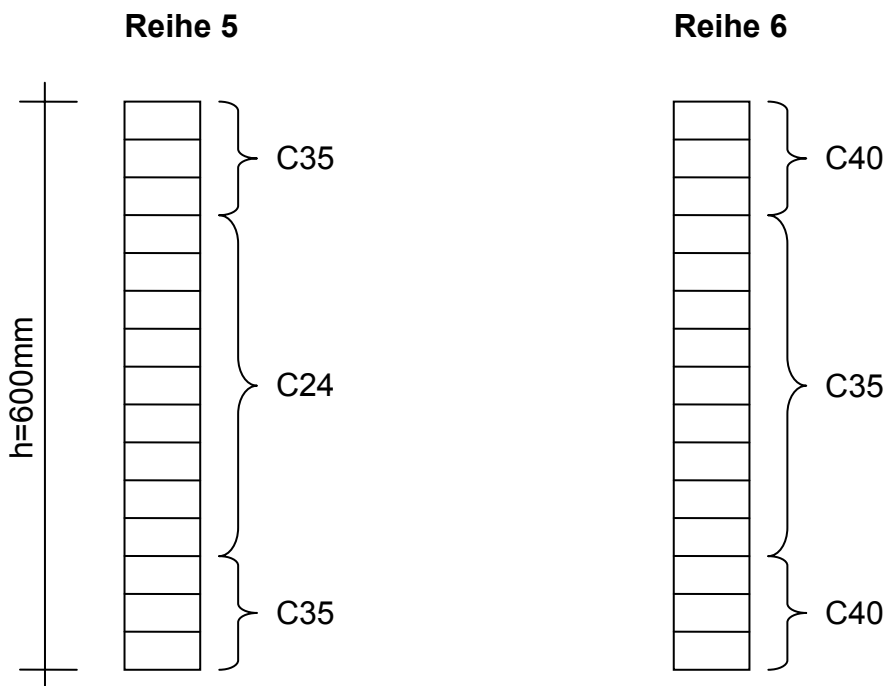


Bild A-2 Aufbau der kombinierten Träger; Reihe 5 und 6

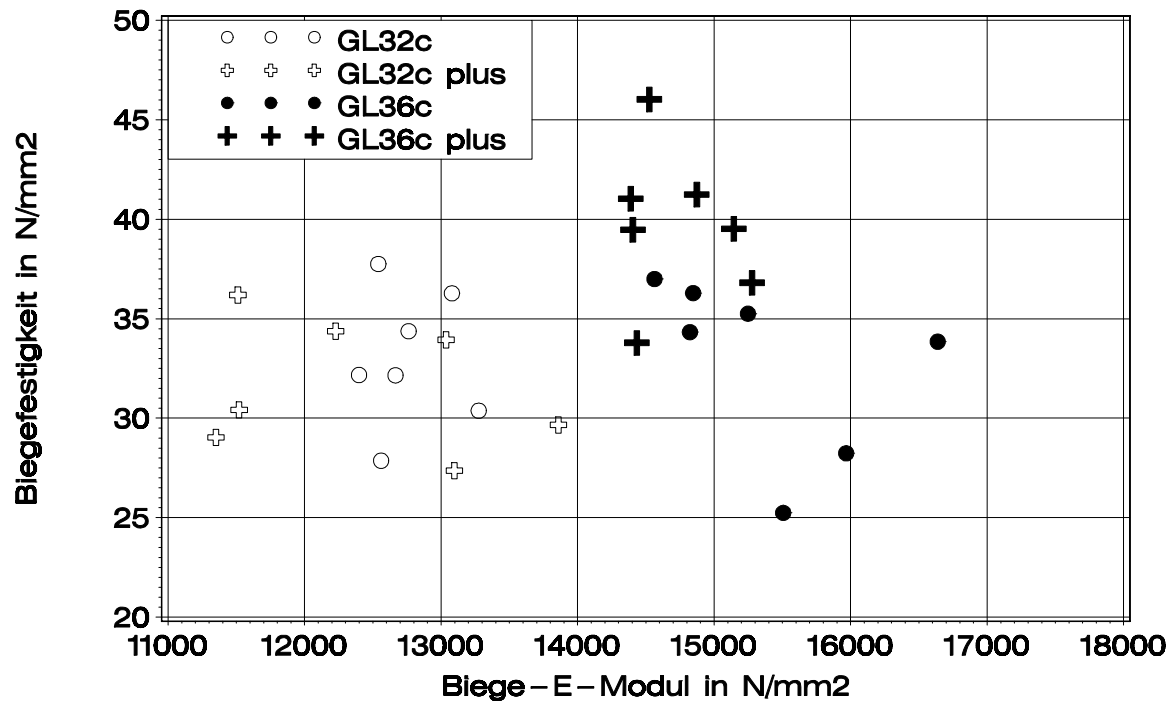


Bild A-3 Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul; Reihen 1 bis 4

Tabelle A-1 Biegefestigkeit

Reihe	Klasse	N	$\bar{x}$ N/mm <sup>2</sup>	s N/mm <sup>2</sup>	min N/mm <sup>2</sup>	max N/mm <sup>2</sup>
1	GL32c	7	33,0	3,41	27,9	37,8
2	GL32c-plus	7	31,6	3,27	27,4	36,2
3	GL36c	7	32,9	4,42	25,2	36,3
4	GL36c-plus	7	39,7	3,82	33,8	46,0

Tabelle A-2 Biege-Elastizitätsmodul

Reihe	Klasse	N	$\bar{x}$ N/mm <sup>2</sup>	s N/mm <sup>2</sup>	min N/mm <sup>2</sup>	max N/mm <sup>2</sup>
1	GL32c	7	12800	315	12400	13300
2	GL32c-plus	7	12400	975	11400	13900
3	GL36c	7	15400	733	14600	16600
4	GL36c-plus	7	14700	375	14400	15300

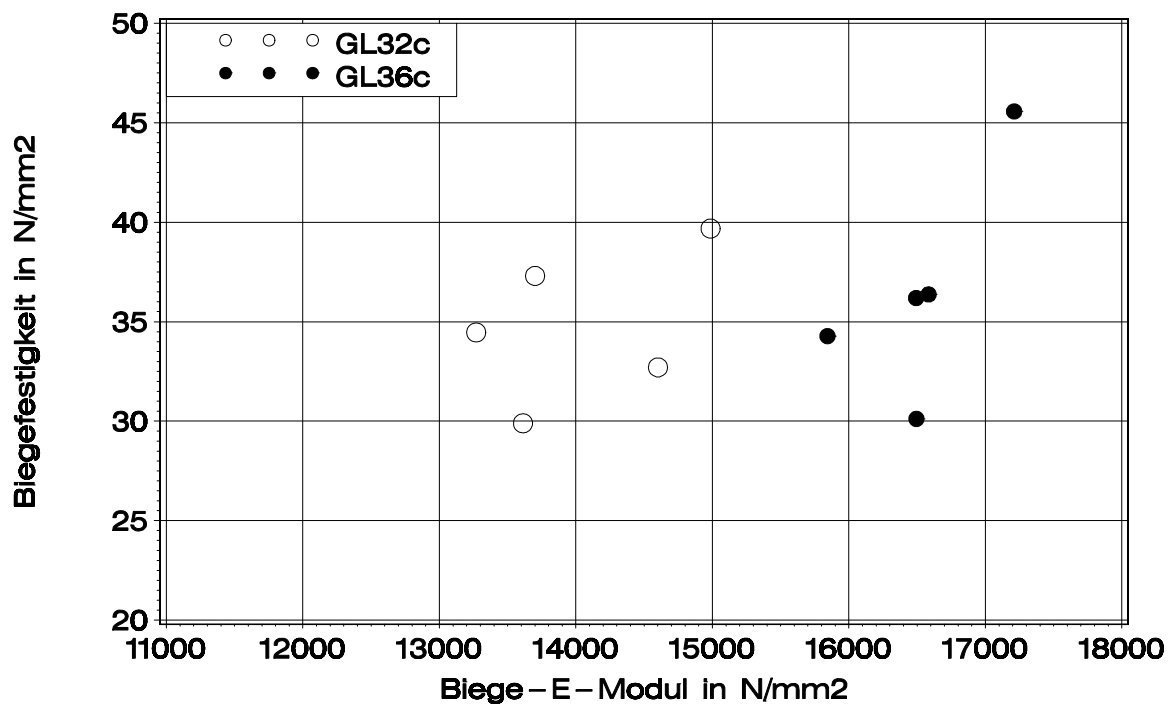


Bild A-4 Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul; Reihen 5 und 6

Tabelle A-3 Biegefestigkeit

Reihe	Klasse	N	$\bar{x}$ N/mm <sup>2</sup>	s N/mm <sup>2</sup>	min N/mm <sup>2</sup>	max N/mm <sup>2</sup>
5	GL32c	5	34,8	3,83	29,9	39,7
6	GL36c	5	36,5	5,66	30,1	45,6

Tabelle A-4 Biege-Elastizitätsmodul

Reihe	Klasse	N	$\bar{x}$ N/mm <sup>2</sup>	s N/mm <sup>2</sup>	min N/mm <sup>2</sup>	max N/mm <sup>2</sup>
5	GL32c	5	14000	725	13300	15000
6	GL36c	5	16500	485	15800	17200

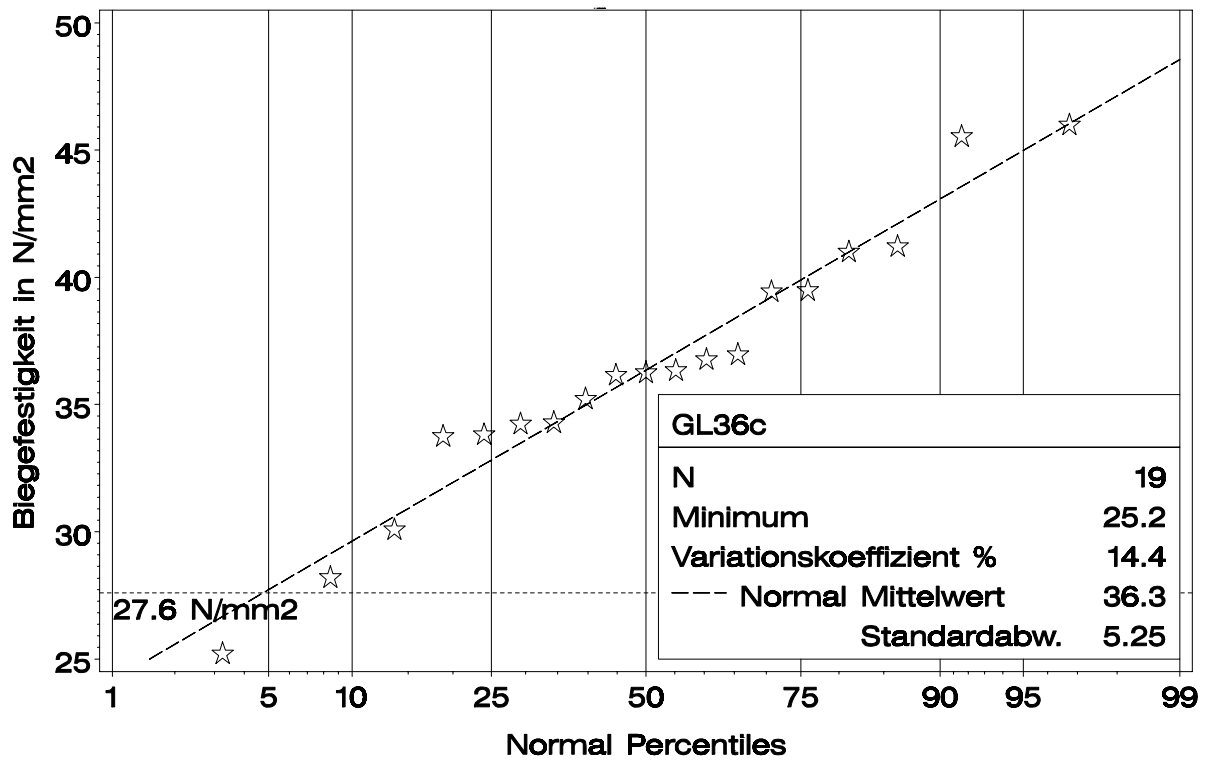
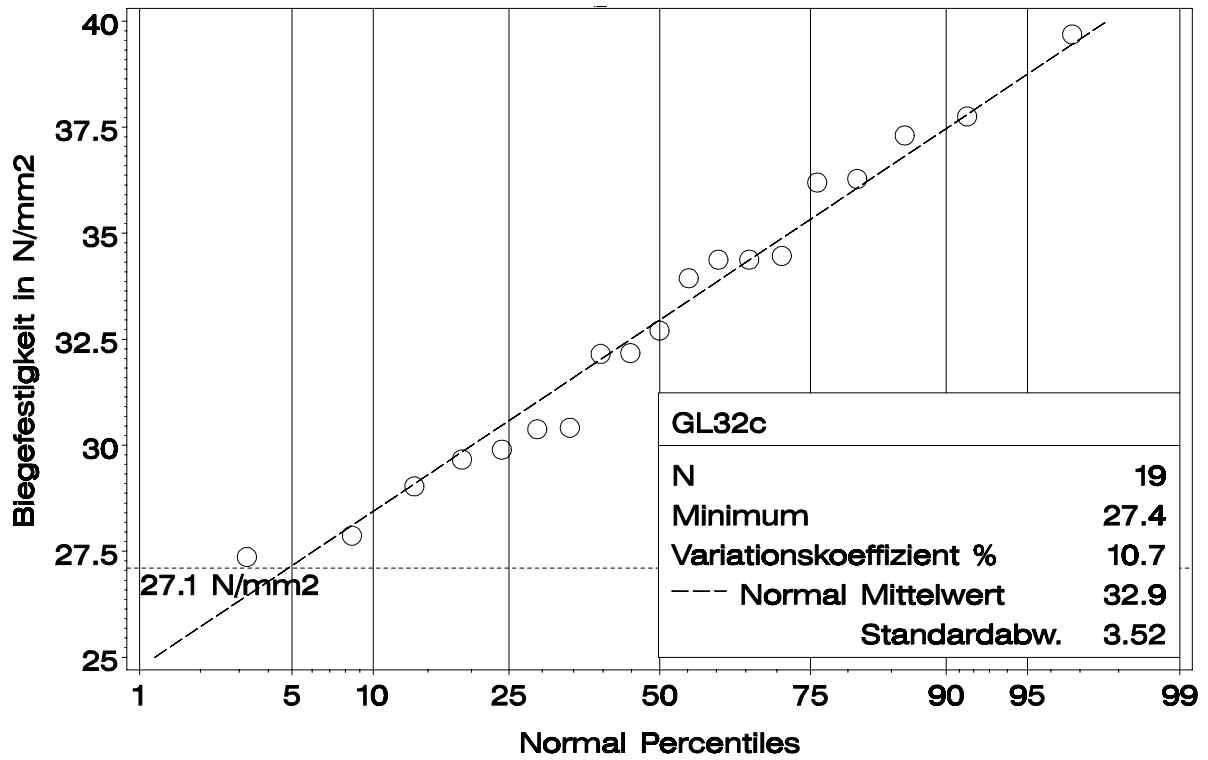


Bild A-5 Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung der Biegefestigkeit; Reihen 1, 2 und 5 (oben) und Reihen 3, 4 und 6 (unten)

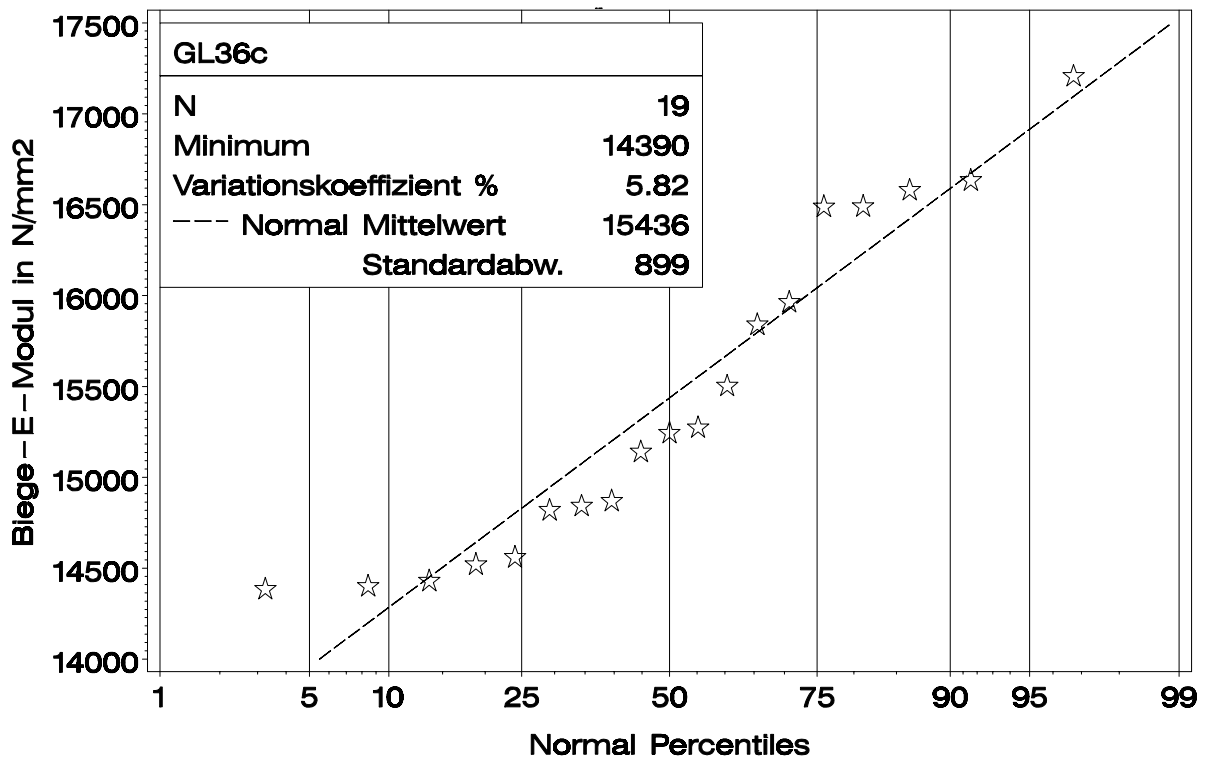
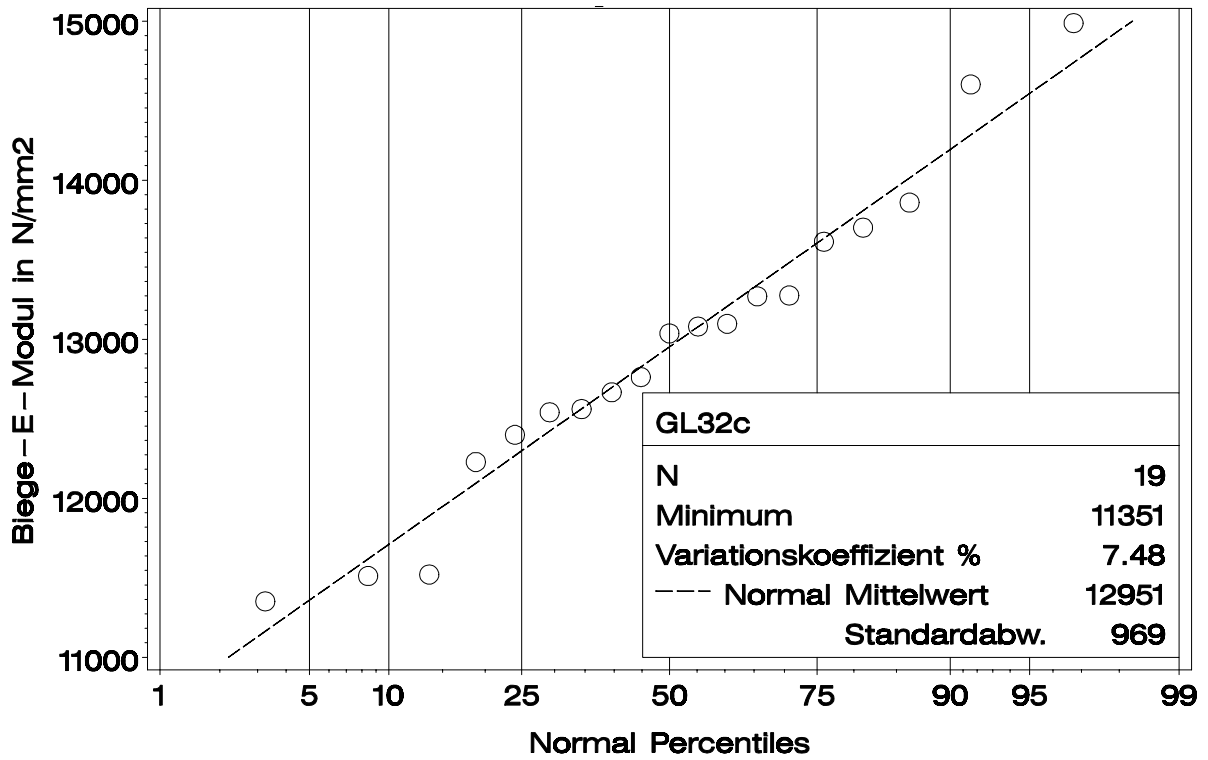


Bild A-6 Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung des Biege-Elastizitätsmoduls; Reihen 1, 2 und 5 (oben) und Reihen 3, 4 und 6 (unten)

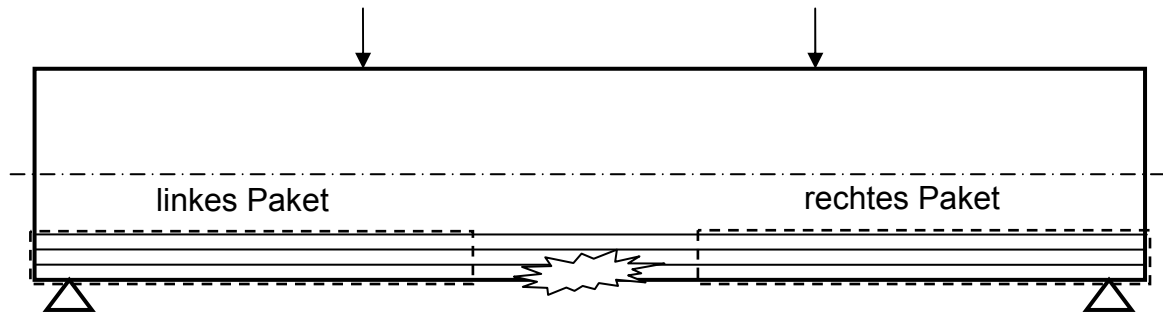


Bild A-7 Lage der abgetrennten dreilagigen Pakete links und rechts von der Bruchstelle

Tabelle A-5 Rohdichte und dynamischer Elastizitätsmodul der dreilagigen Pakete

Träger Nr.	Klasse	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>		dyn. Elastizitätsmodul N/mm <sup>2</sup>	
		linke Seite	rechte Seite	linke Seite	rechte Seite
3	GL32c	473	457	13900	13400
5		469	467	14100	12500
6		484	501	15500	- <sup>1</sup>
9		484	503	- <sup>1</sup>	14700
10		453	472	13400	14900
1	GL36c	575	514	18700	17000
2		516	526	16900	15900
4		538	545	16800	16500
7		546	523	17600	16600
8		528	533	16300	17500

<sup>1</sup> aufgrund von Rissen nicht bestimmbar

Tabelle A-6 Biegefestigkeit und Beobachtungen an der Bruchstelle, Versuchsträger der Serien 5 und 6

Träger Nr.	Klasse	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	Beobachtung an der Randlamelle	zugehöriger DAB-Wert
3	GL32c	34,5	Holzversagen	0,41
5		37,3	Keilzinkenversagen	-
6		29,9	Holzversagen; starke Faserabweichung und Druckholz, s. Bild A-8	-
9		39,7	Keilzinkenversagen	-
10		32,7	Holzversagen; evtl. mechanische Vorschädigung an der Bruchstelle	0,11
1	GL36c	36,4	Holzversagen an zwei Stellen	0,07 / 0,36
2		36,2	Holz- und Keilzinkenversagen, s. Bild A-9	0,38
4		34,3	Holzversagen, s. Bild A-10	0,57 <sup>2</sup>
7		30,1	Keilzinkenversagen, s. Bild A-10	-
8		45,6	Holzversagen an zwei Stellen	0,16 / 0,40

<sup>2</sup> Astmaß des Kantenasts auf der Breitseite berücksichtigt



Bild A-8 Träger 6: Holzversagen in der Randlamelle; Seitenansicht (links) und Ansicht von unten (rechts) der Bruchstelle



Bild A-9 Träger 2: Kombiniertes Holz- und Keilzinkenversagen

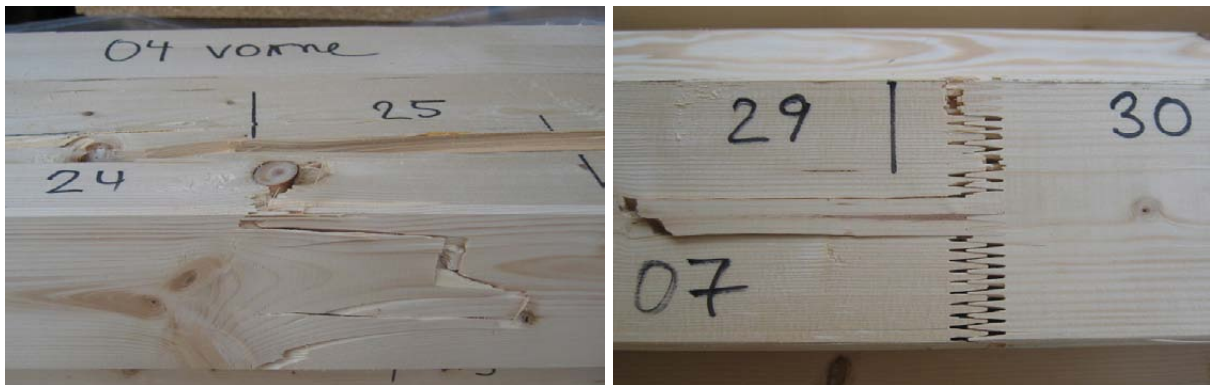


Bild A-10 Träger 4: Holzversagen in der Randlamelle (links); Träger 7: Keilzinkenversagen (rechts)



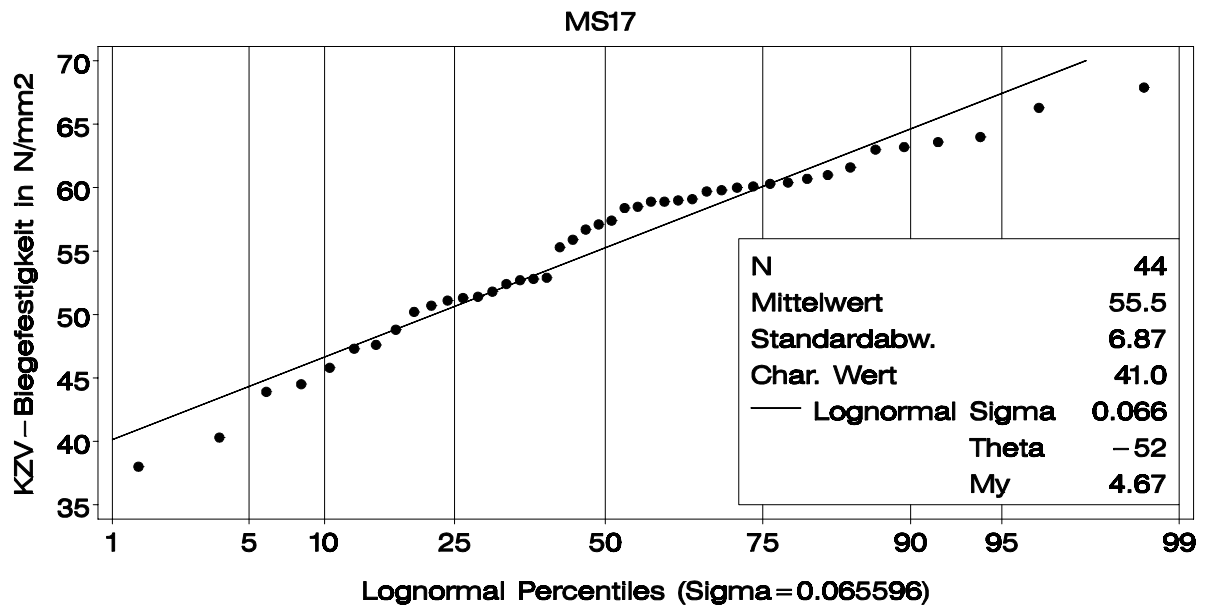
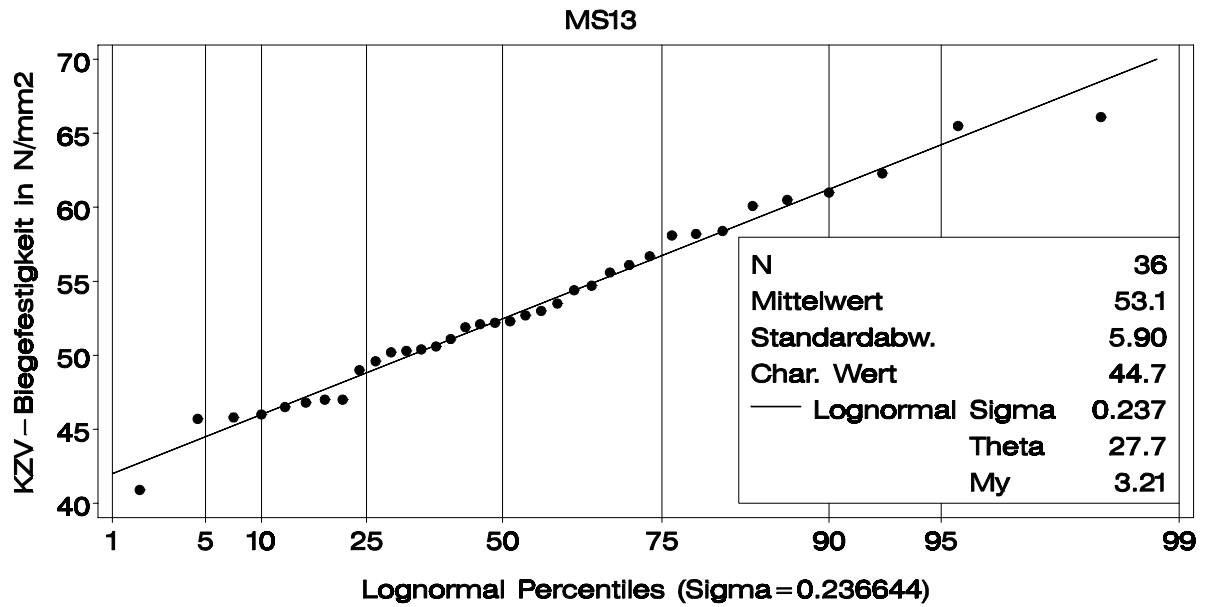


Bild A-11 Keilzinkenbiegefestigkeit: Prüfkörper aus Brettern der Sortierklasse MS13 (oben) und Prüfkörper aus Brettern der Sortierklasse MS17 (unten)

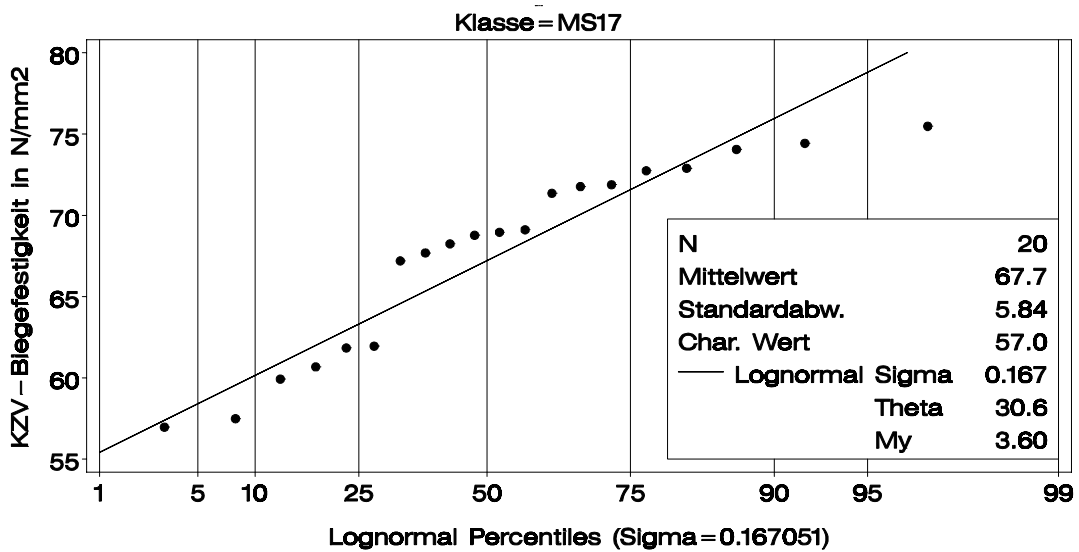
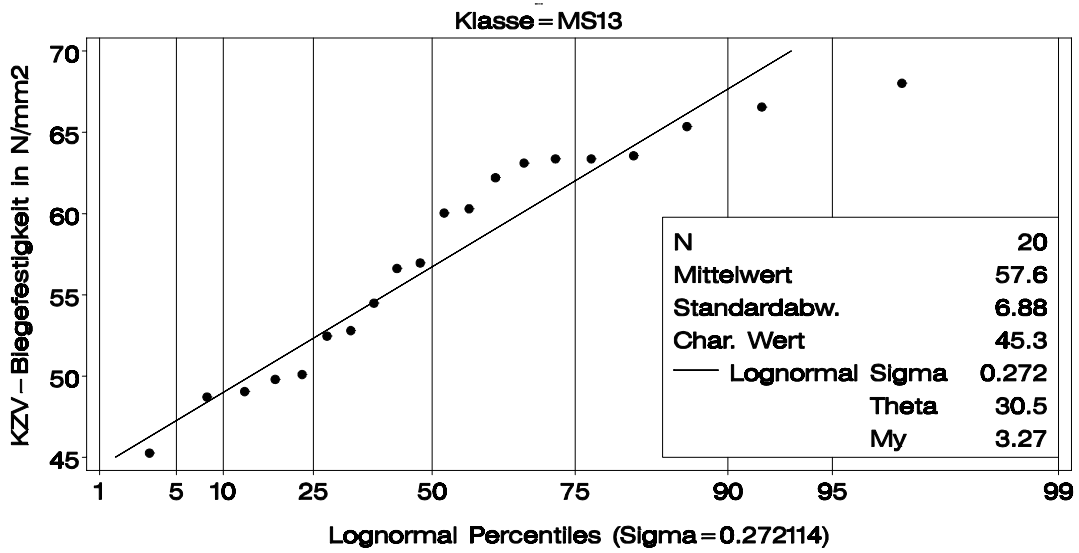
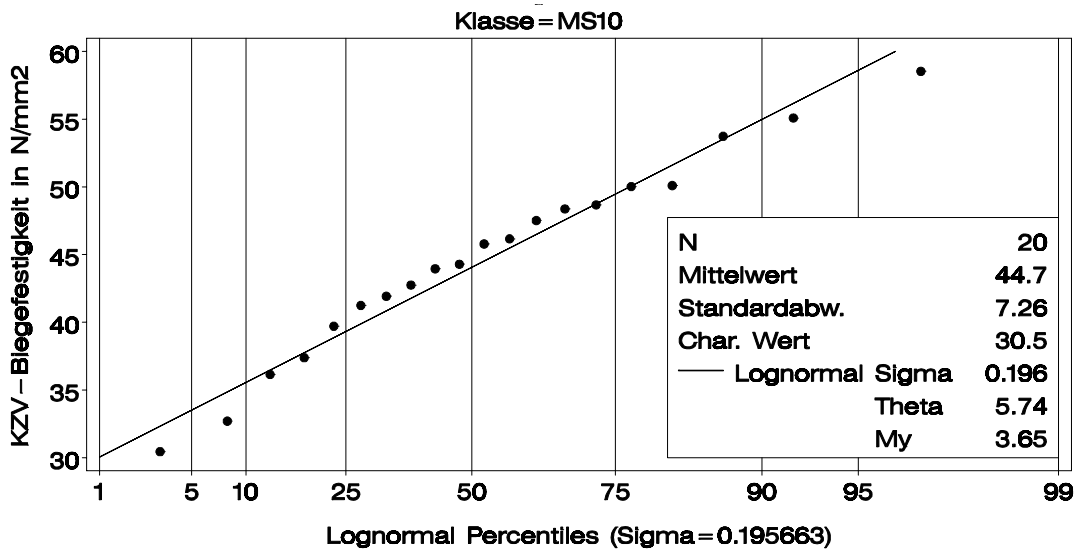


Bild A-12 Keilzinkenbiegefestigkeit: Prüfkörper aus Brettern der Sortierklasse MS10 (oben), MS13 (Mitte) und MS17 (unten)

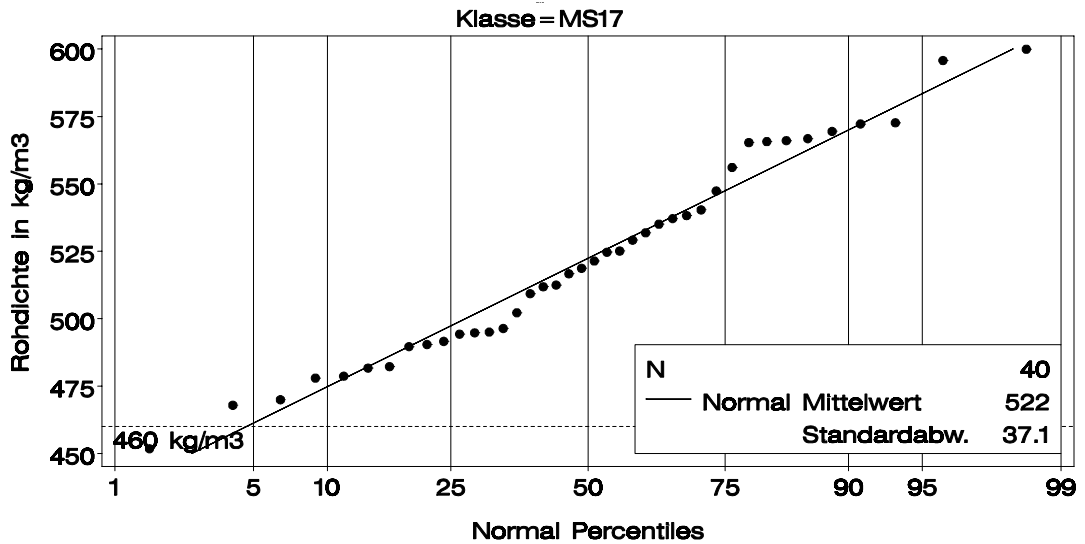
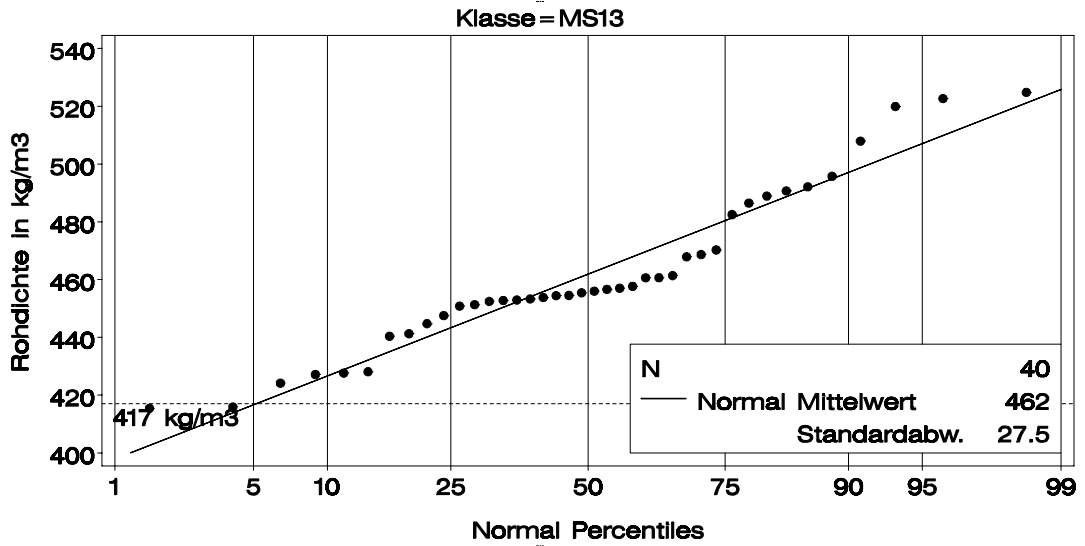
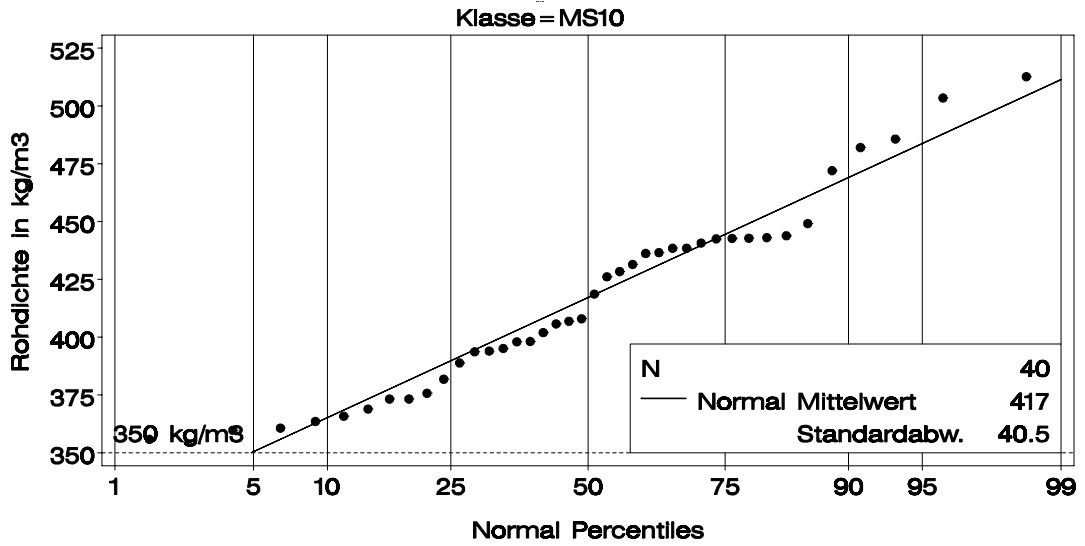


Bild A-13 Rohdichte der zwei Brett-Enden der Keilzinkenproben



## **A 2 Verteilungen der Darrrohdichte und der Ästigkeit sowie Eingabedaten**

- Die Häufigkeitsverteilungen, die empirischen Verteilungsfunktionen, die angepassten Dichte- und Verteilungsfunktionen, die im Rechenmodell zum empirischen Repräsentieren der Sortierverfahren eingegeben wurden, sind in den folgenden Bildern dieses Anhangs dargestellt.
- Zur Vereinfachung wurde der folgende Hinweis in der Bildunterschrift jeweils ausgelassen: Häufigkeitsverteilung mit angepasster Betadichte (links) und empirische Verteilungsfunktion sowie angepasste Betaverteilung (rechts).
- Der Name der dargestellten Eigenschaft, Rohdichte oder KAR-Wert, bildet zusammen mit der Bezeichnung des untersuchten Sortierverfahrens die Diagrammüberschrift.
- Aufgrund der ausgeprägten Formflexibilität (zwei Formparameter „Alpha“ und „Beta“) und der unteren und oberen Schranke („Threshold“ und „Scale“) der Betaverteilung wurde diese für die Anpassung an die Daten verwendet. Ausnahmen sind die Normalverteilungen für die Darrrohdichte der finnischen Sortierverfahren.
- In einigen Fällen war es erforderlich Werte auszuschließen, um für die Gesamtheit der Daten eine bessere Anpassung zu erzielen. Darauf wird in den Bildunterschriften jeweils hingewiesen. Diese Maßnahmen werden im Rechenmodell anhand individueller Einstellungen angemessen berücksichtigt.

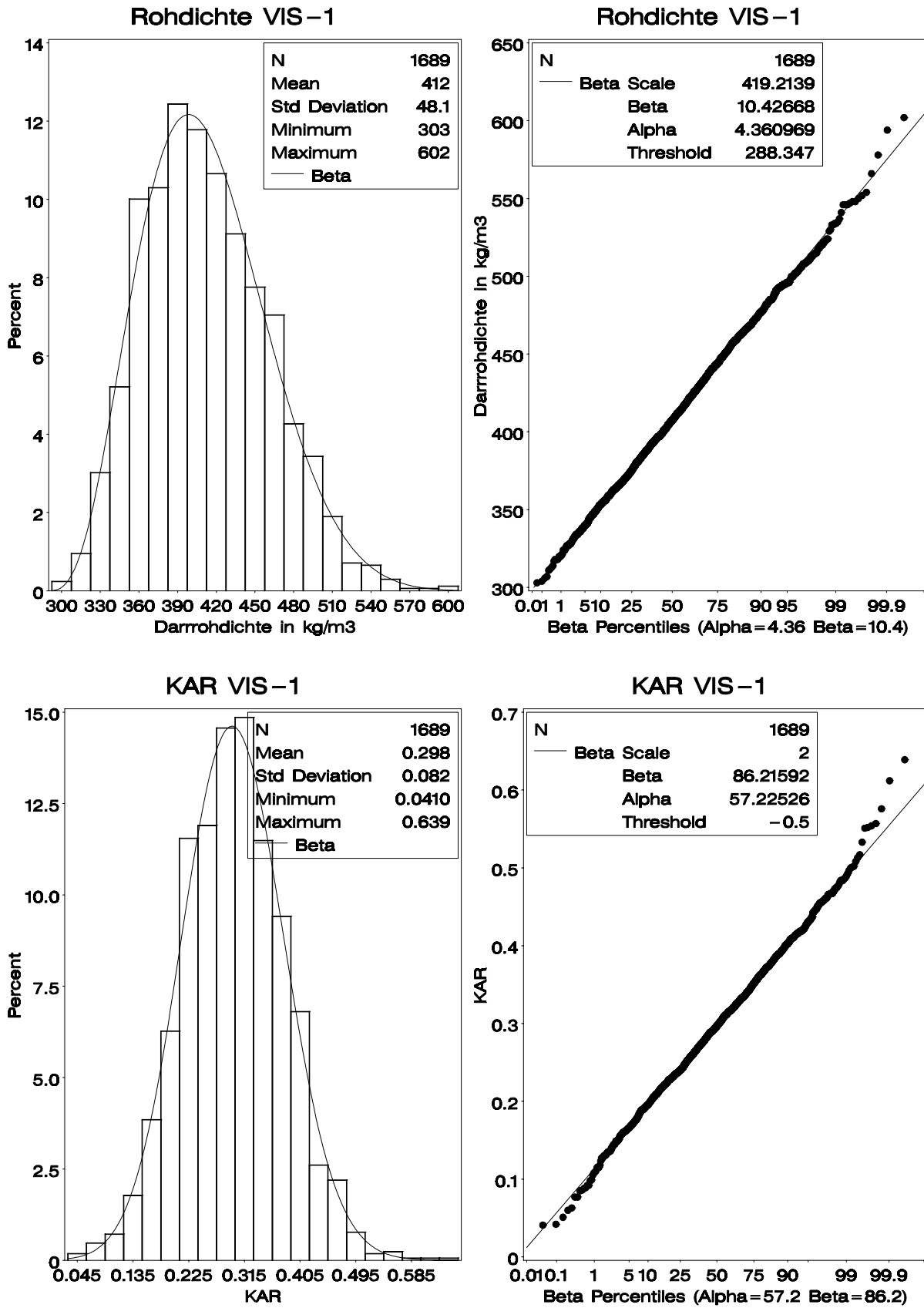


Bild A-14 Sortierverfahren VIS-1

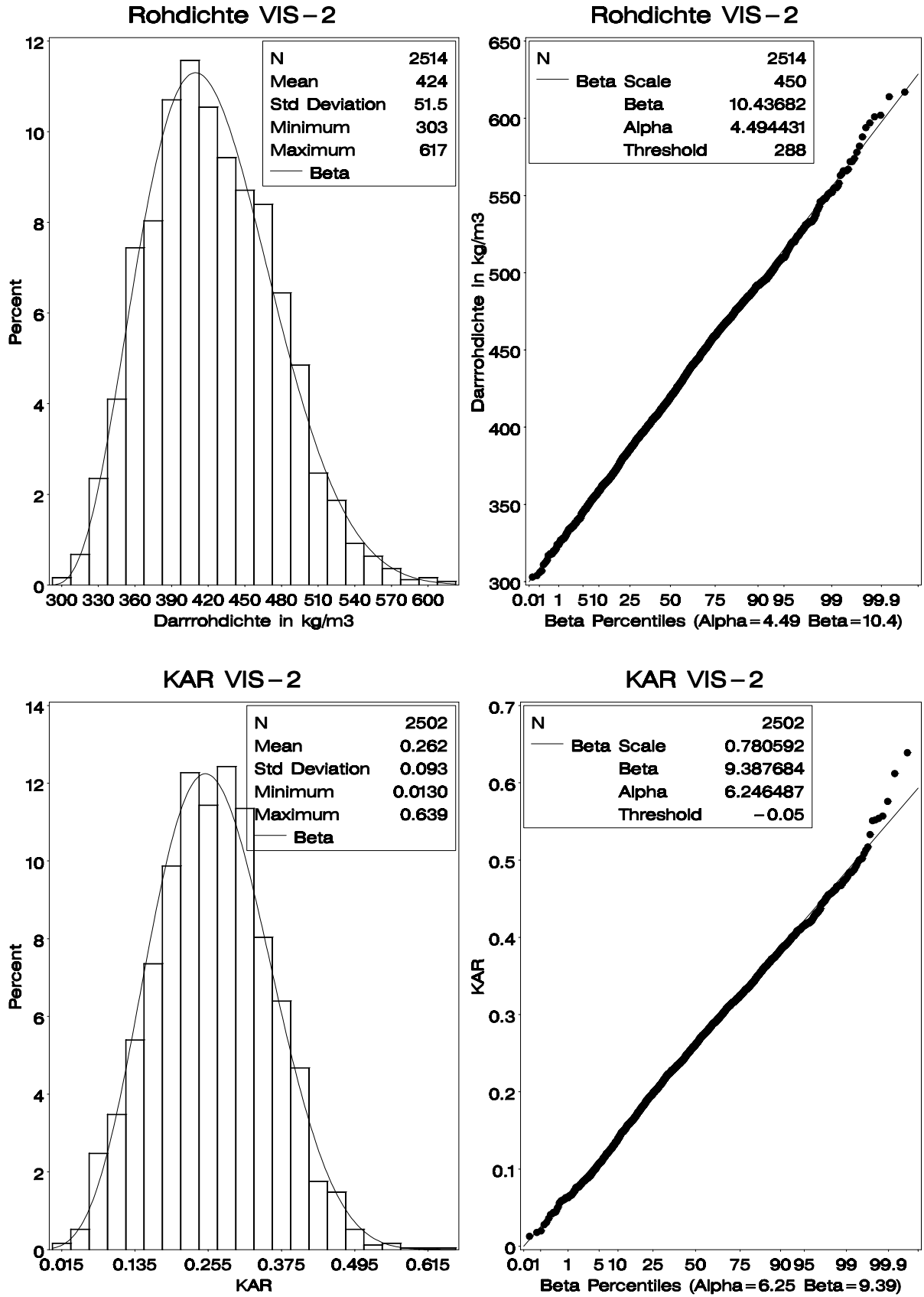


Bild A-15 Sortierverfahren VIS-2; 12 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen

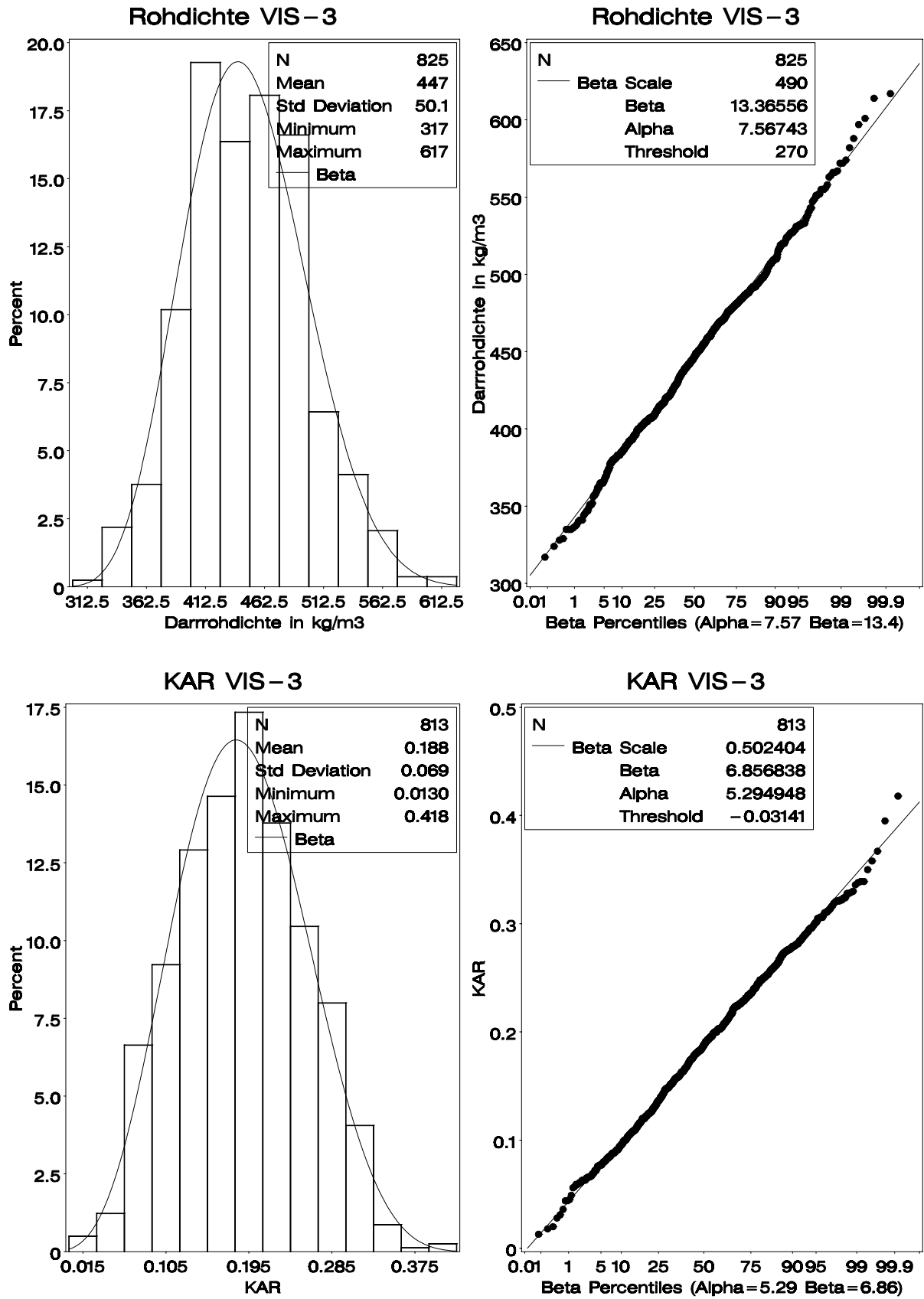


Bild A-16 Sortierverfahren VIS-3; 12 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen



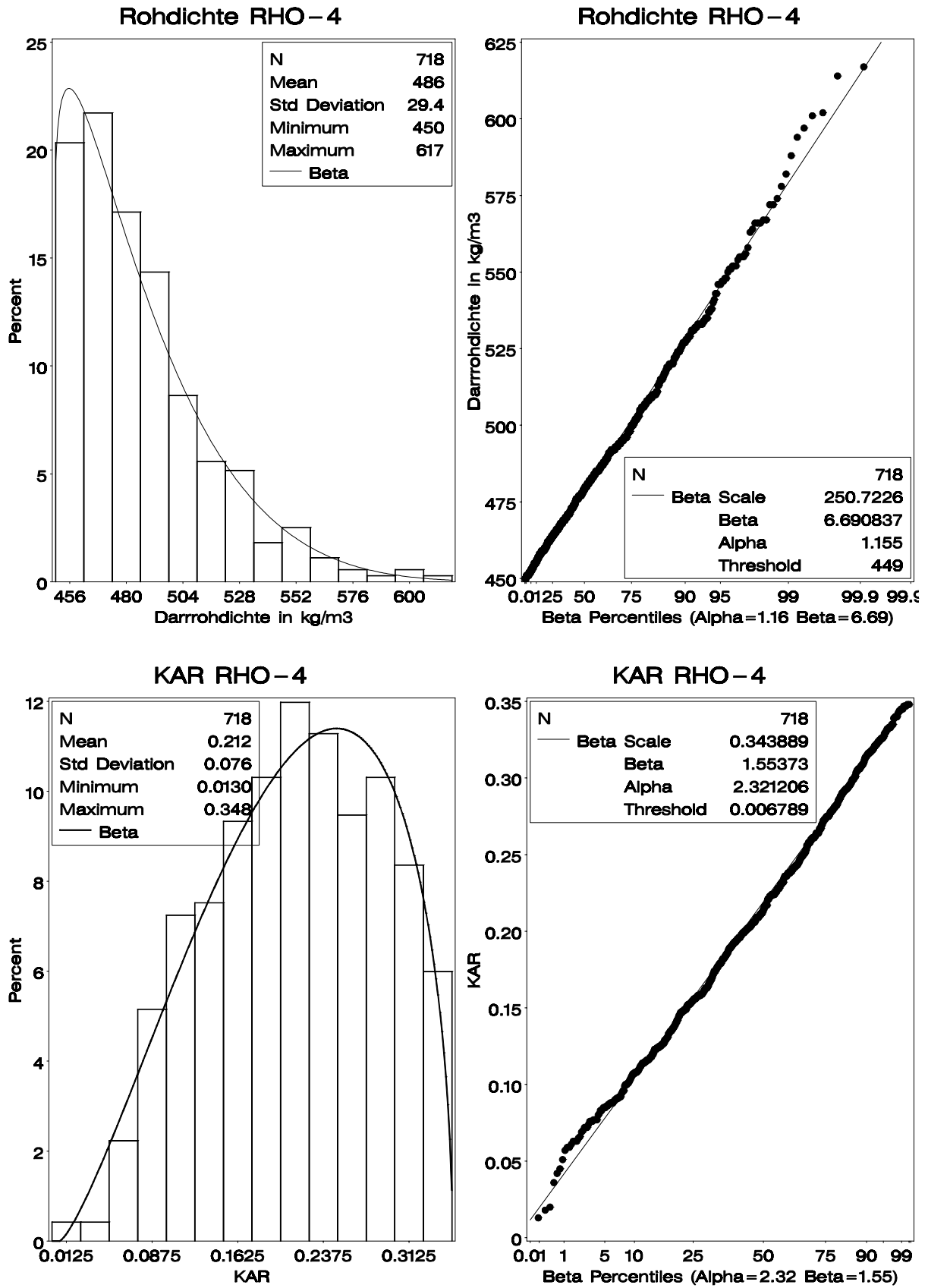


Bild A-17 Sortierverfahren RHO-4

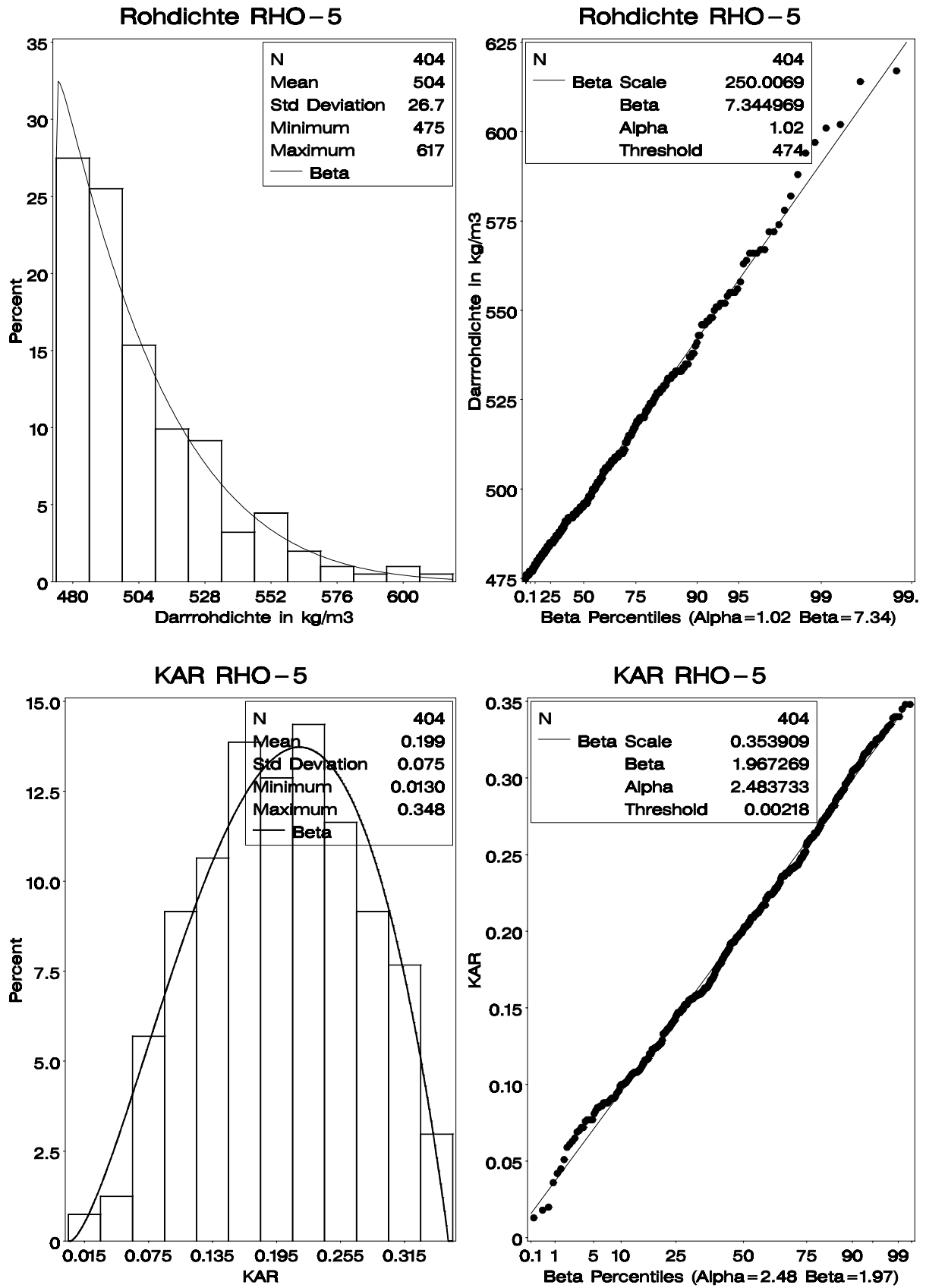


Bild A-18 Sortierverfahren RHO-5

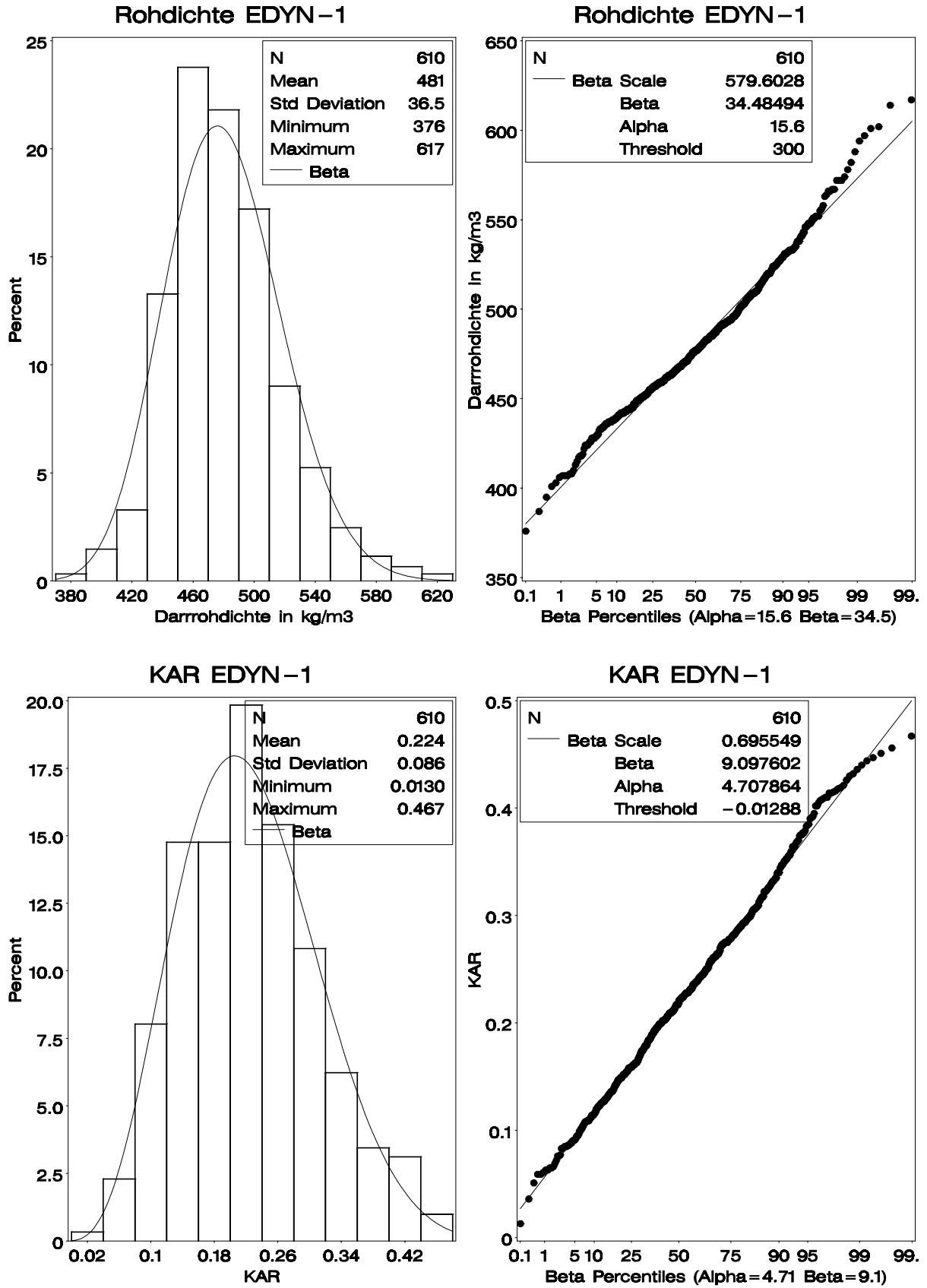


Bild A-19 Sortierverfahren EDYN-1

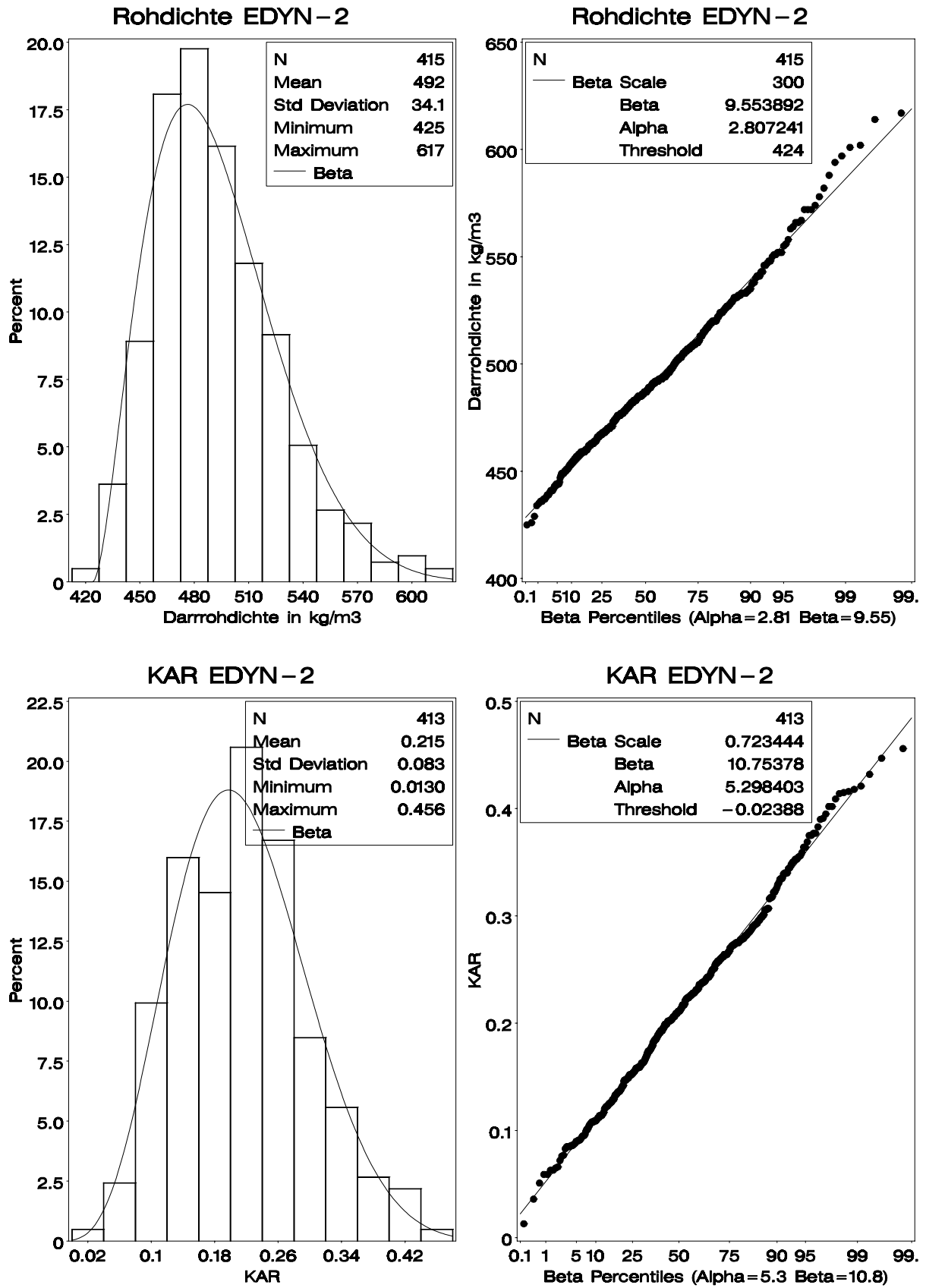


Bild A-20 Sortierverfahren EDYN-2; Darrrohdichte 1 Wert ausgeschlossen; 3 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen

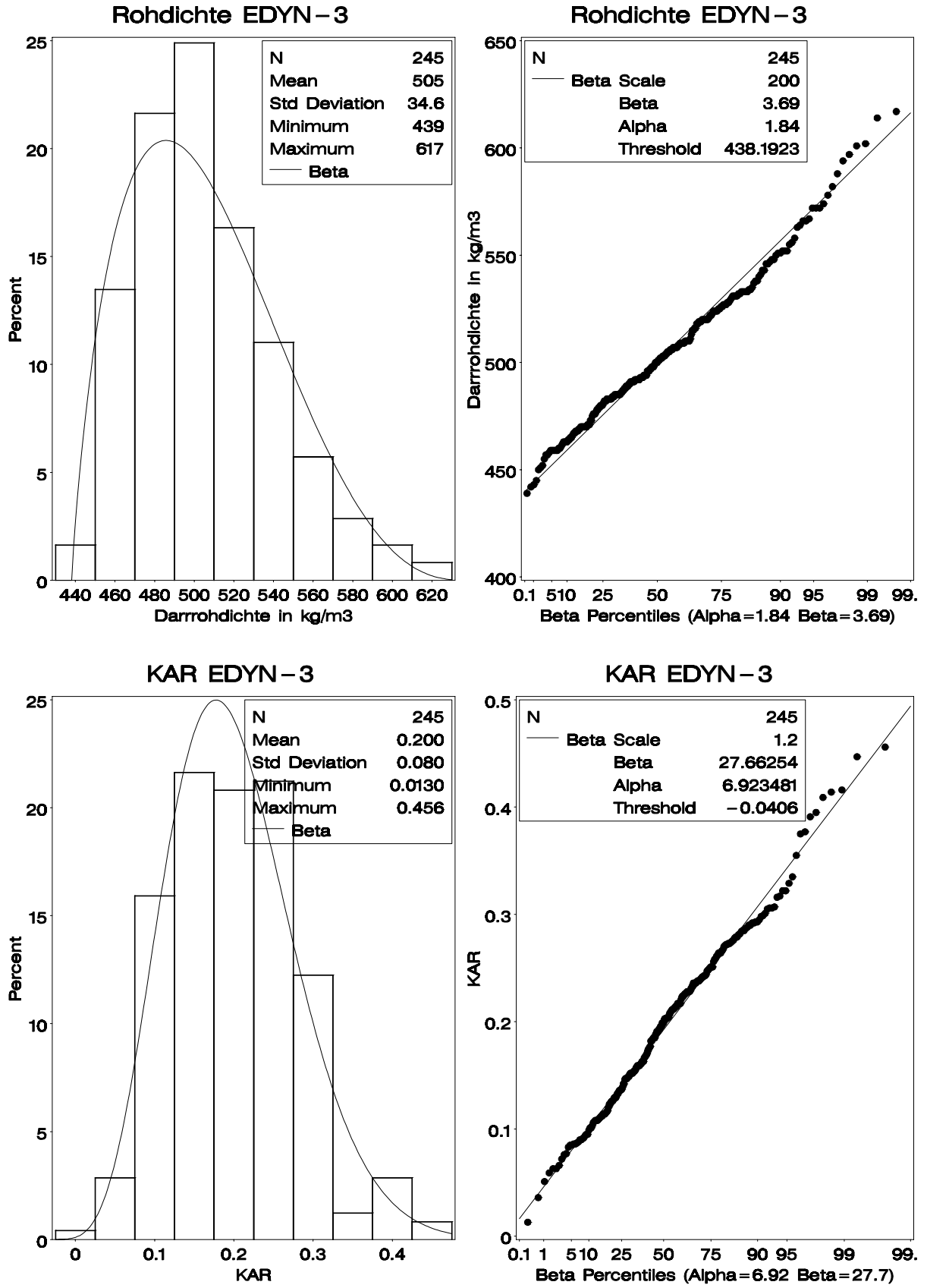


Bild A-21 Sortierverfahren EDYN-3

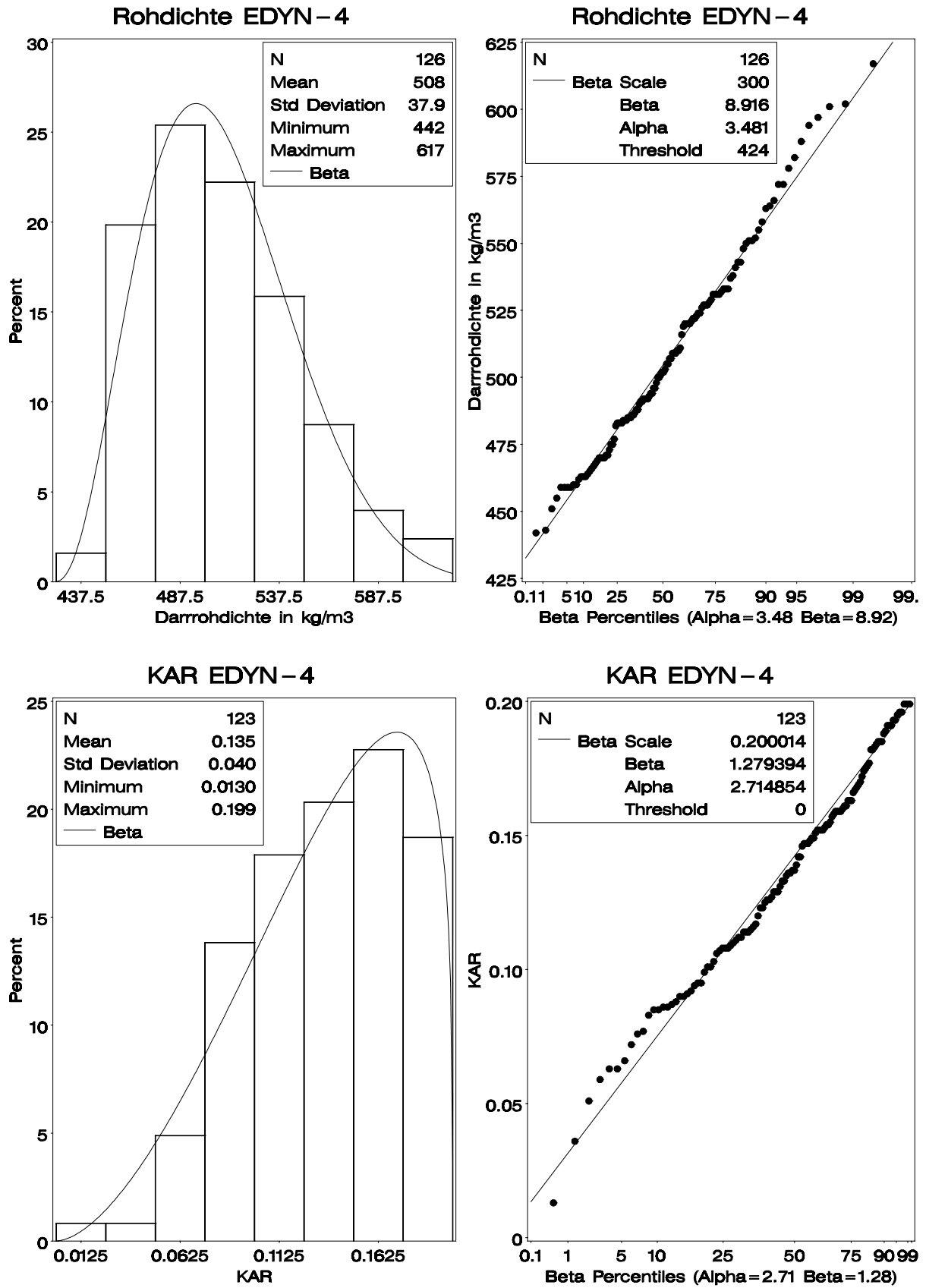


Bild A-22 Sortierverfahren EDYN-4; 3 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen

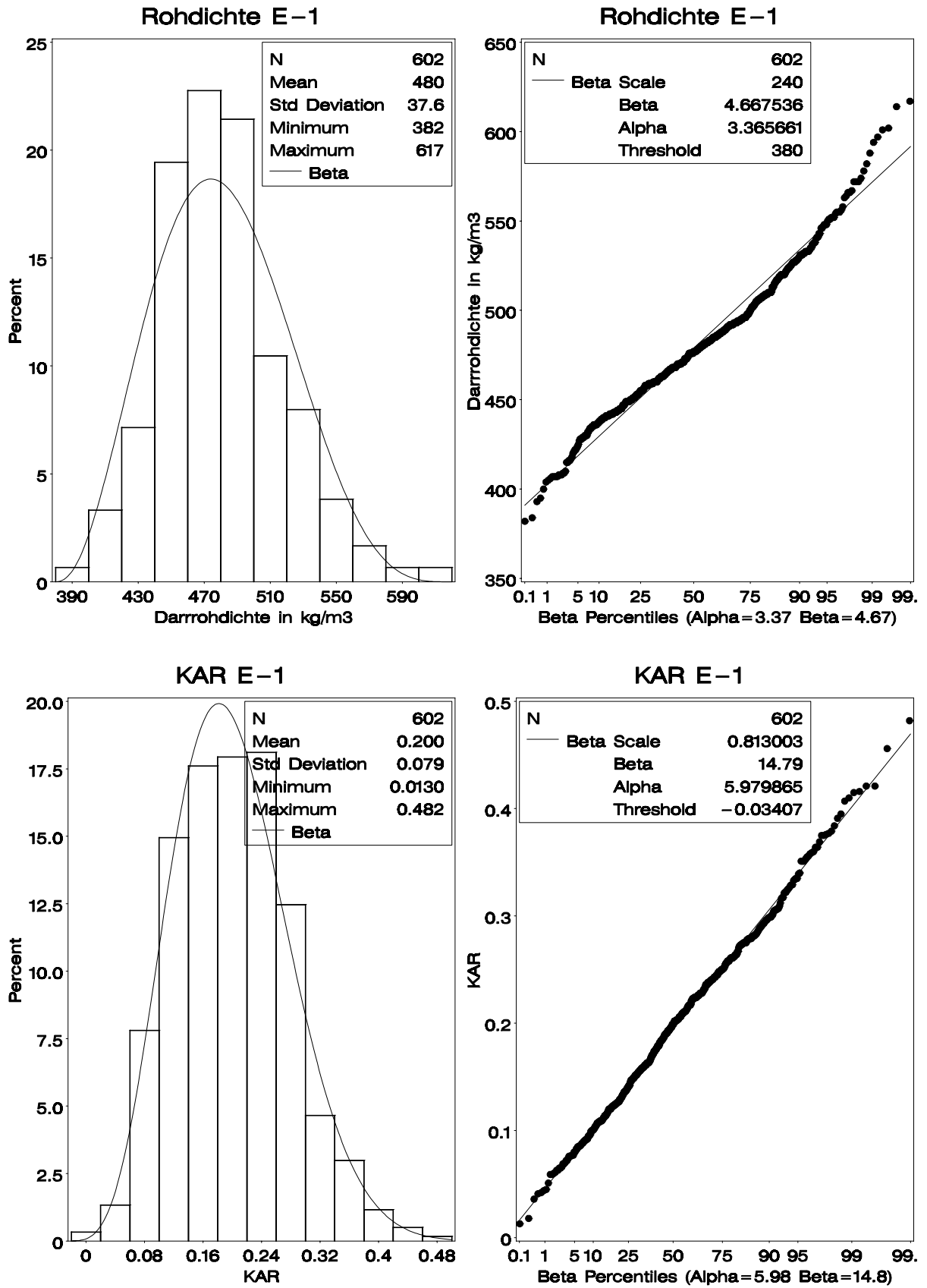


Bild A-23 Sortierverfahren E-1

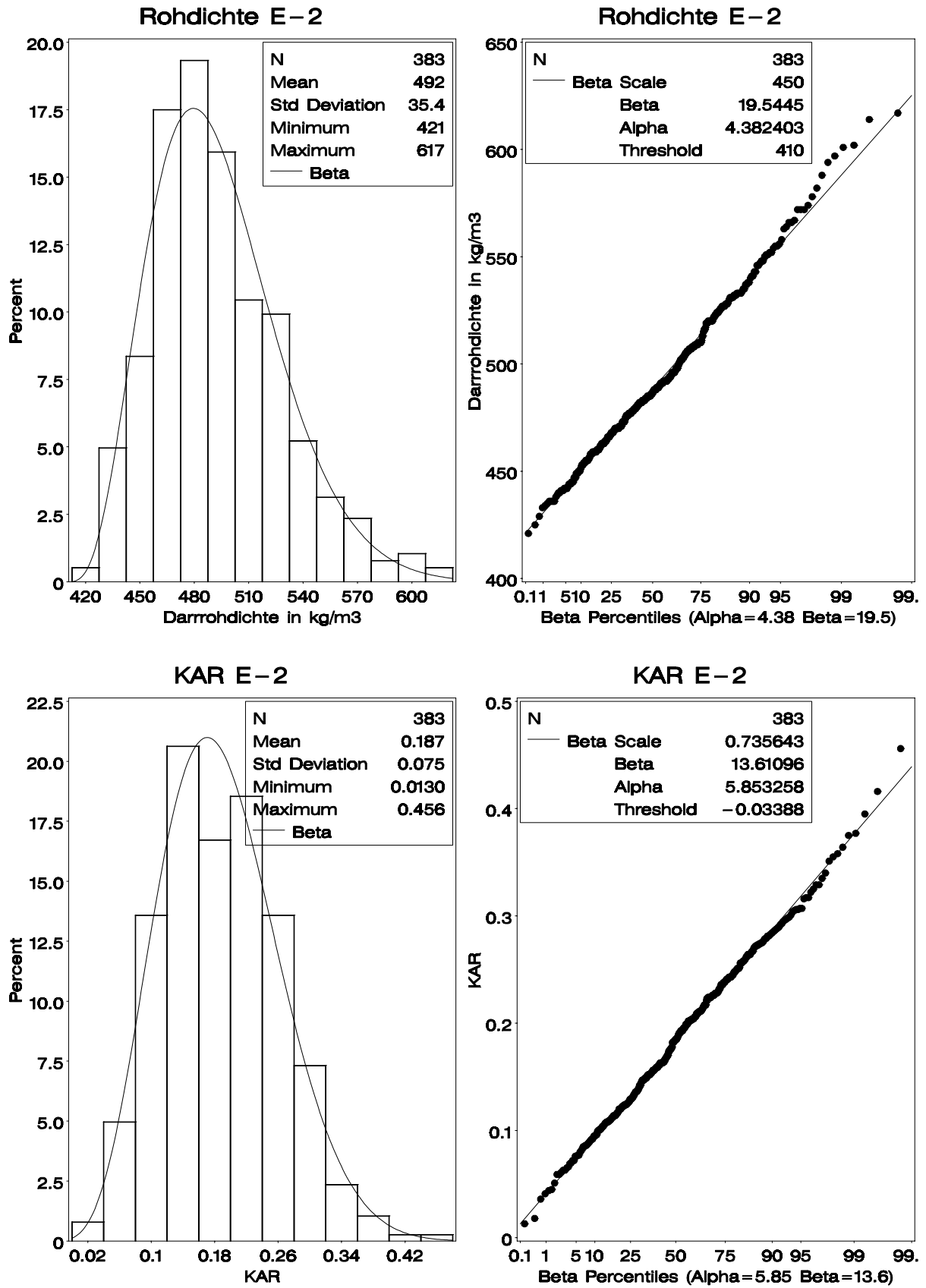


Bild A-24 Sortierverfahren E-2



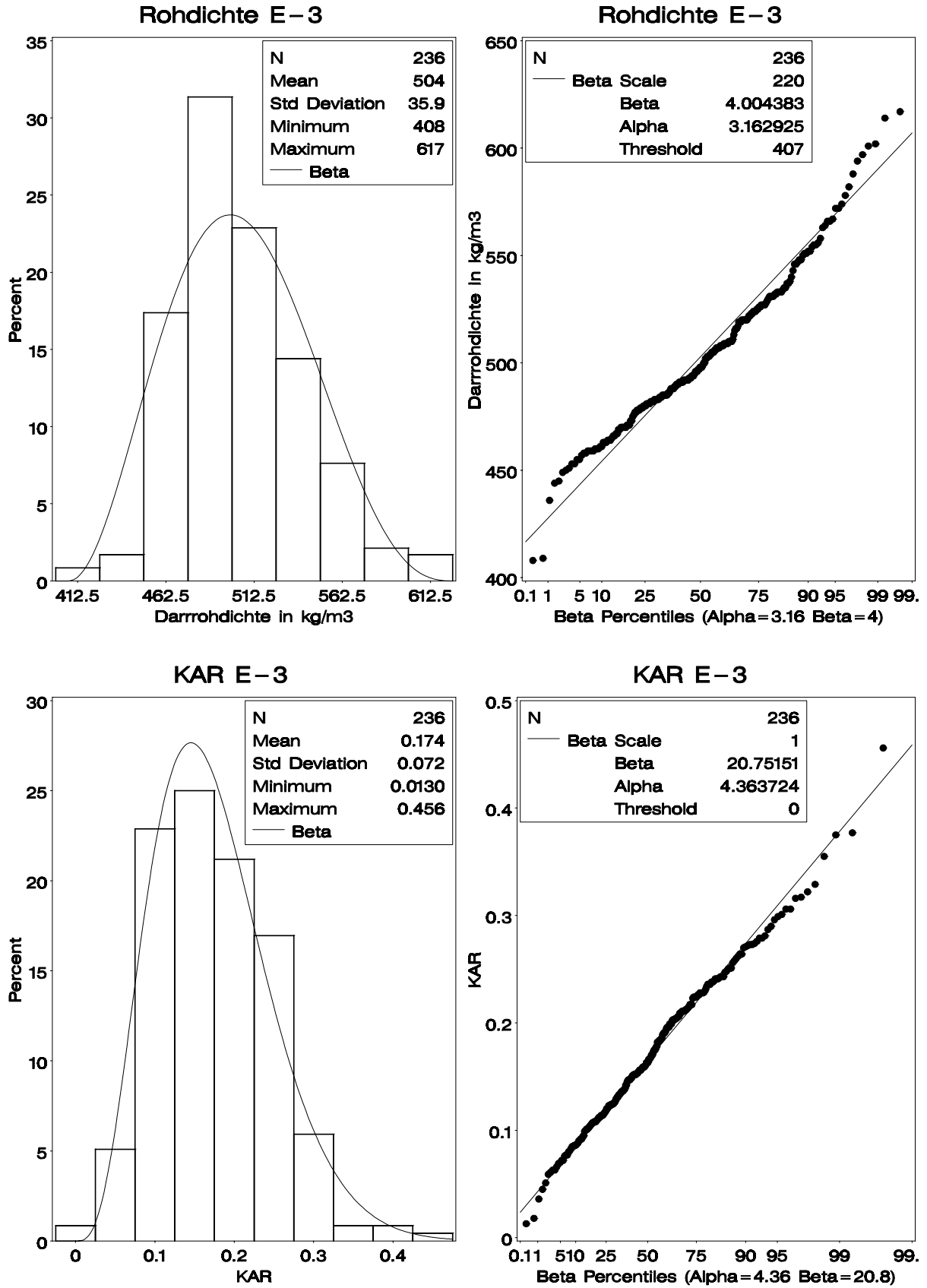


Bild A-25 Sortierverfahren E-3

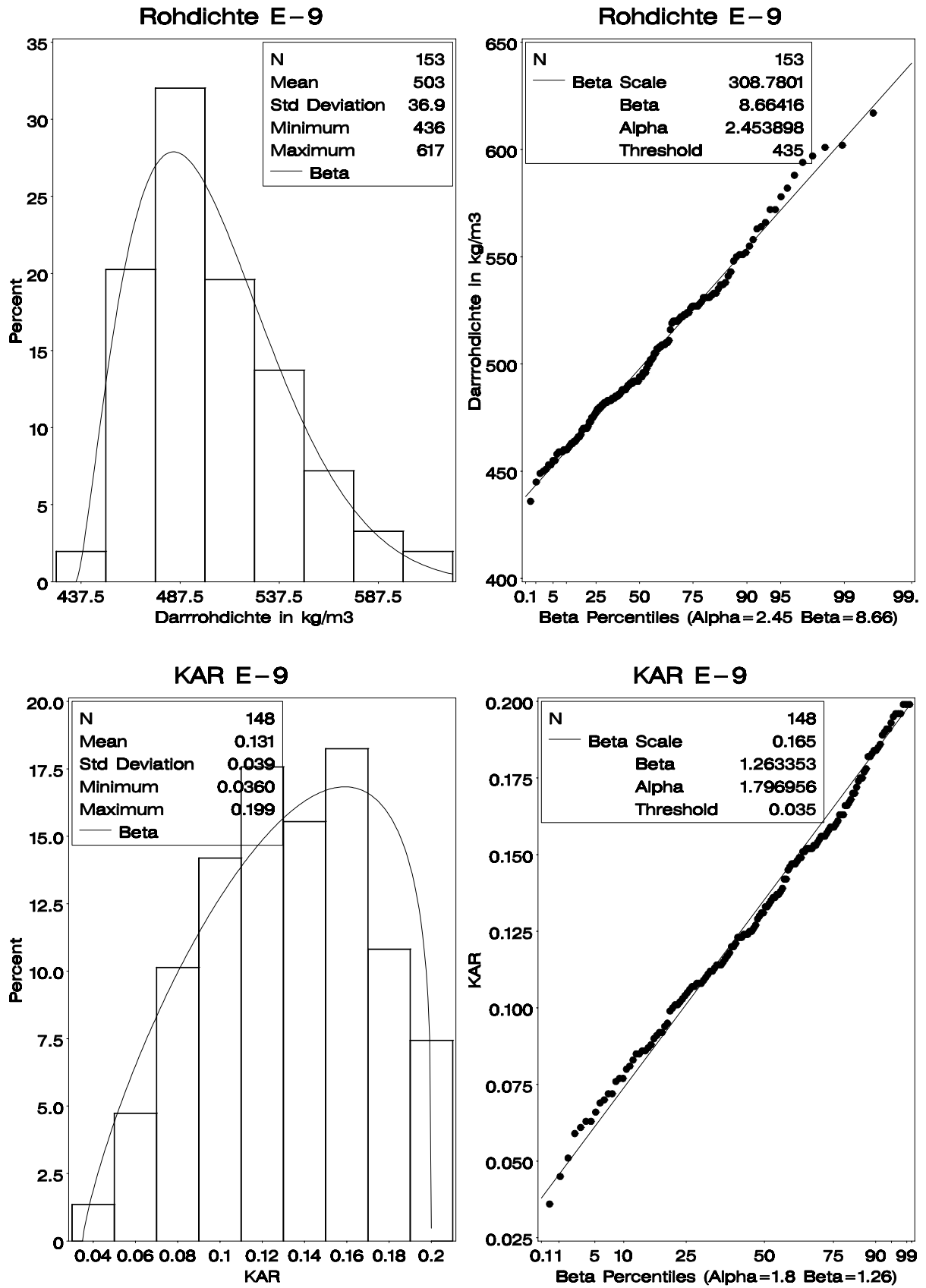


Bild A-26 Sortierverfahren E-9; 5 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen

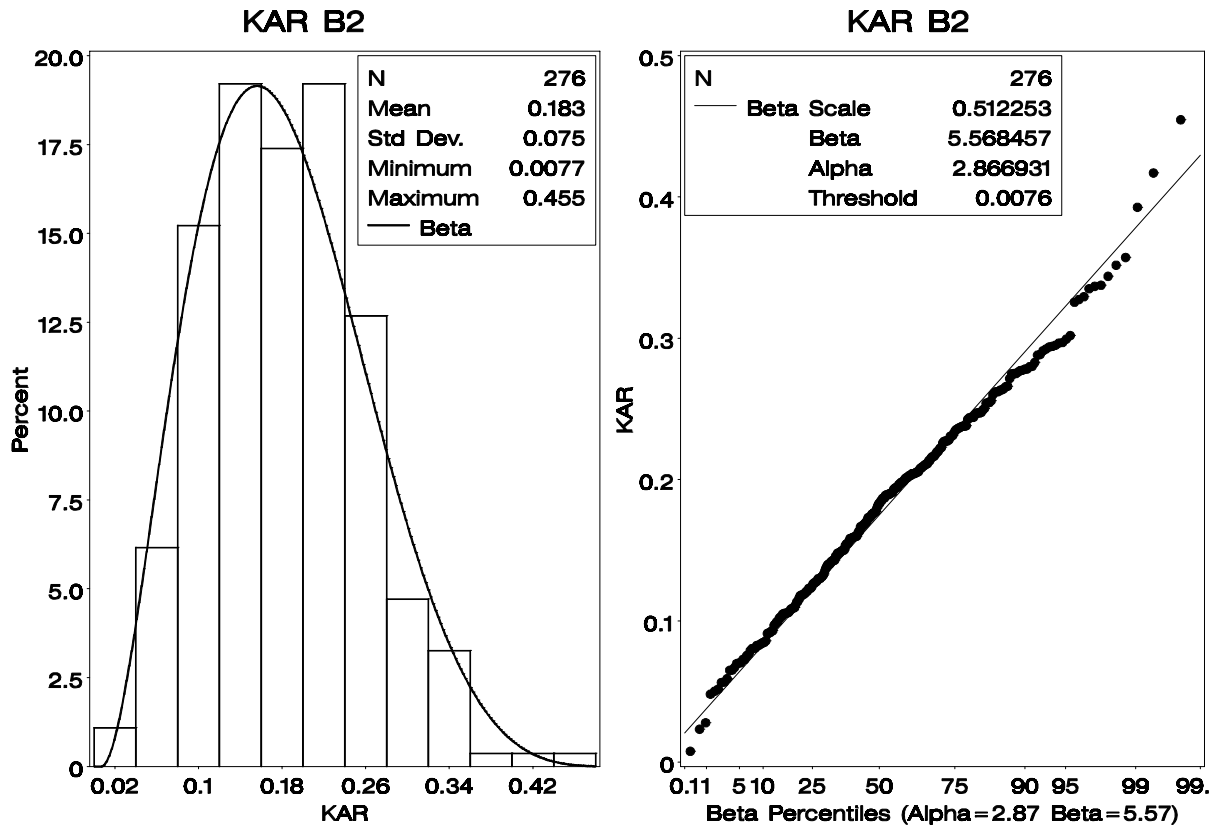


Bild A-27 Sortierverfahren B2

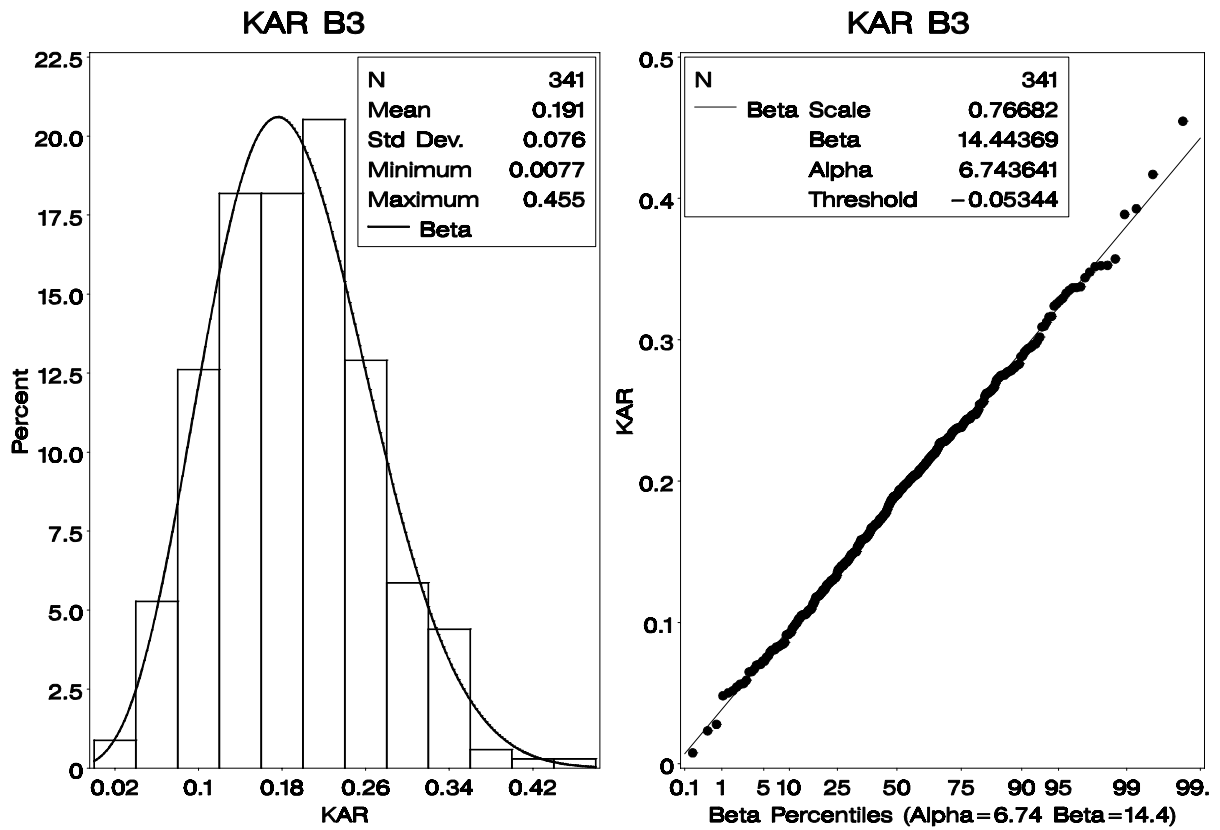


Bild A-28 Sortierverfahren B3; ein Wert mit KAR=0,64 ausgeschlossen

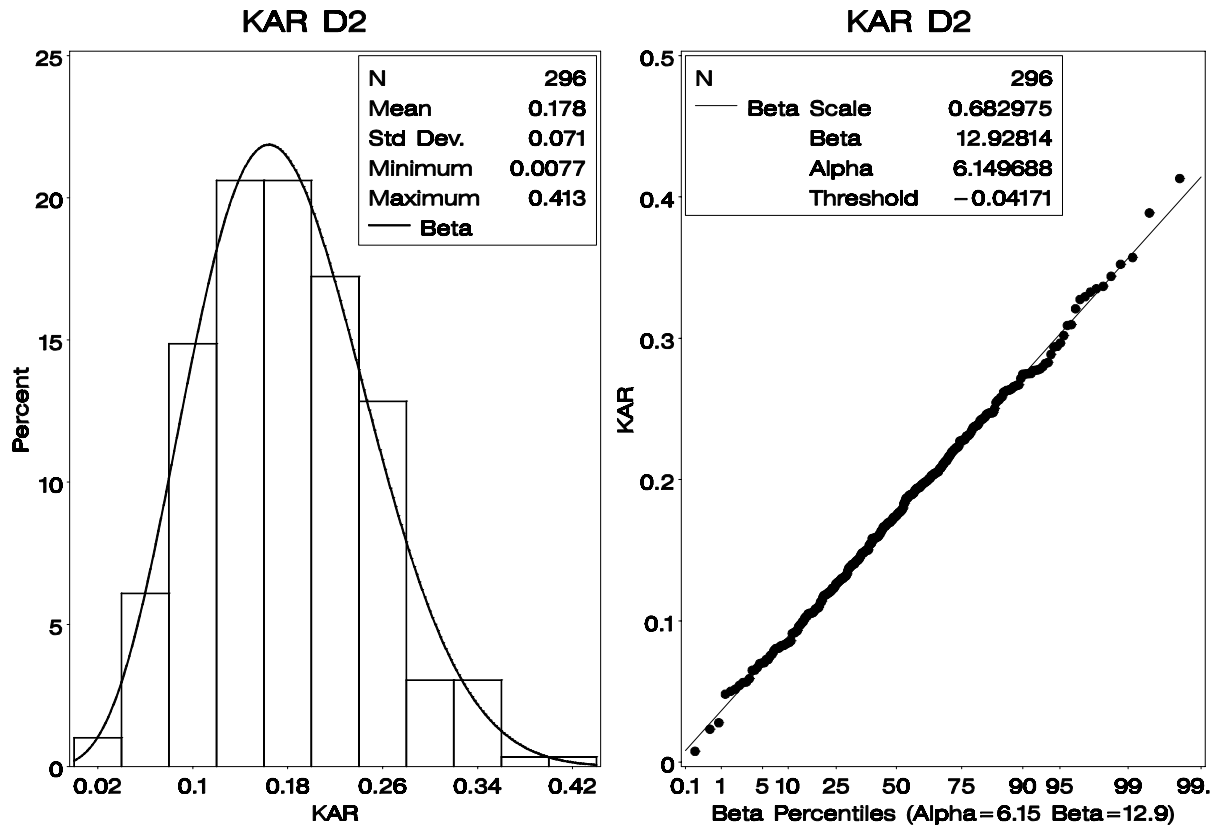


Bild A-29 Sortierverfahren D2

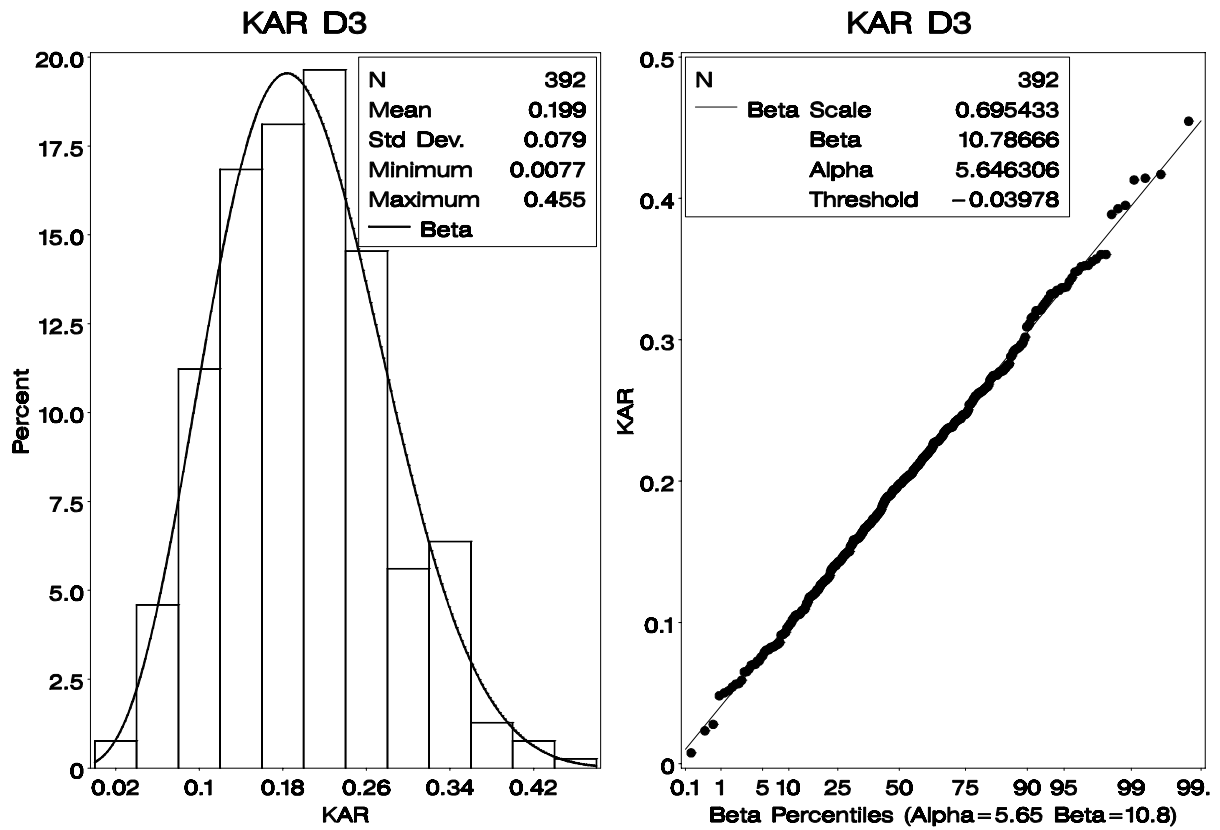


Bild A-30 Sortierverfahren D3

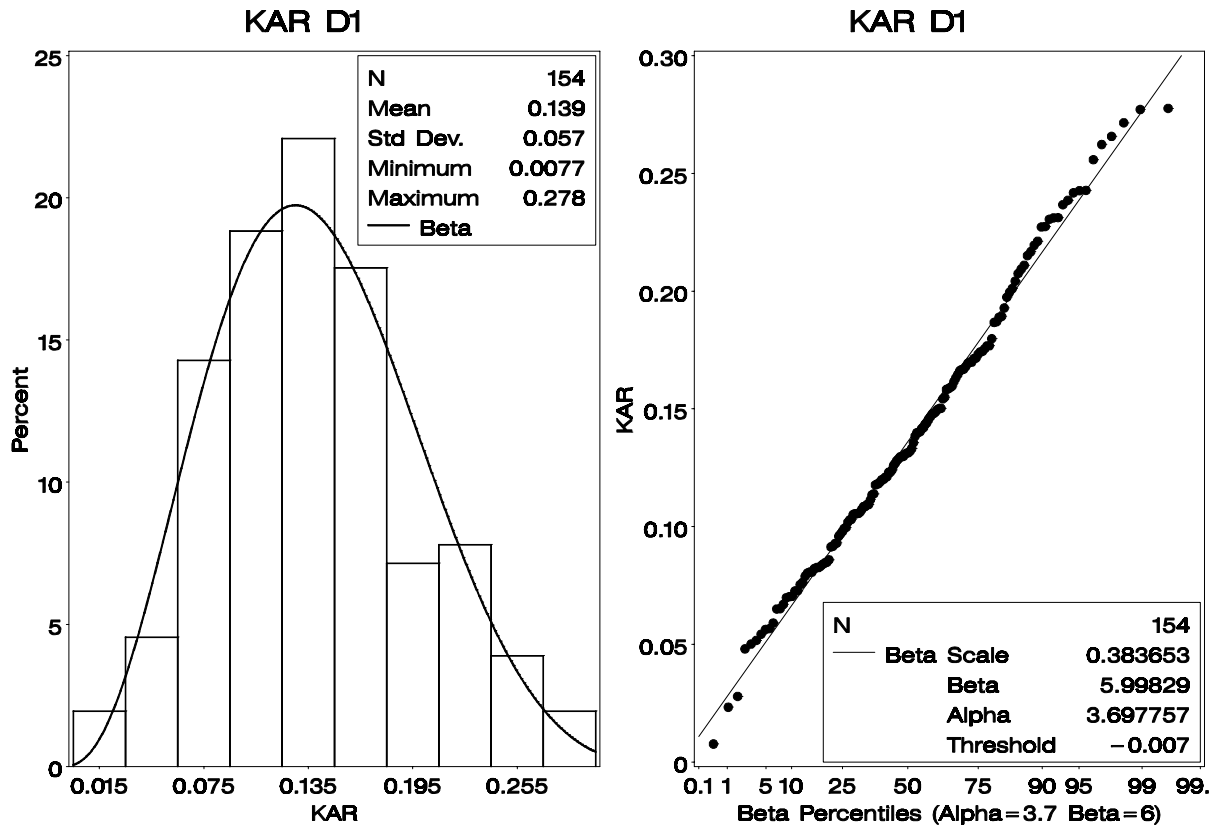


Bild A-31 Sortierverfahren D1

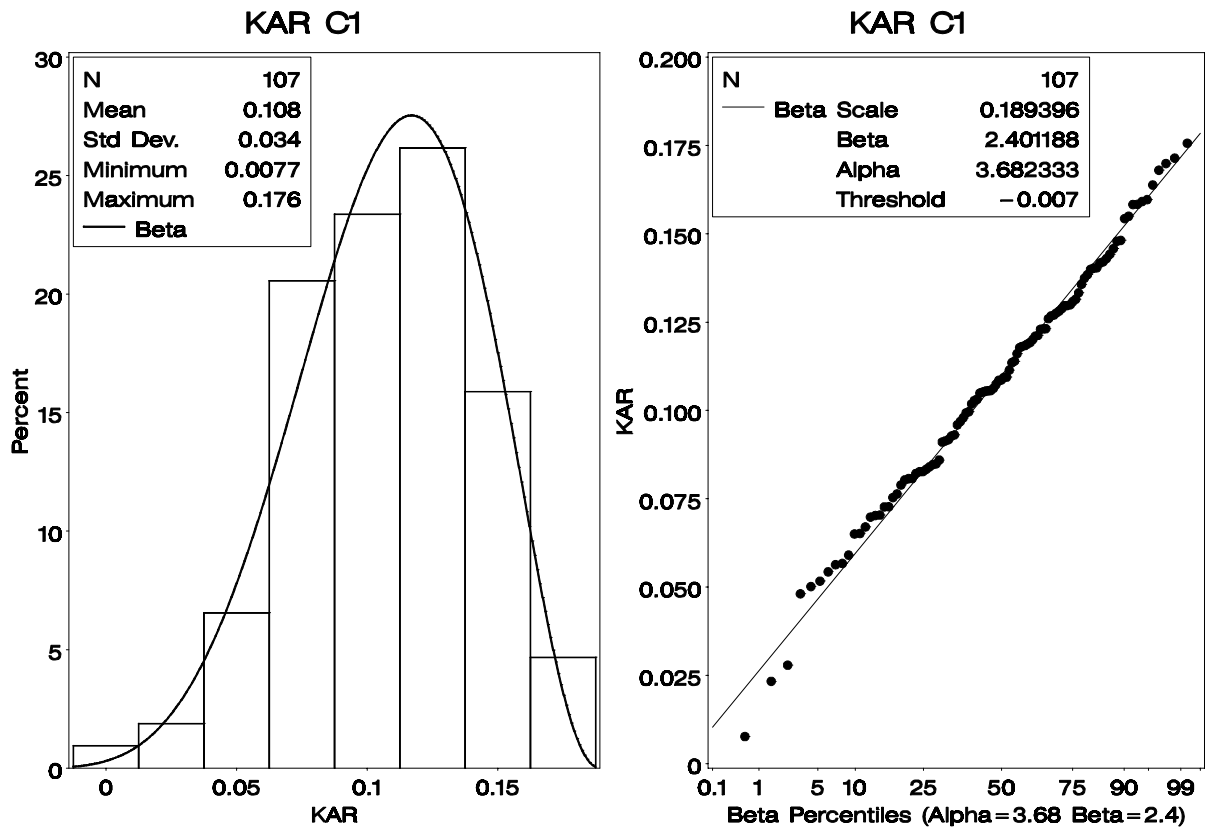


Bild A-32 Sortierverfahren C1

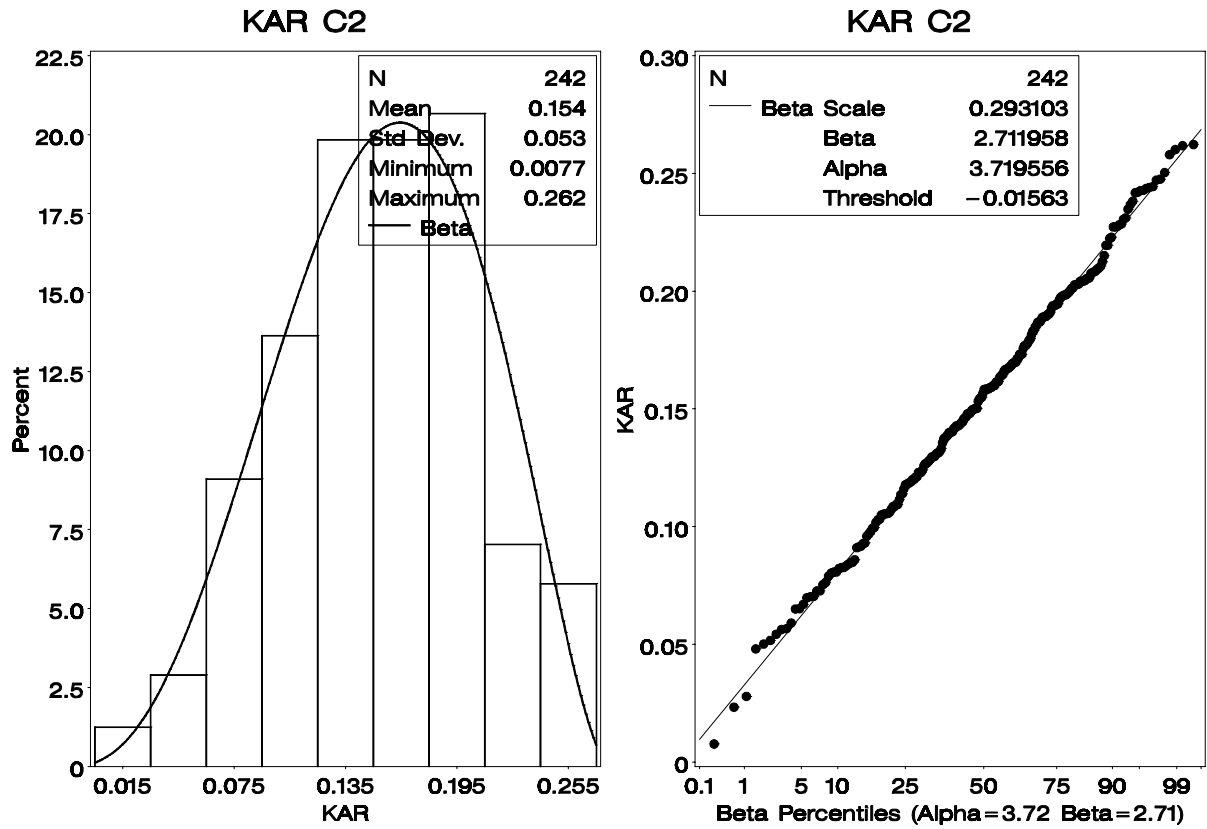


Bild A-33 Sortierverfahren C2

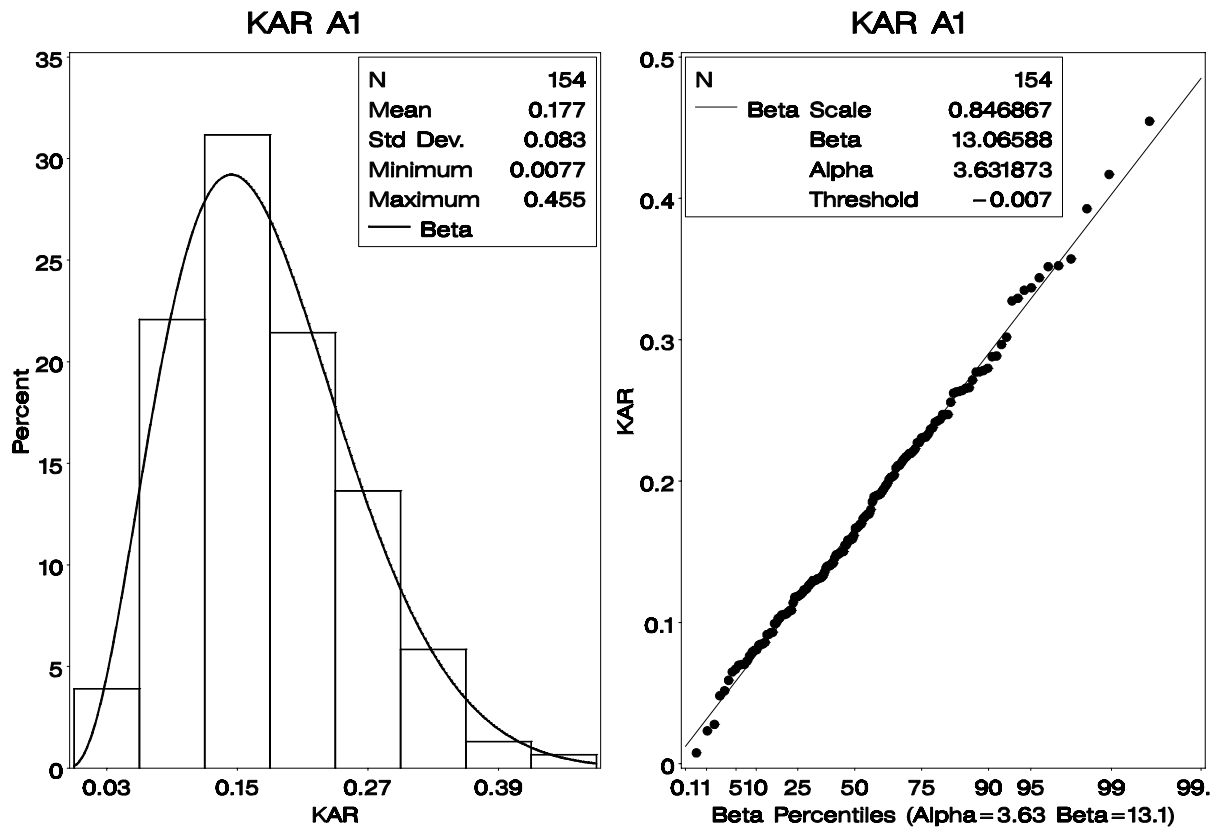


Bild A-34 Sortierverfahren A1

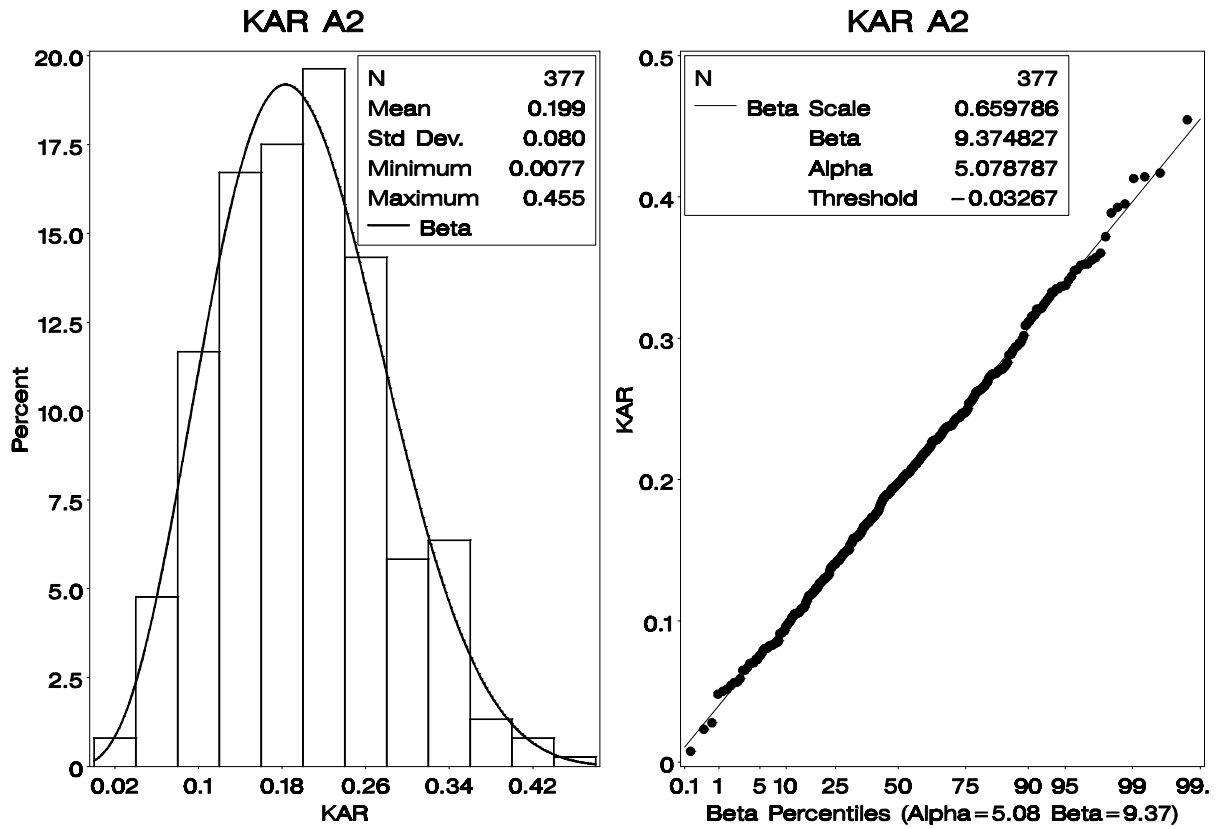


Bild A-35 Sortierverfahren A2; ein Wert mit KAR=0,64 ausgeschlossen

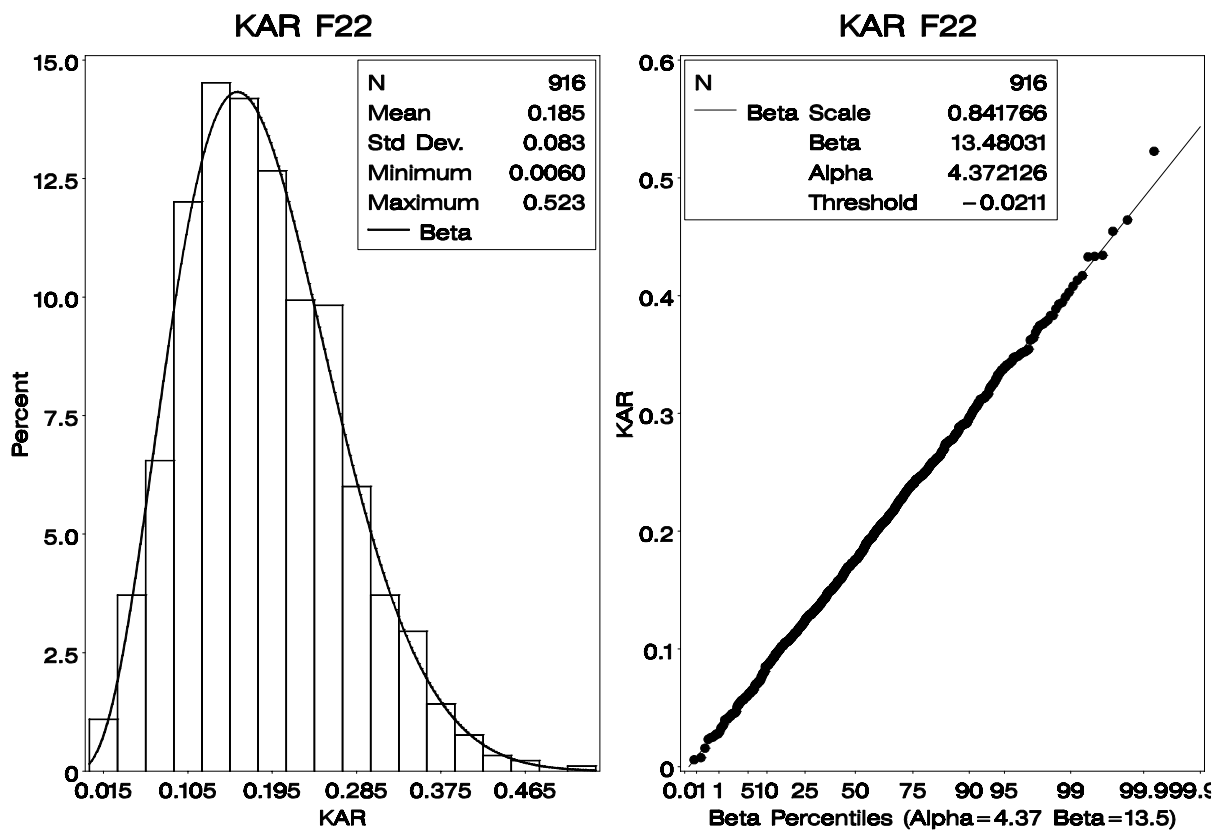


Bild A-36 Sortierverfahren F22; 11 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen

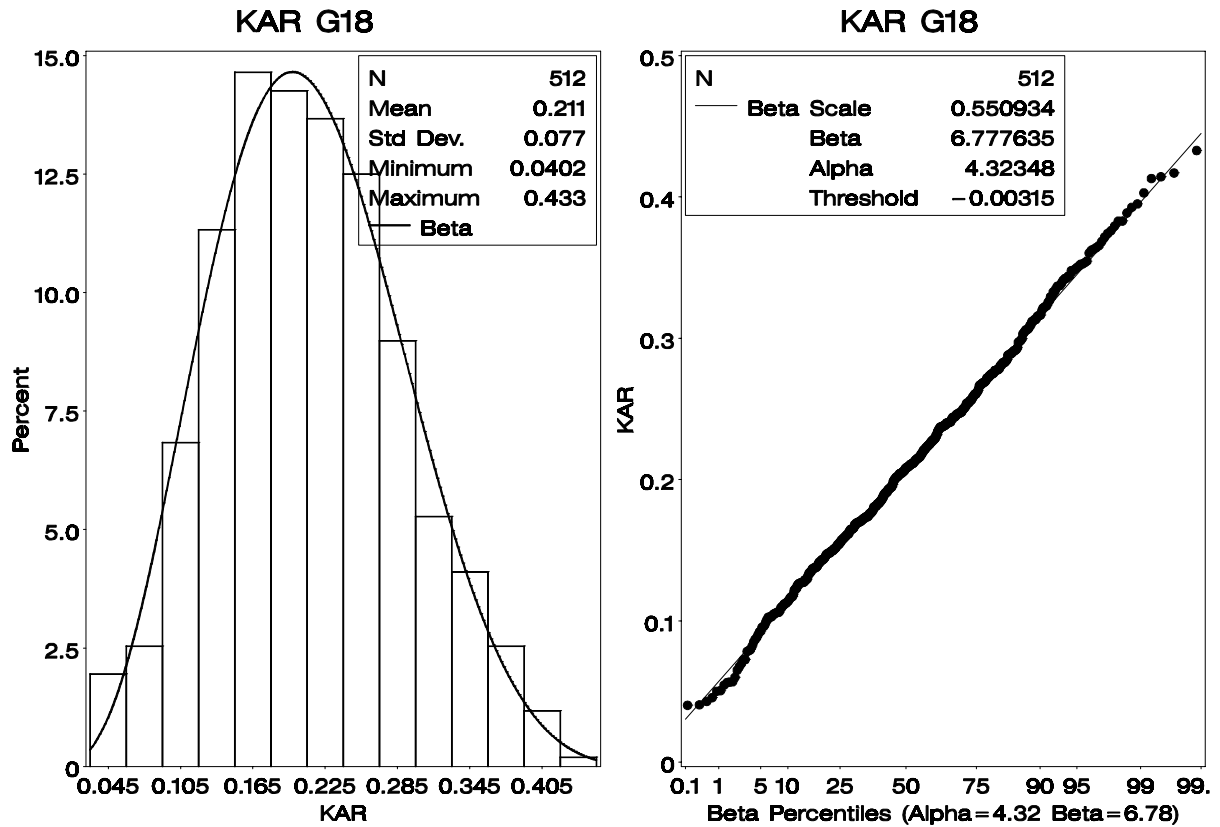


Bild A-37 Sortierverfahren G18; 2 Werte mit KAR=0 bzw. 0,647 ausgeschlossen

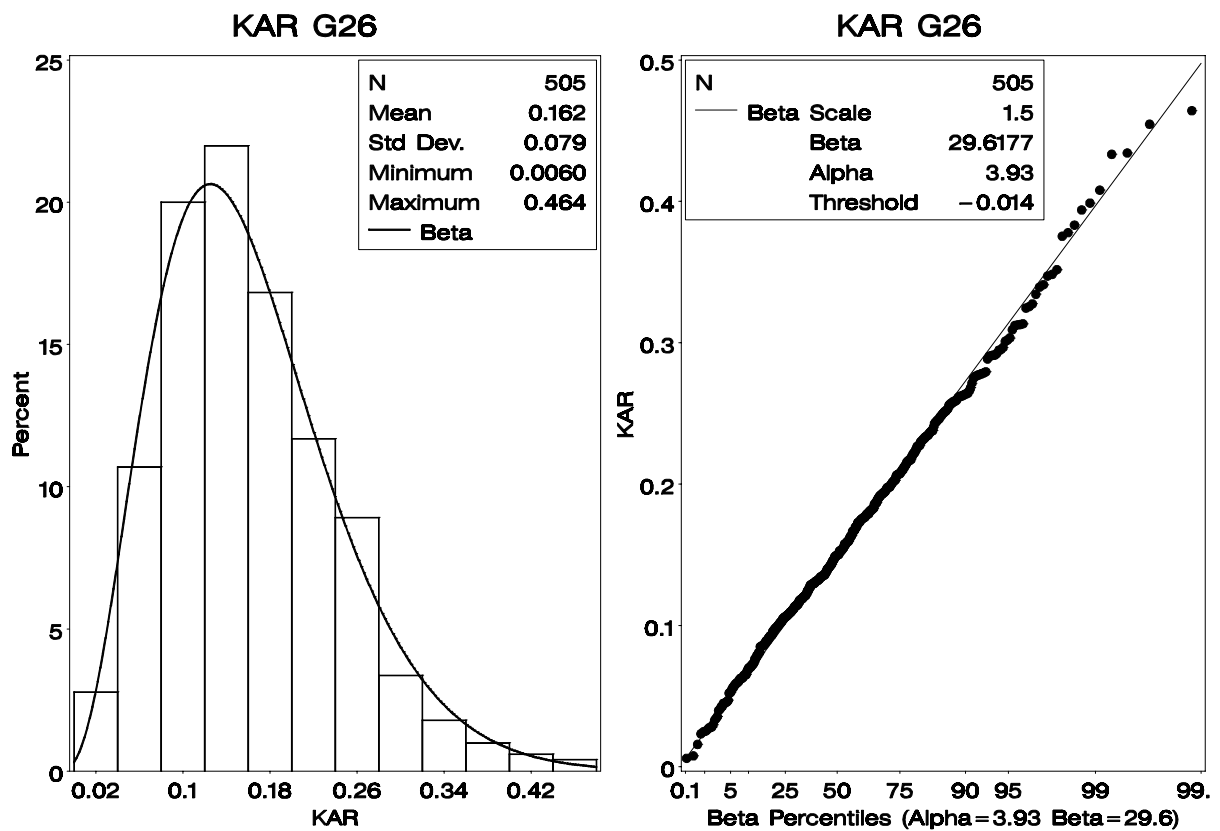


Bild A-38 Sortierverfahren G26; 9 Werte mit KAR=0 und ein Wert mit KAR=0,523 ausgeschlossen



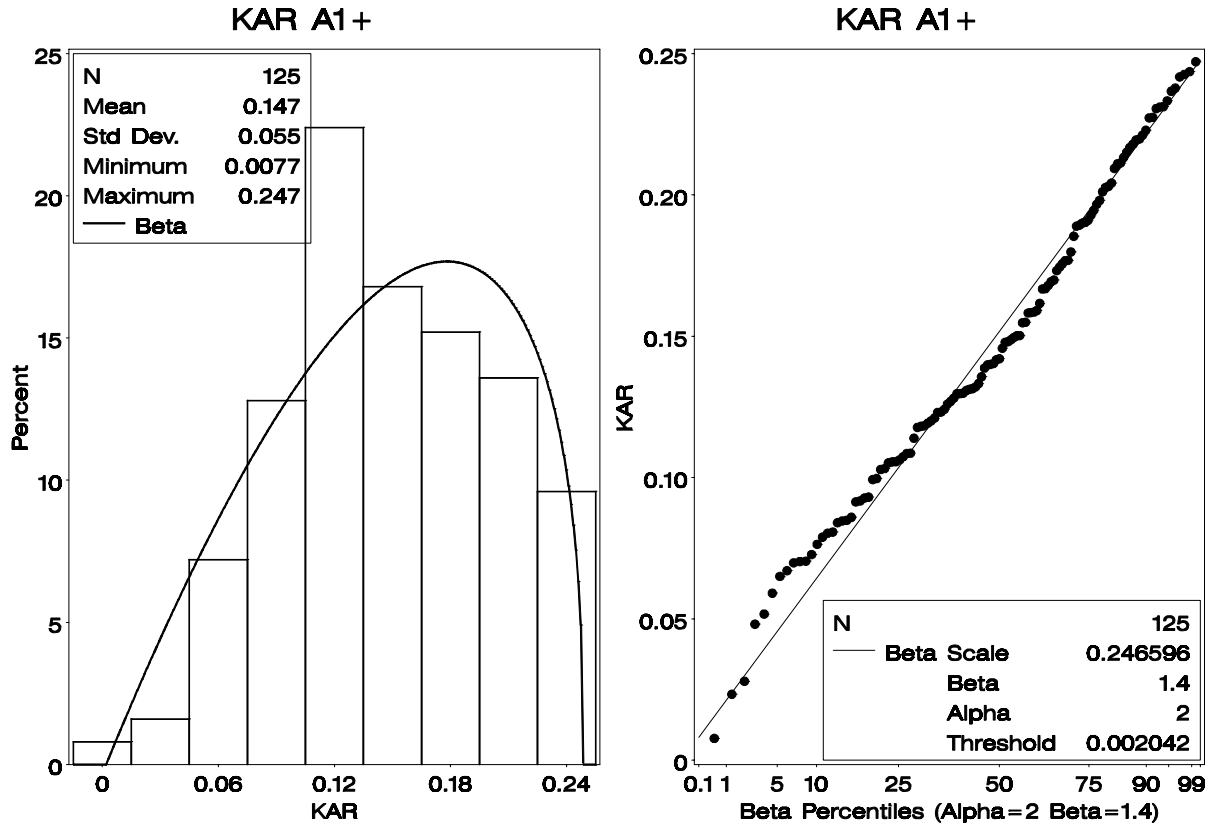


Bild A-39 Sortierverfahren A1+; zwei Werte mit KAR=0,247 ausgeschlossen

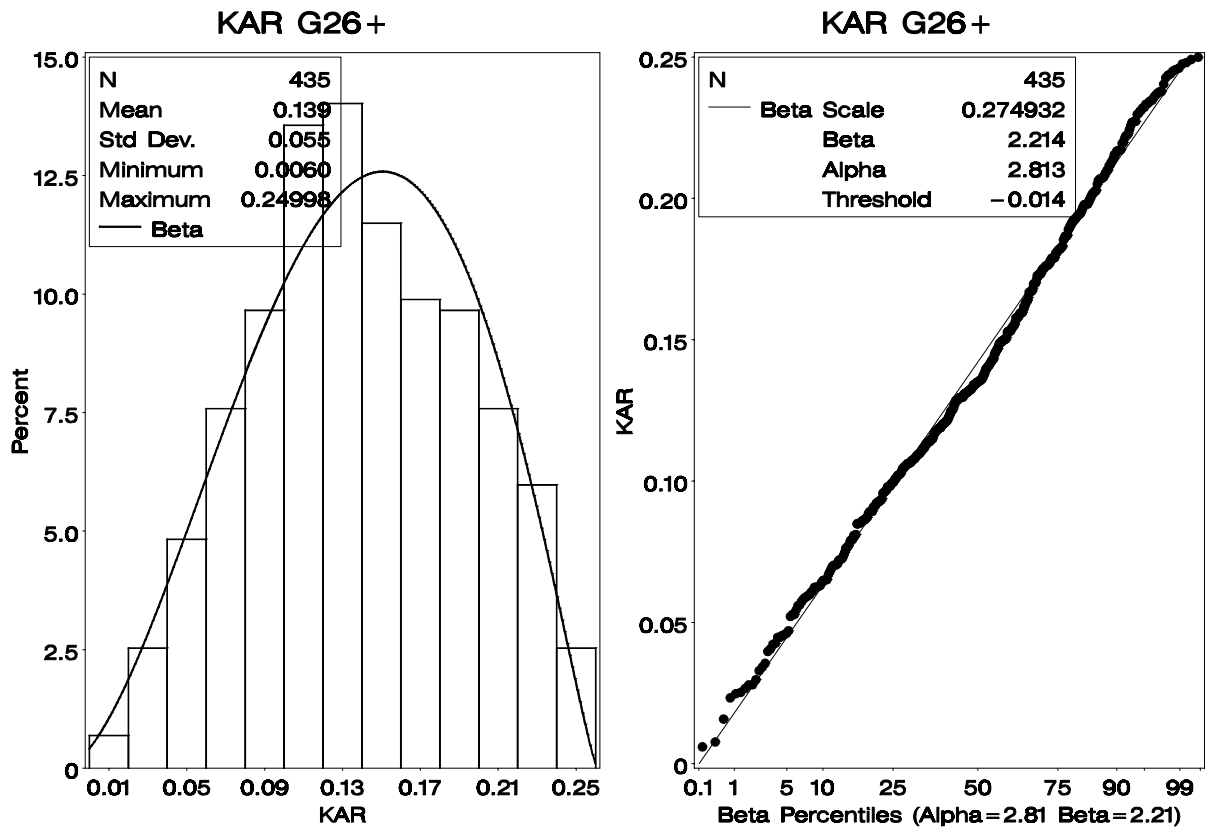


Bild A-40 Sortierverfahren G26+; 9 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen

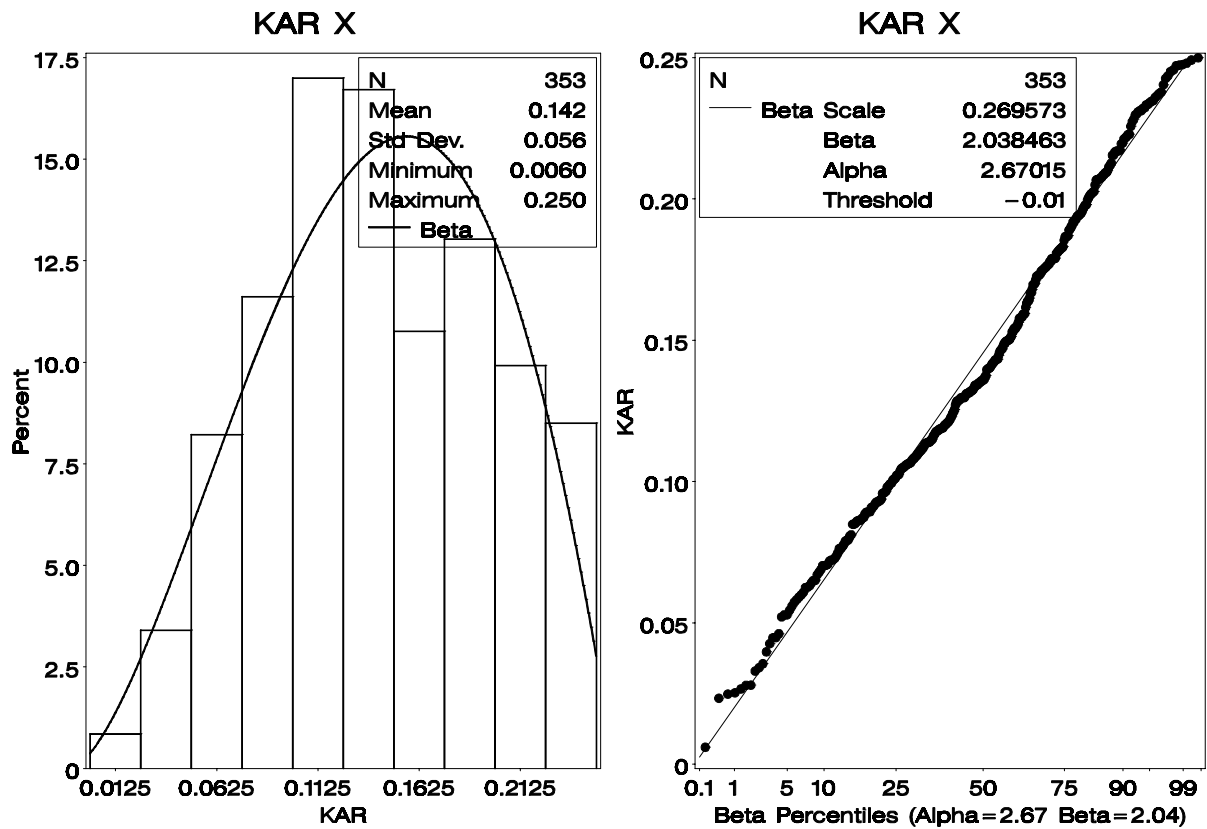


Bild A-41 Sortierverfahren X; 9 Werte mit KAR=0 ausgeschlossen

Tabelle A-7 Sortierverfahren mit zugehörigen Grenzwertkombinationen

Bezeichnung	$\rho_0$ in kg/m <sup>3</sup>
B2	N(417;41,7)
D2	N(417;41,7)
D1	N(417;41,7)
C1	N(417;41,7)
A1	N(417;41,7)
F22	N(424;35,6)
G26	N(440;31,7)
A1+	N(443;32,0)
G26+	N(440;31,7)
X	N(452;32,1)
B3	N(414;41,4)
D3	N(414;41,4)
C2	N(417;41,7)
A2	N(417;41,7)
G18	N(398;29,9)

**A 3 Simulationsergebnisse**

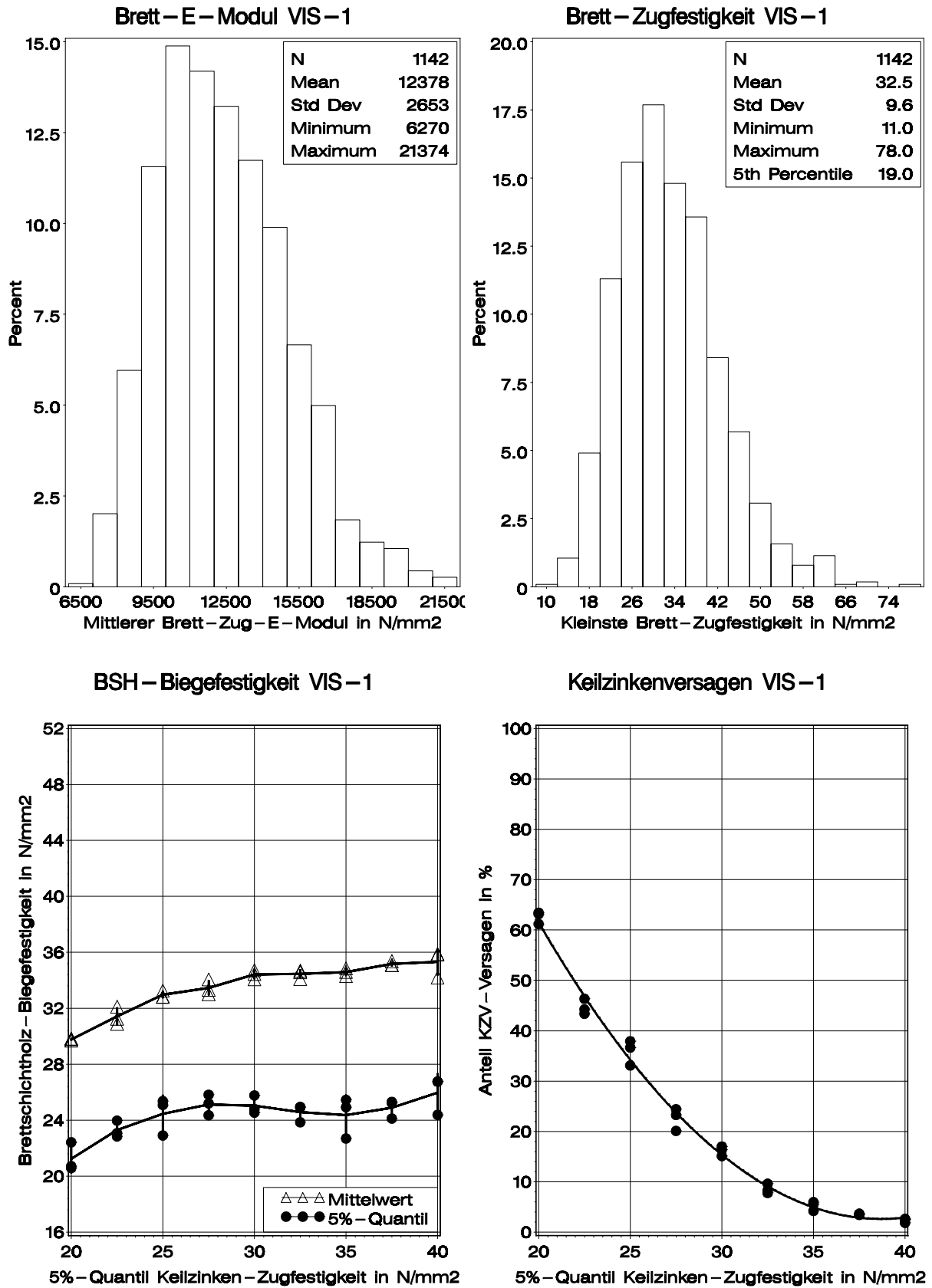


Bild A-42 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren VIS-1

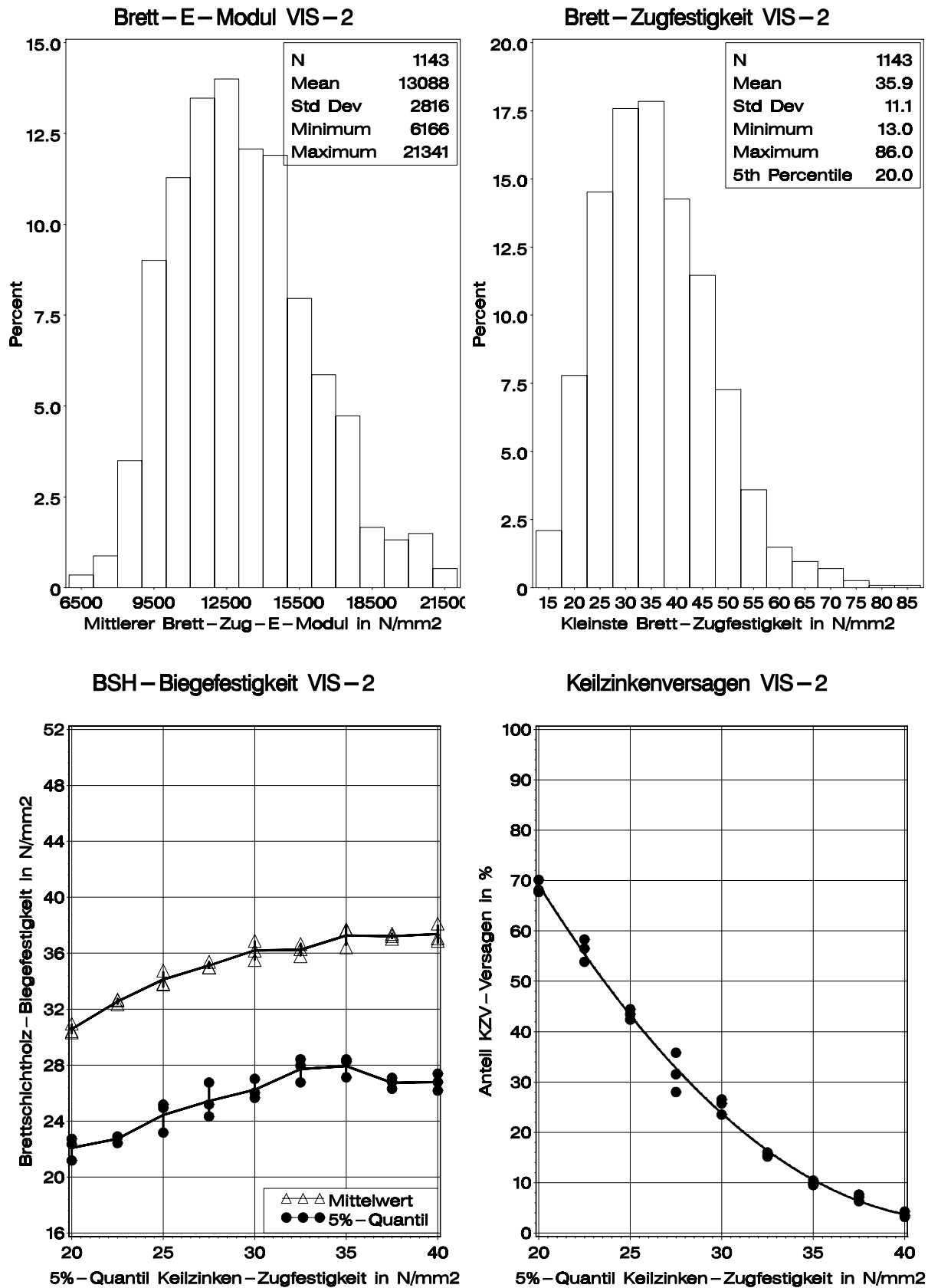


Bild A-43 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren VIS-2

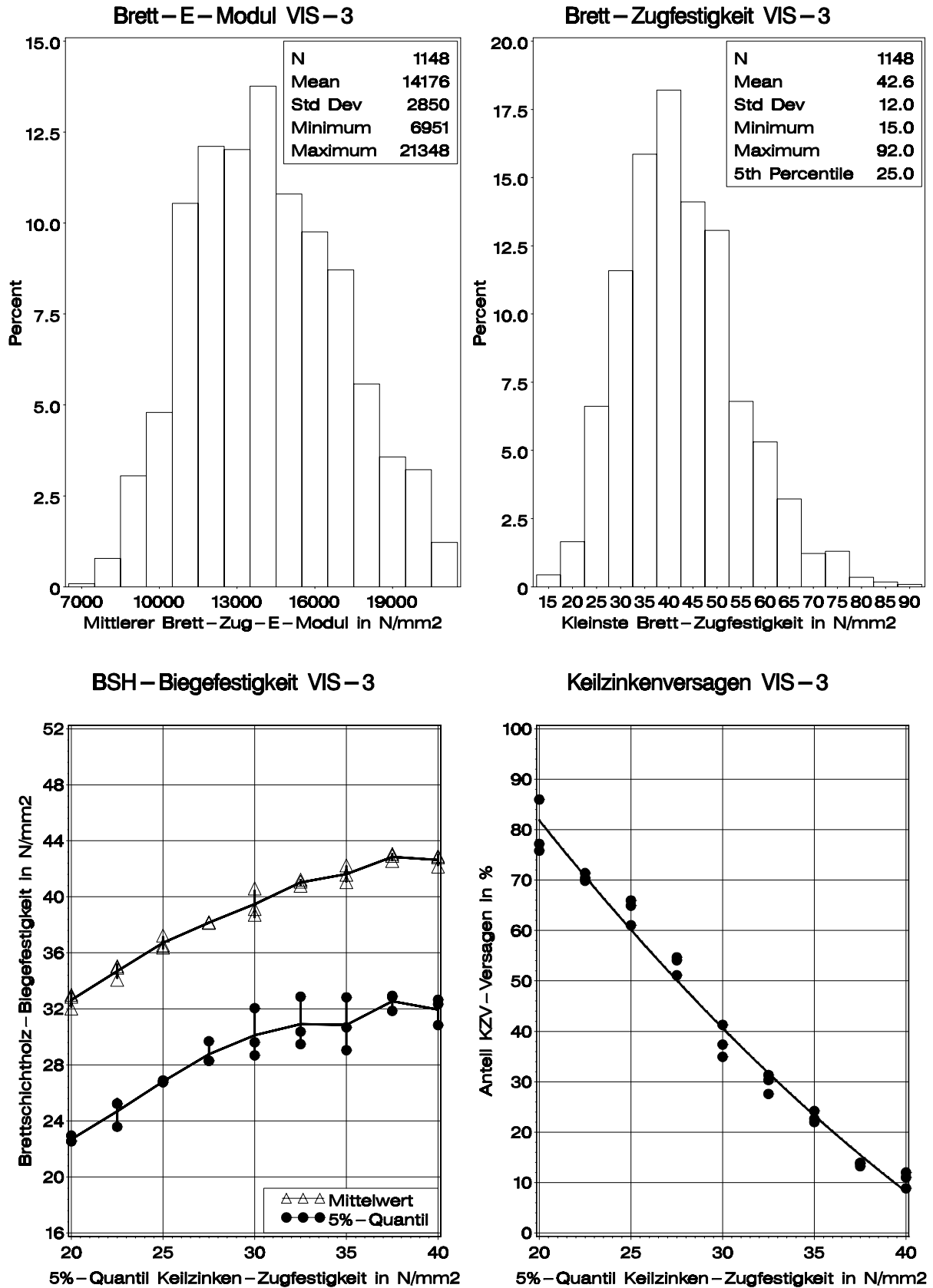


Bild A-44 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren VIS-3

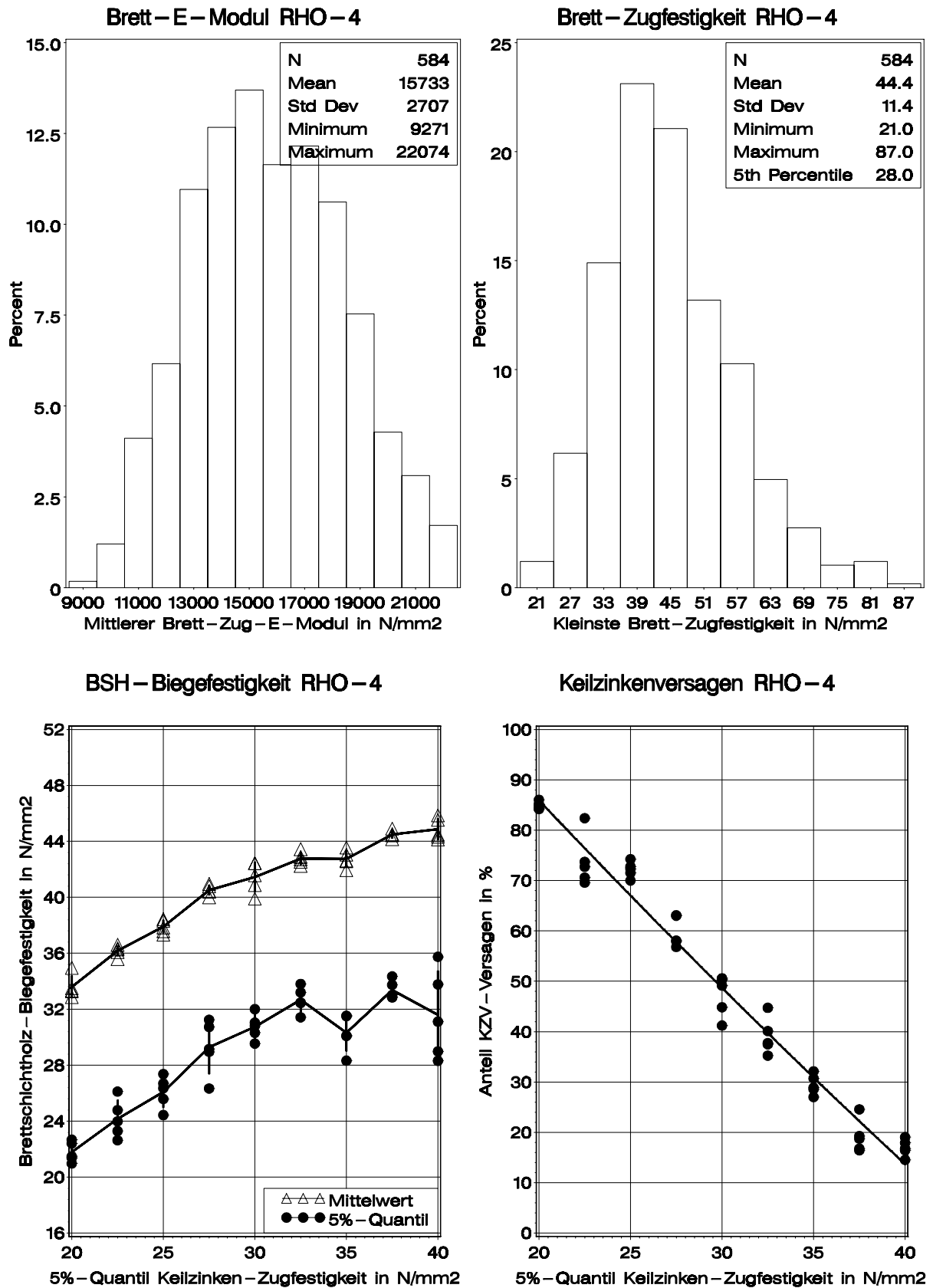


Bild A-45 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren RHO-4

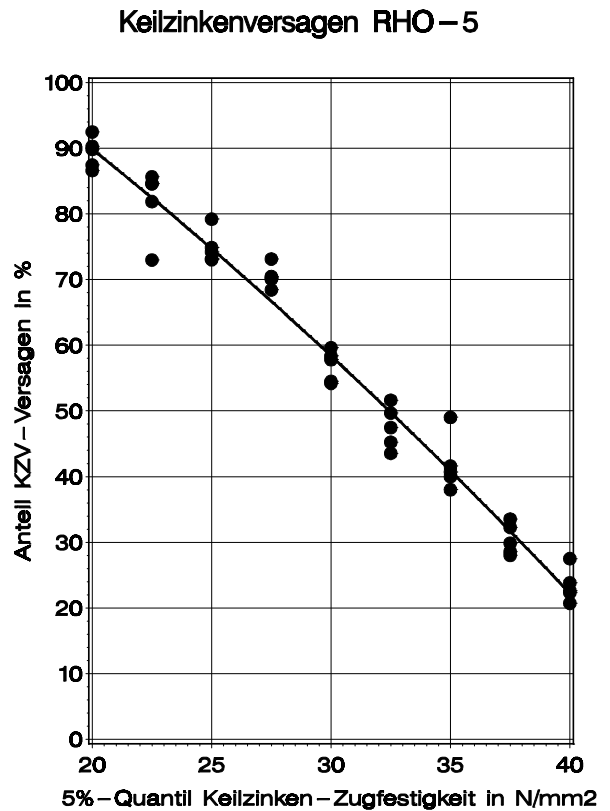
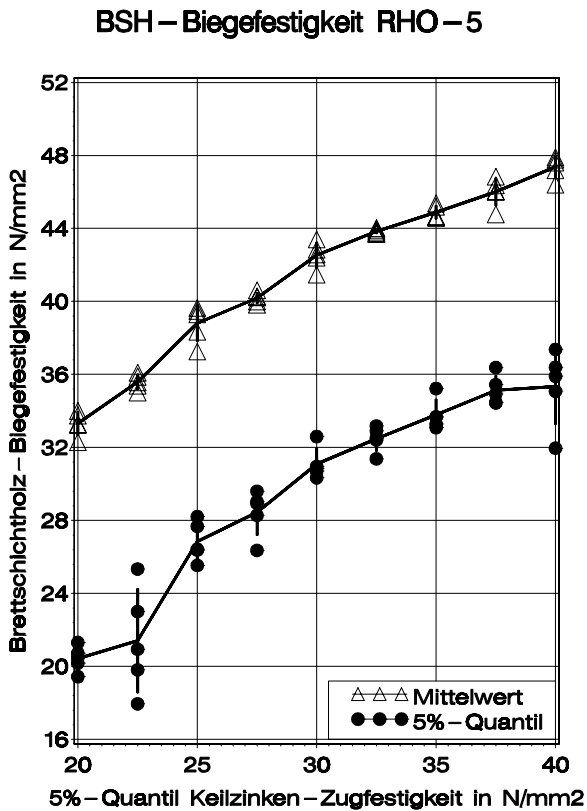
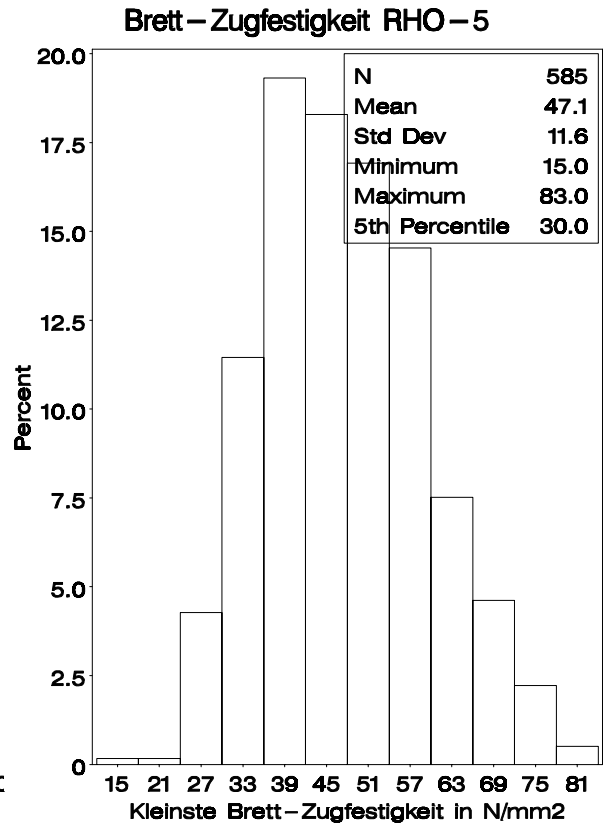
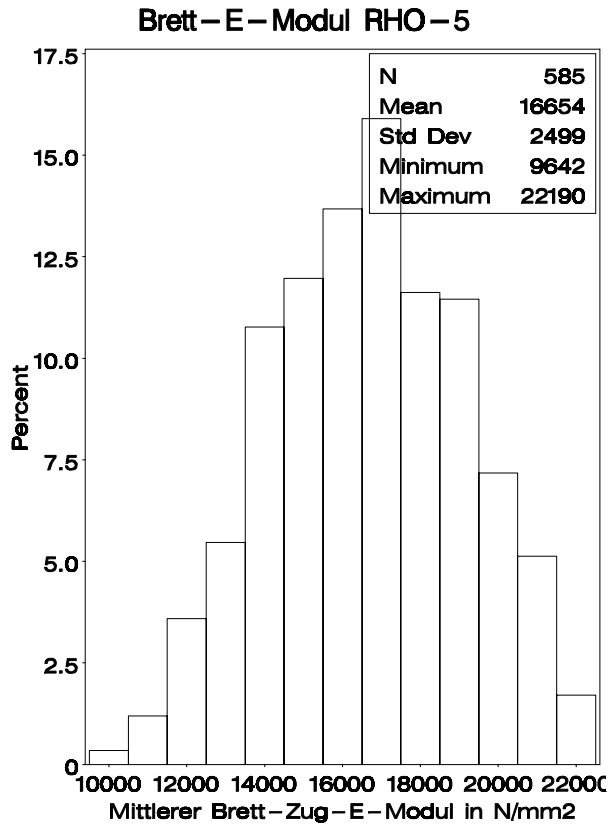


Bild A-46 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren RHO-5

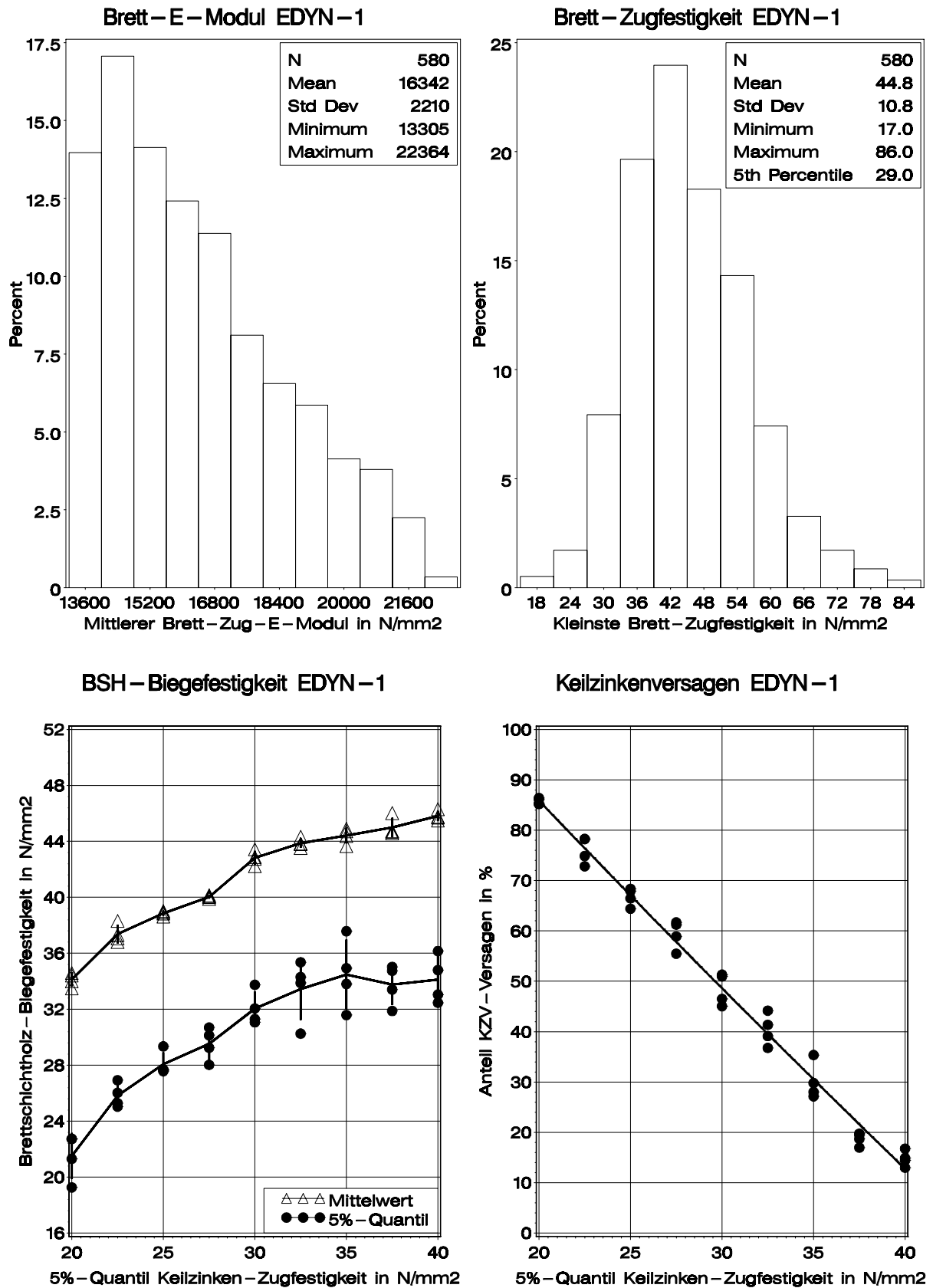


Bild A-47 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren EDYN-1



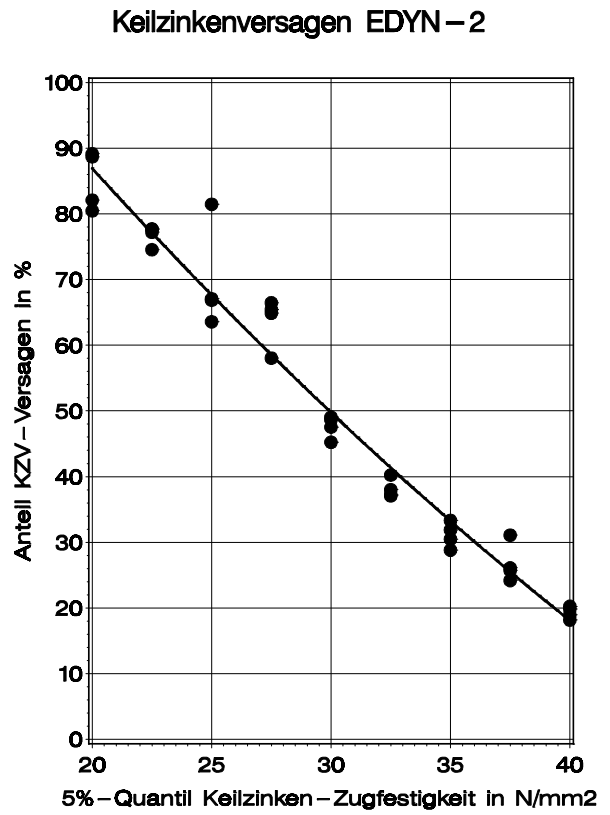
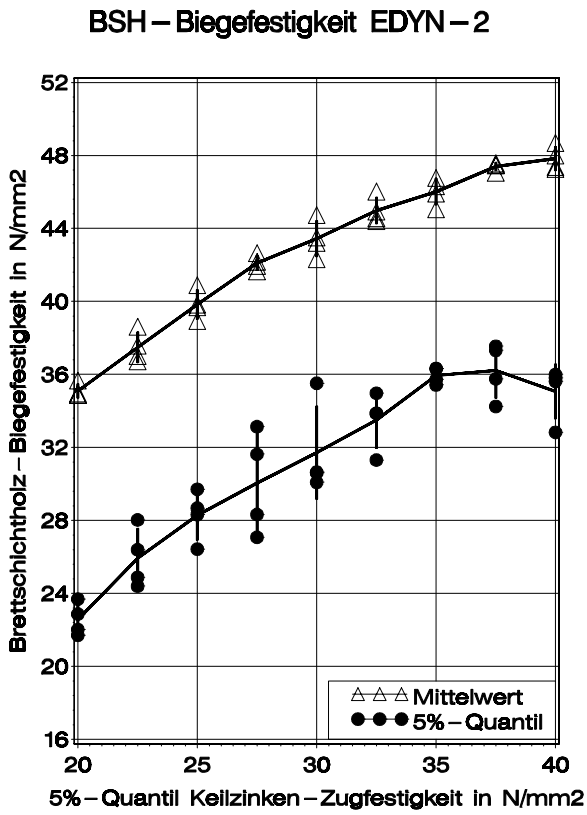
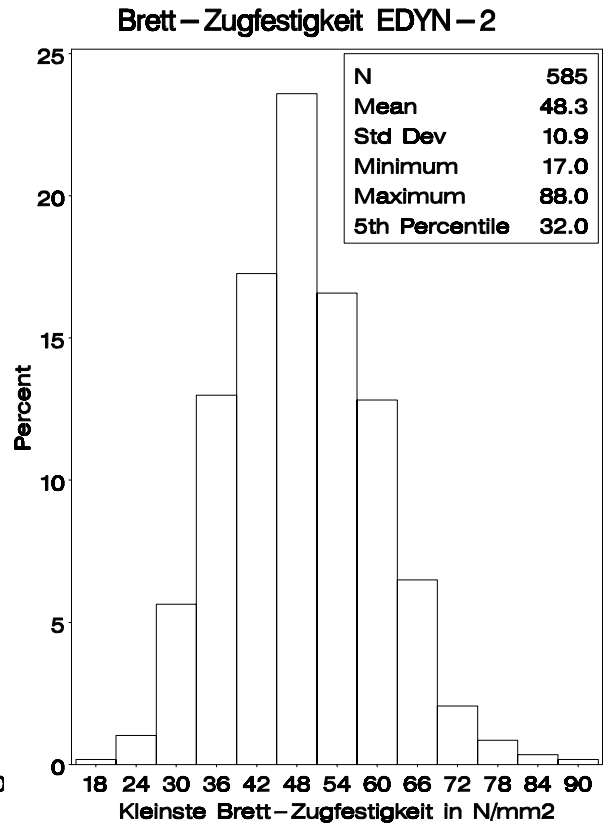
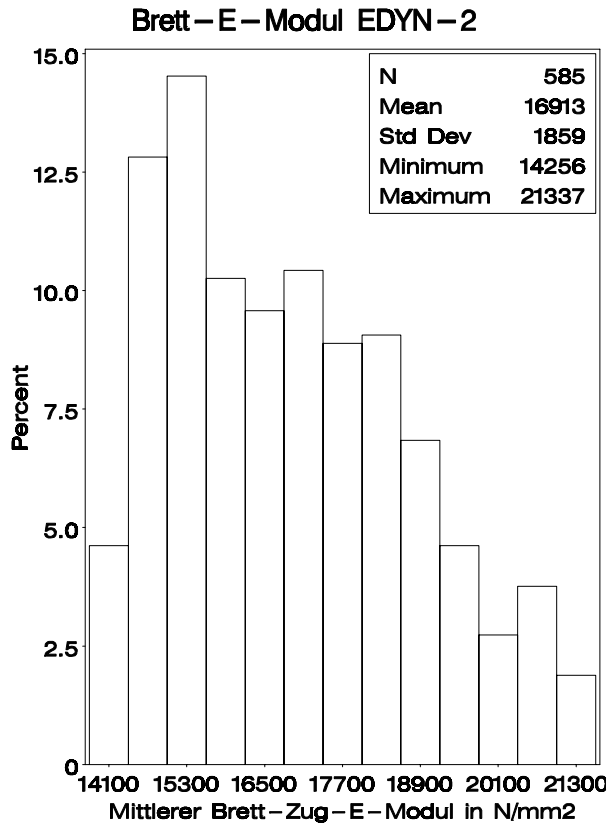


Bild A-48 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren EDYN-2

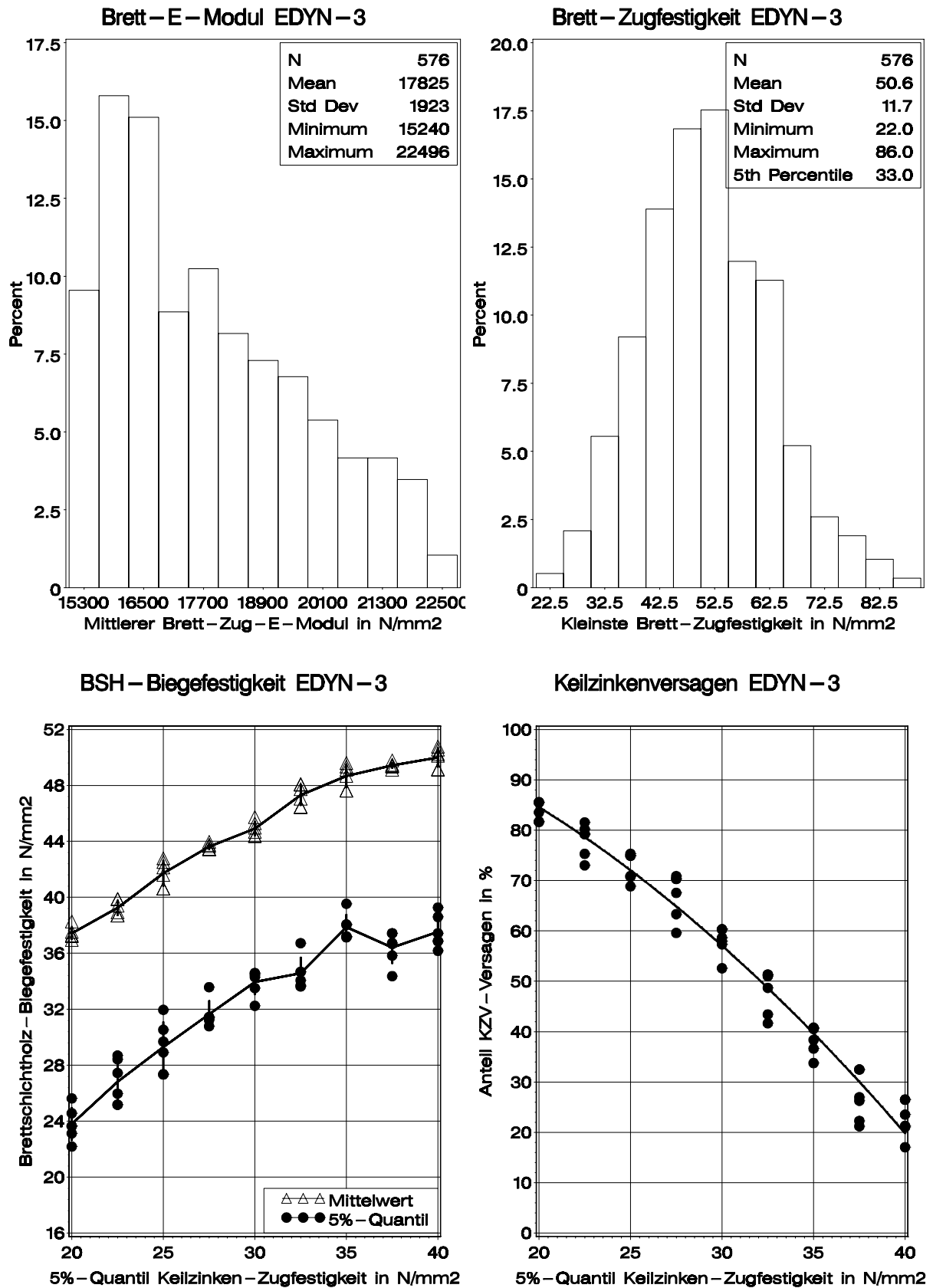


Bild A-49 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren EDYN-3

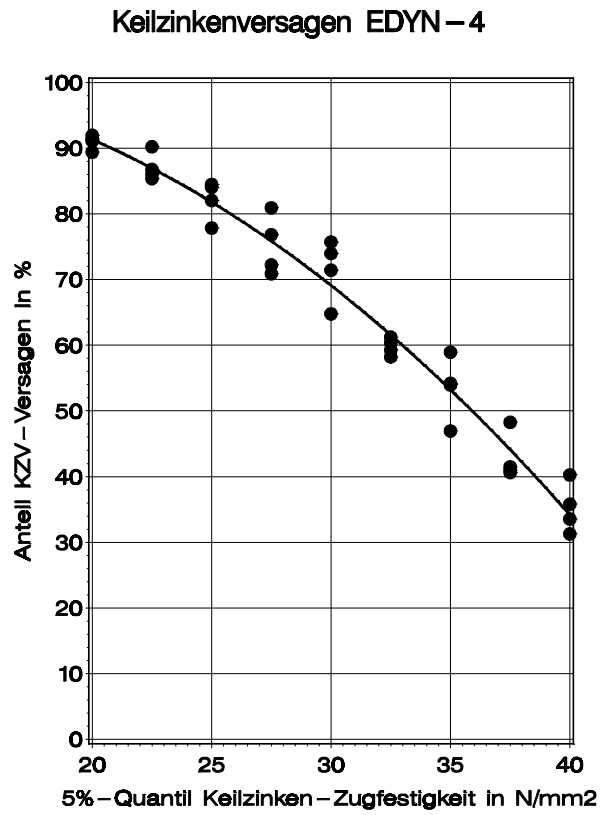
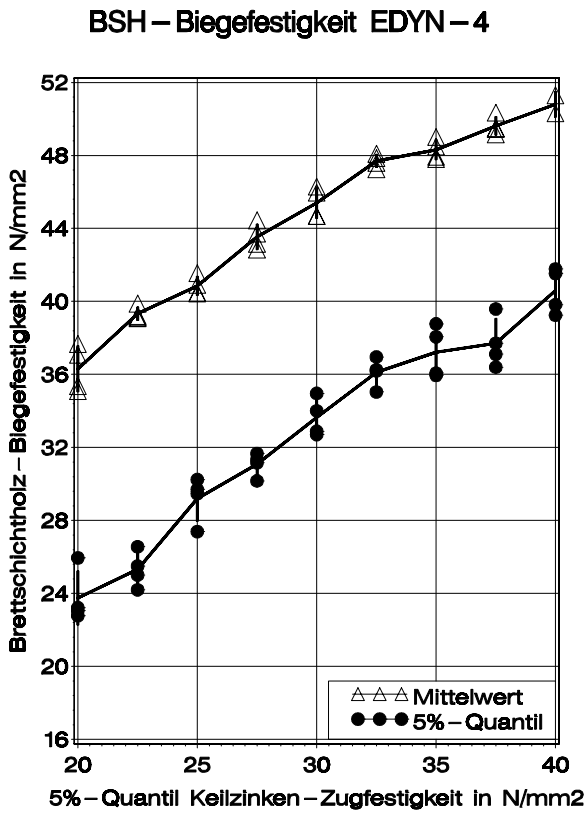
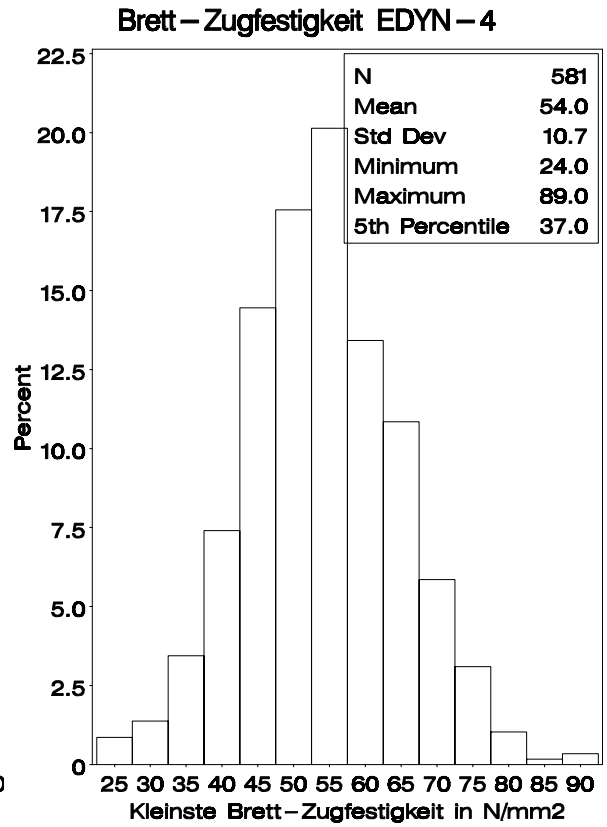
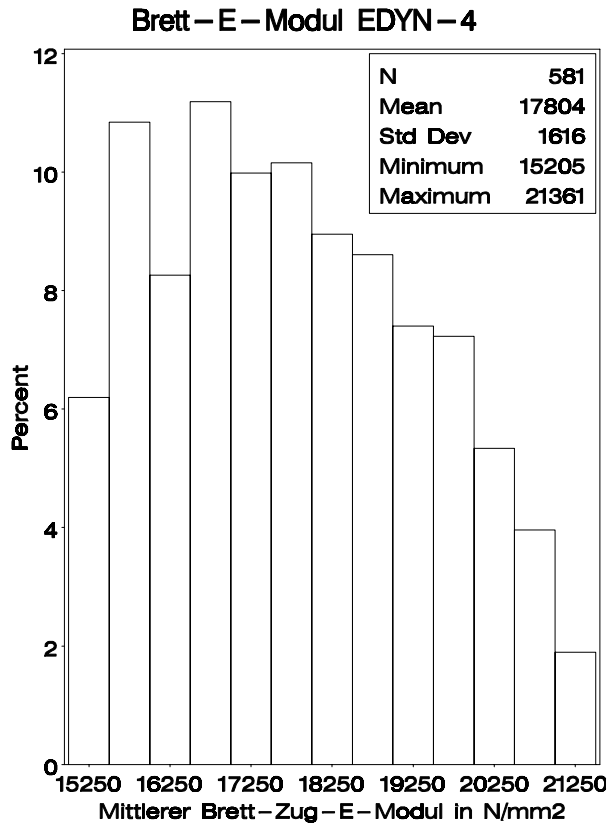


Bild A-50 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren EDYN-4

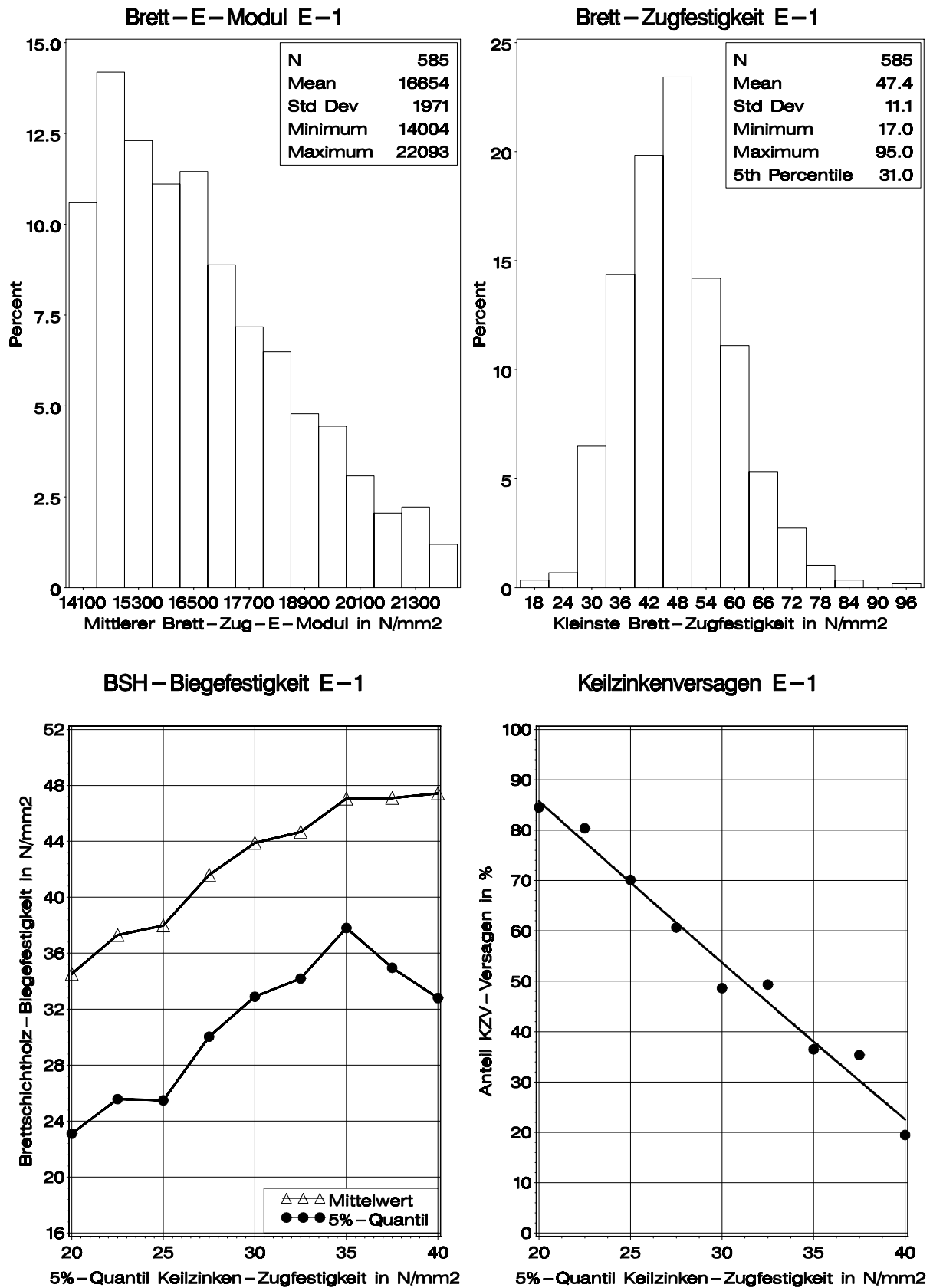


Bild A-51 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren E-1

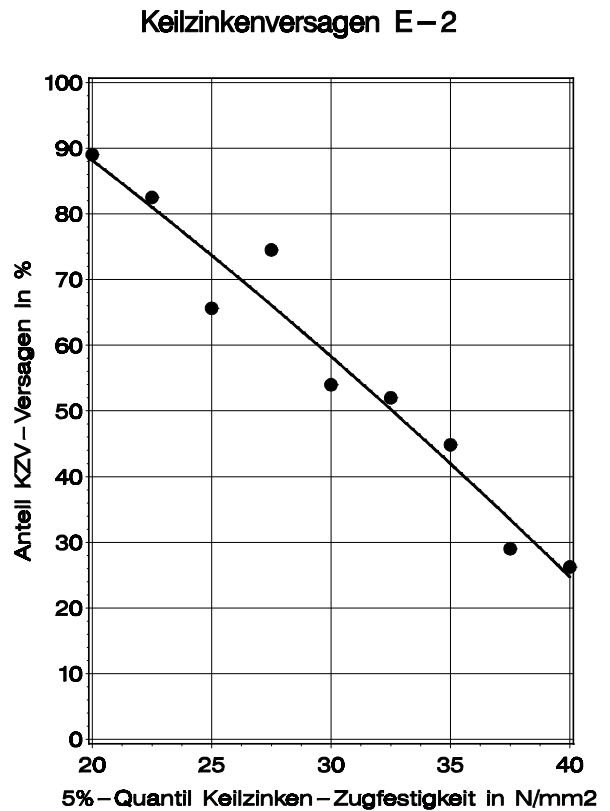
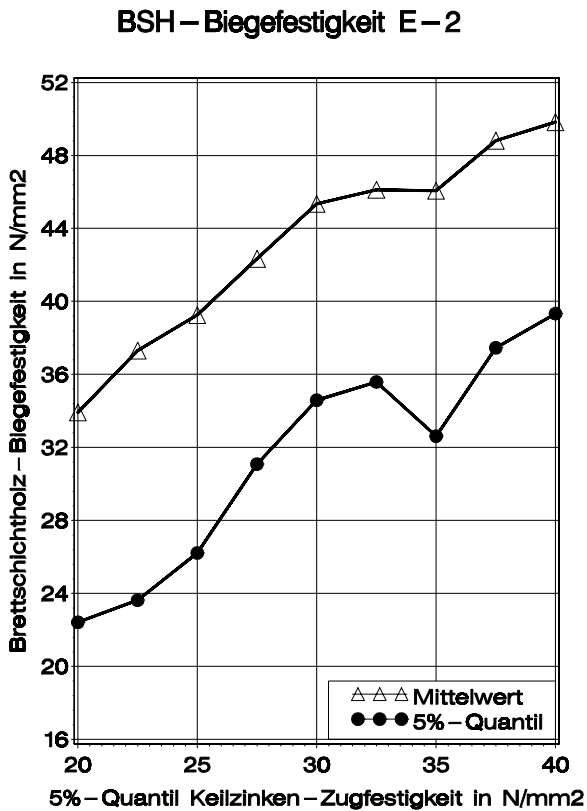
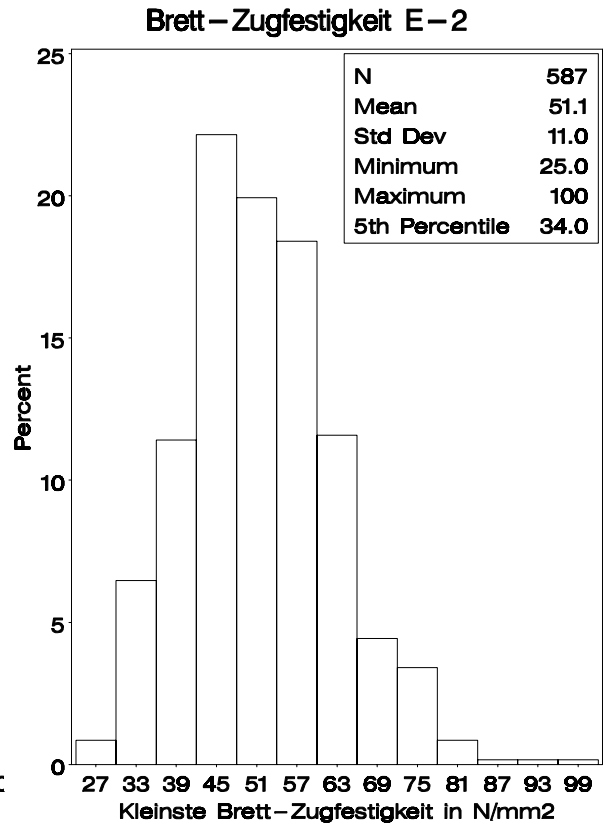
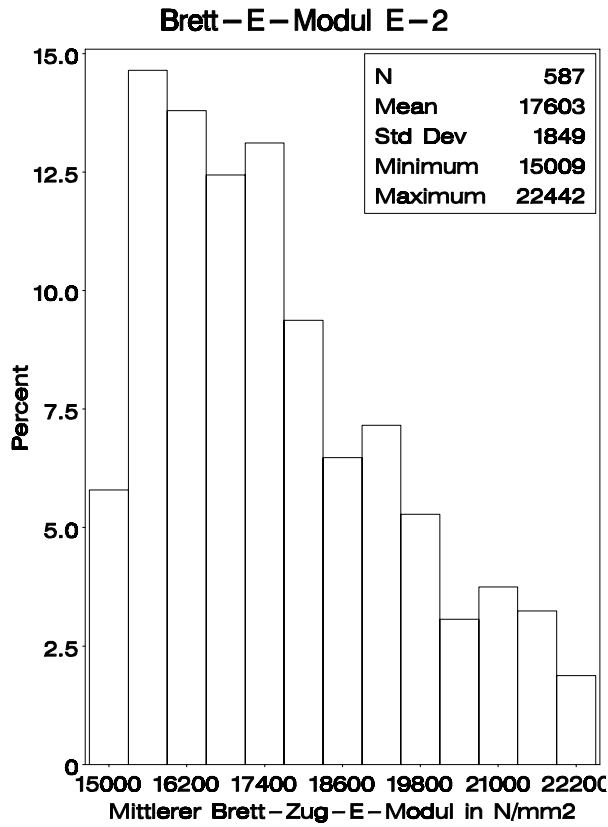


Bild A-52 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren E-2

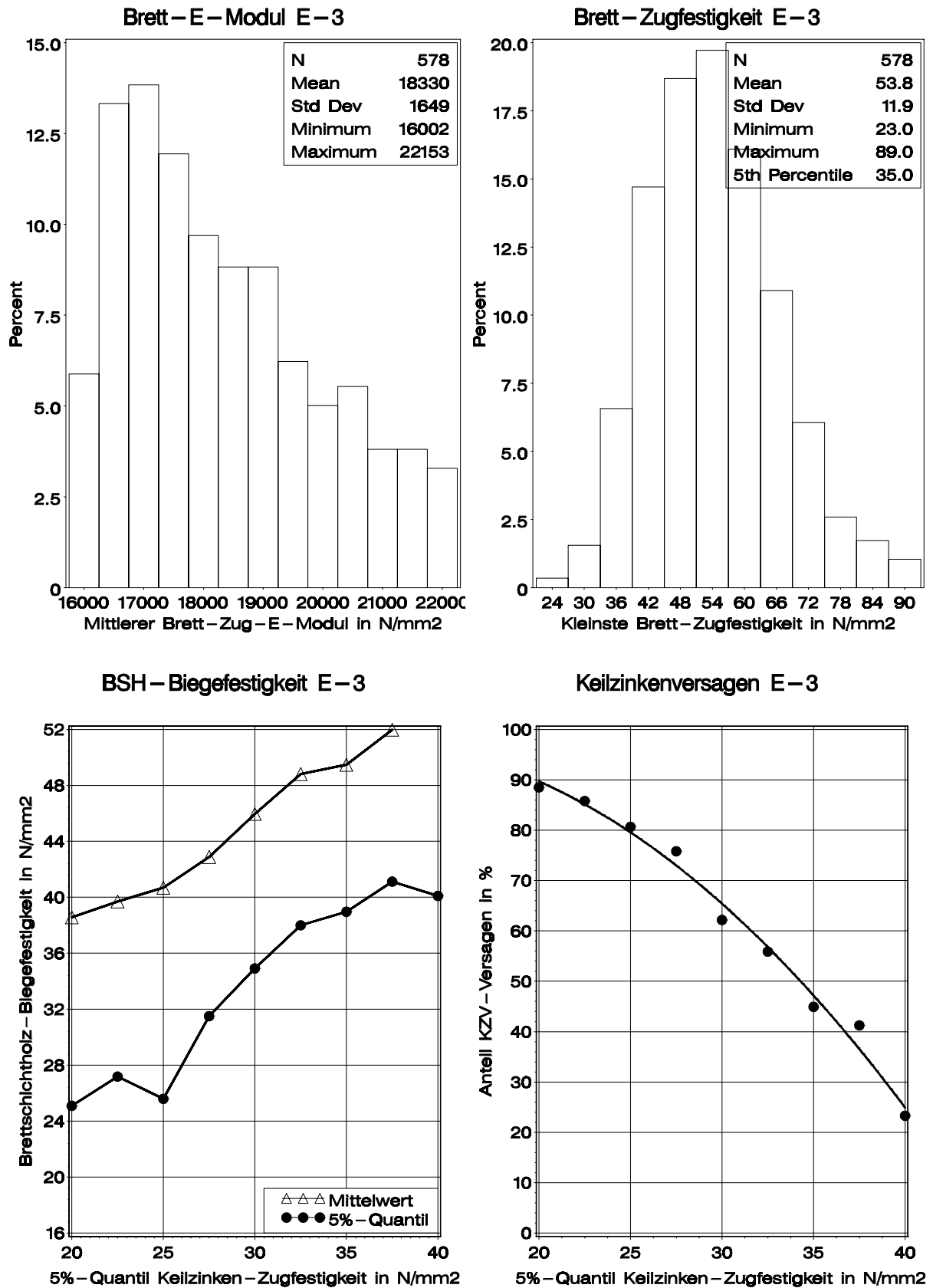


Bild A-53 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren E-3

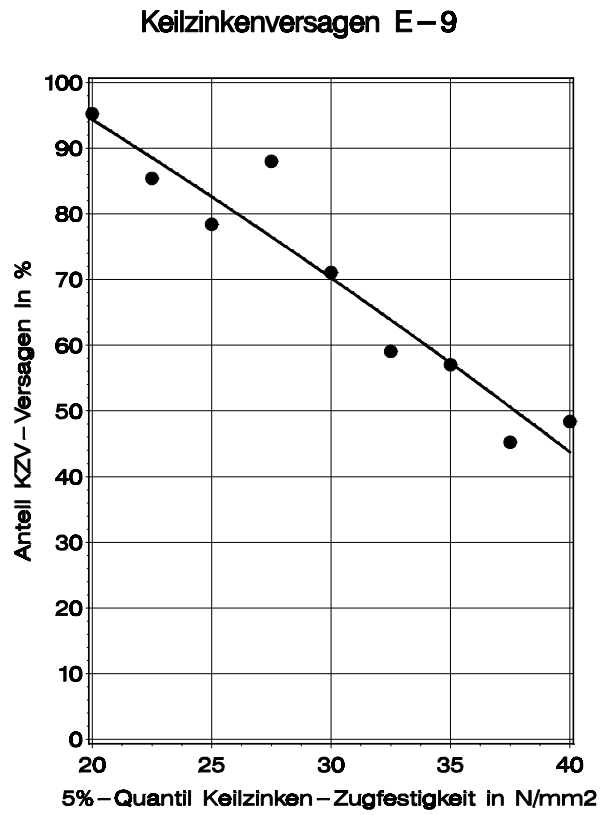
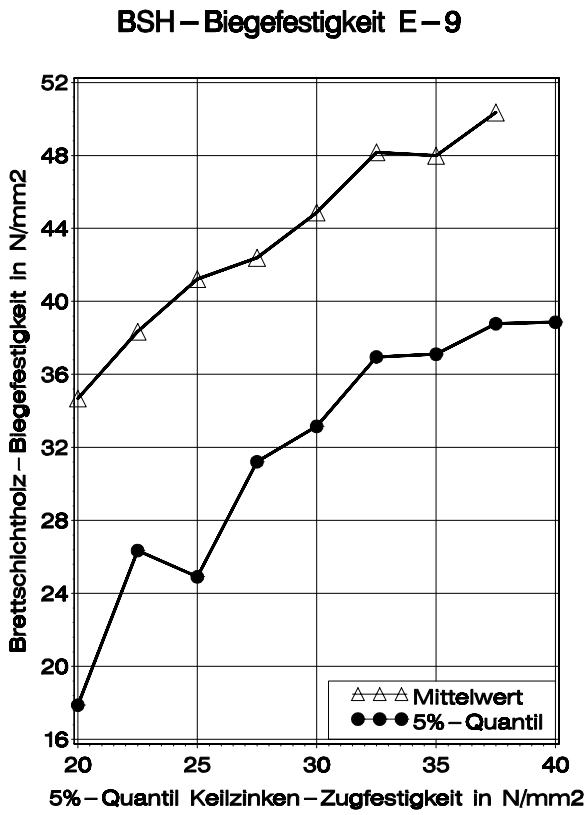
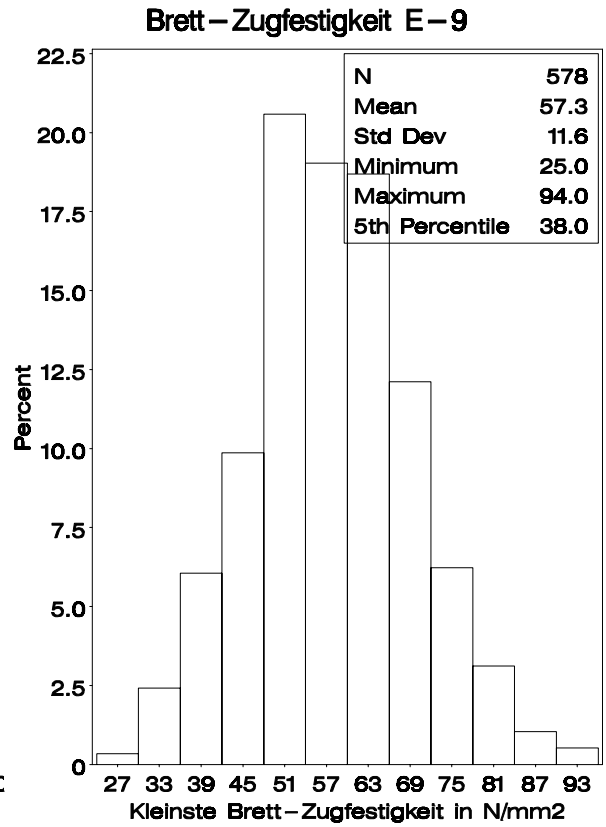
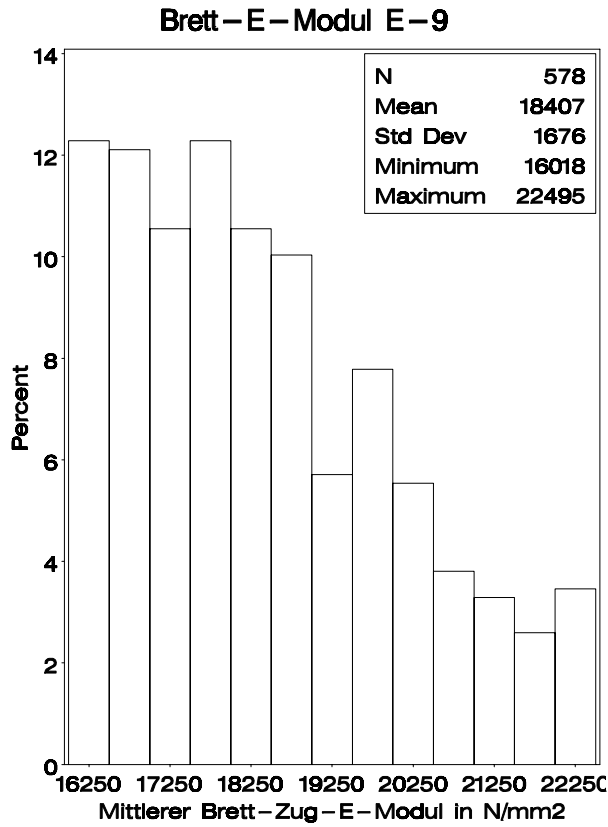


Bild A-54 Simulationsergebnisse für das Sortierverfahren E-9

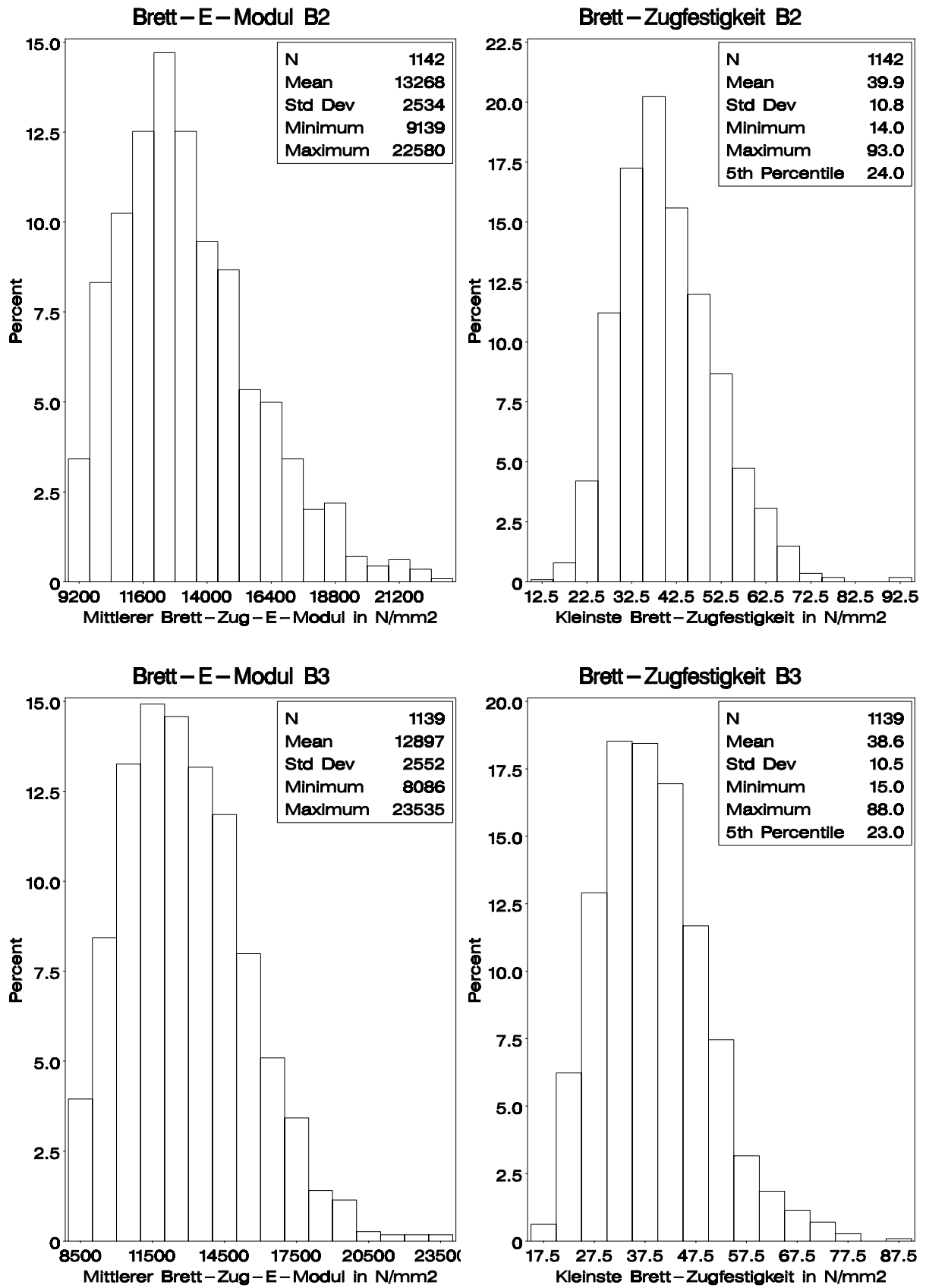


Bild A-55 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren B2/B3



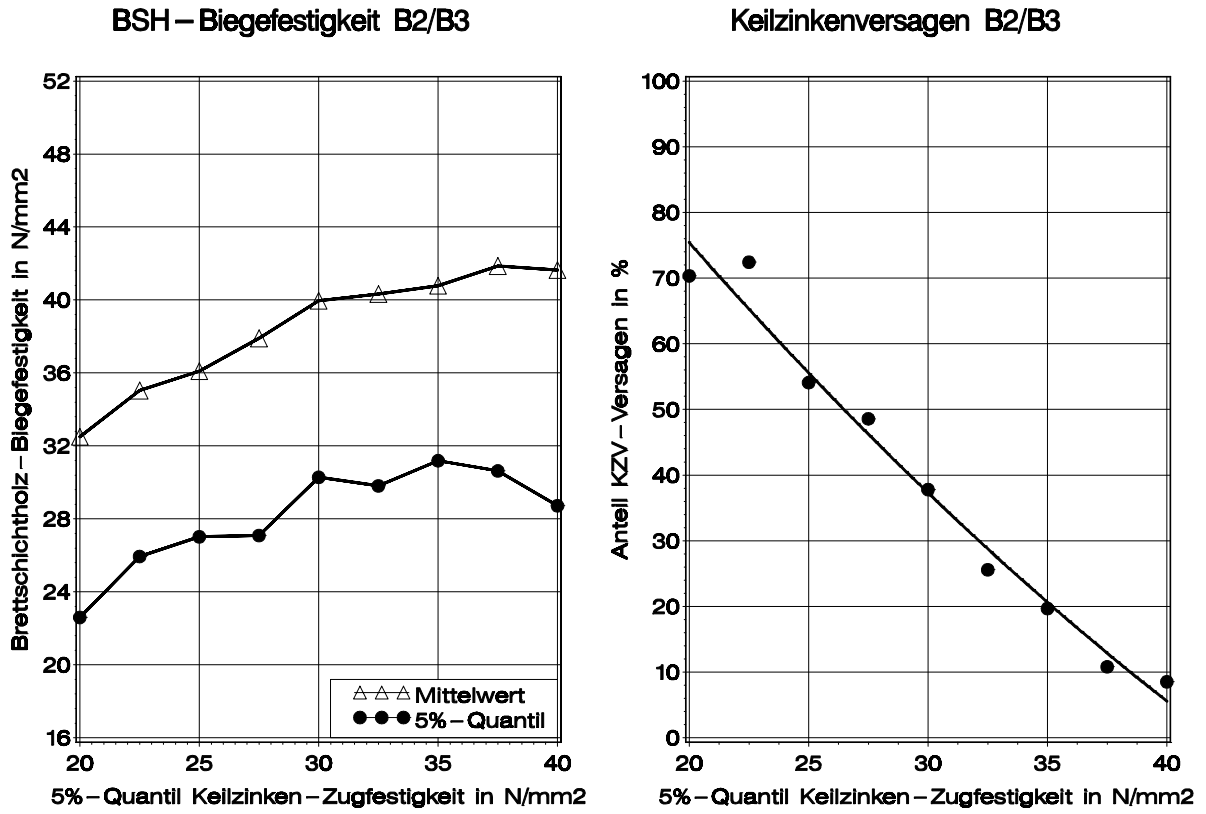


Bild A-55 (Forts.) Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren B2/B3

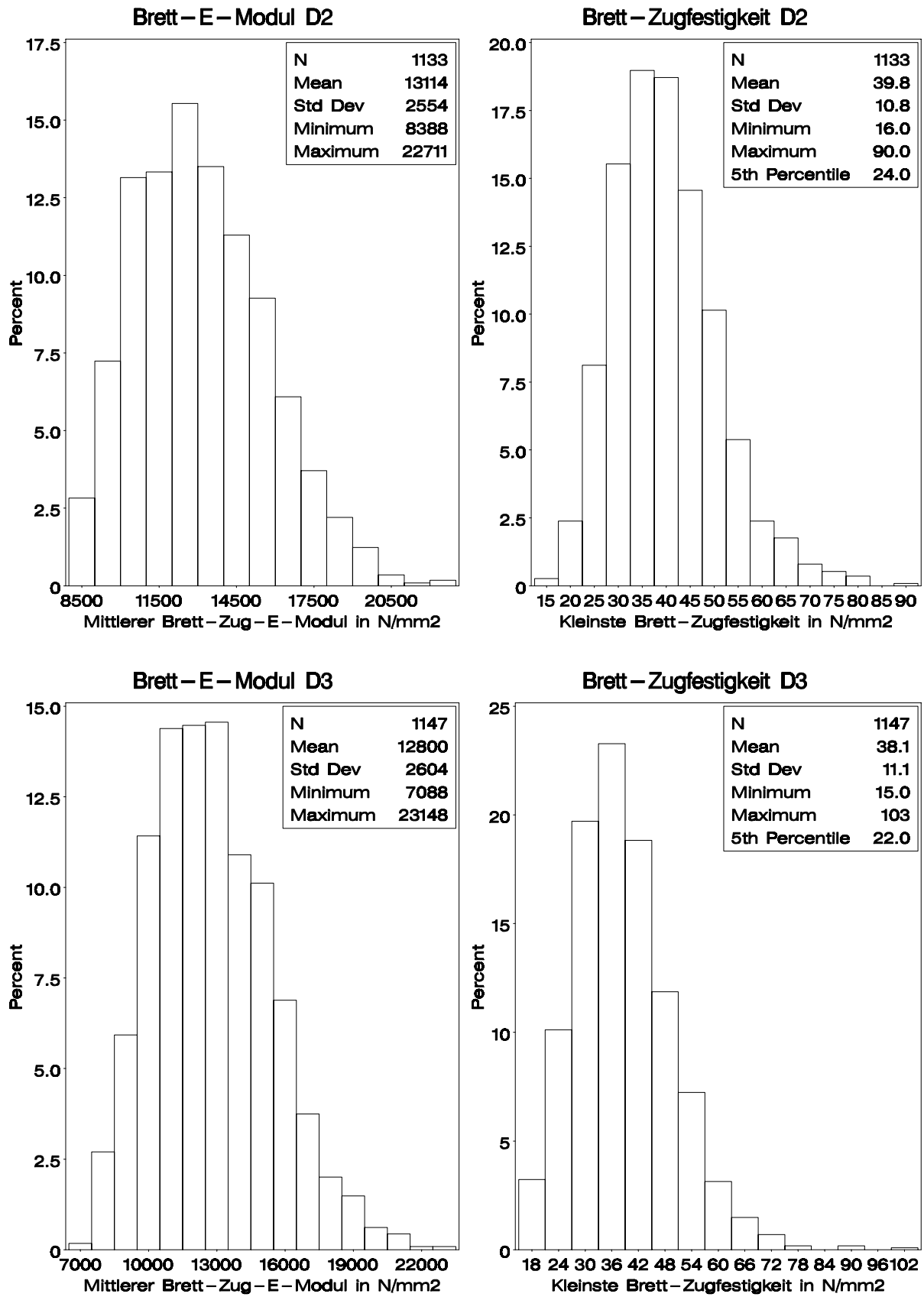


Bild A-56 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren D2/D3

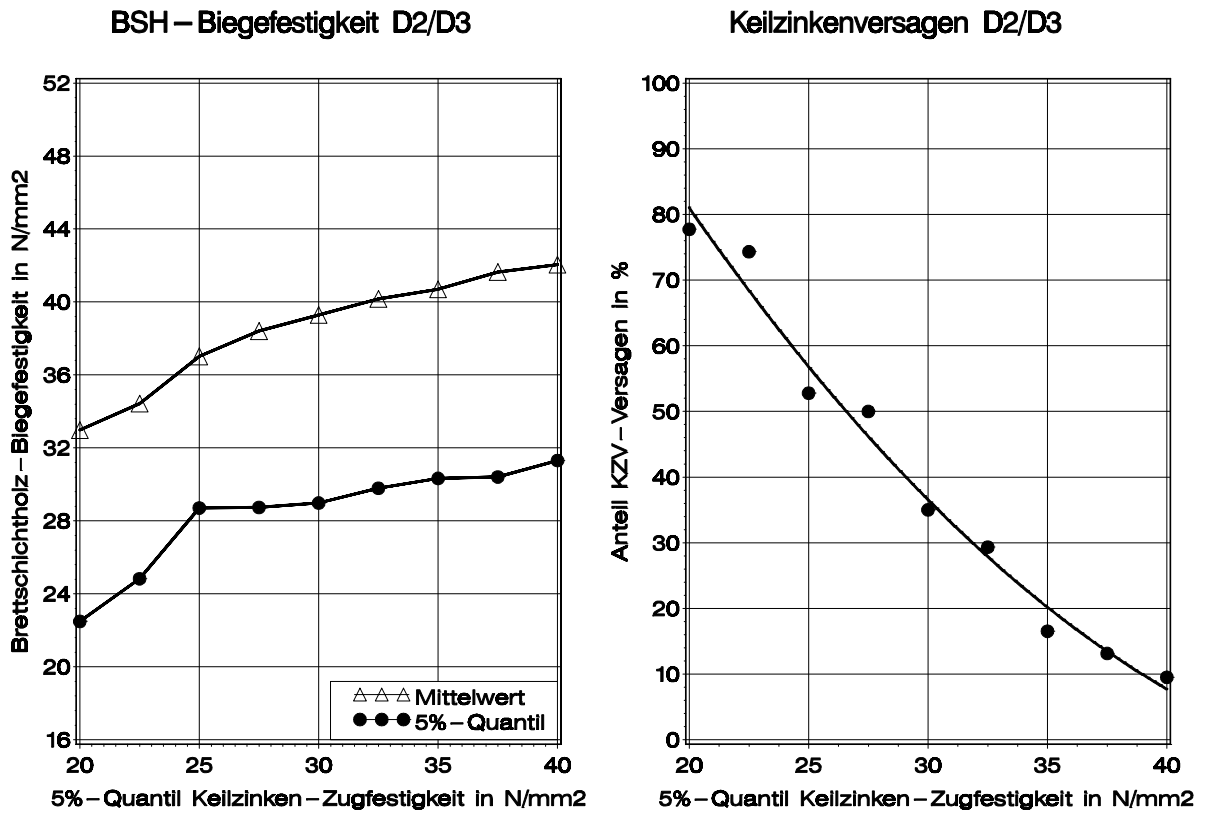


Bild A-56 (Forts.) Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren D2/D3

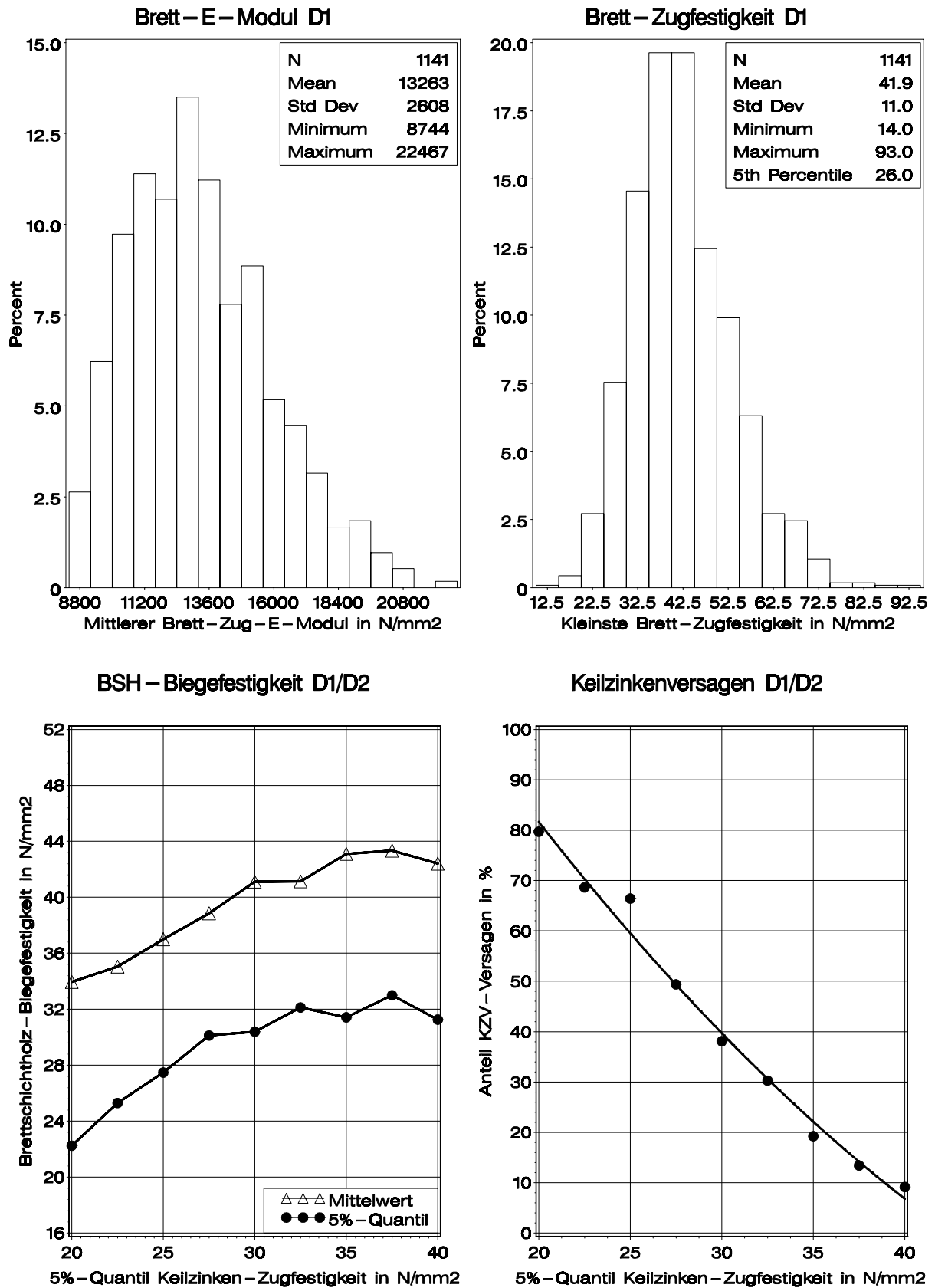


Bild A-57 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren D1/D2; D2 s. Bild A-56

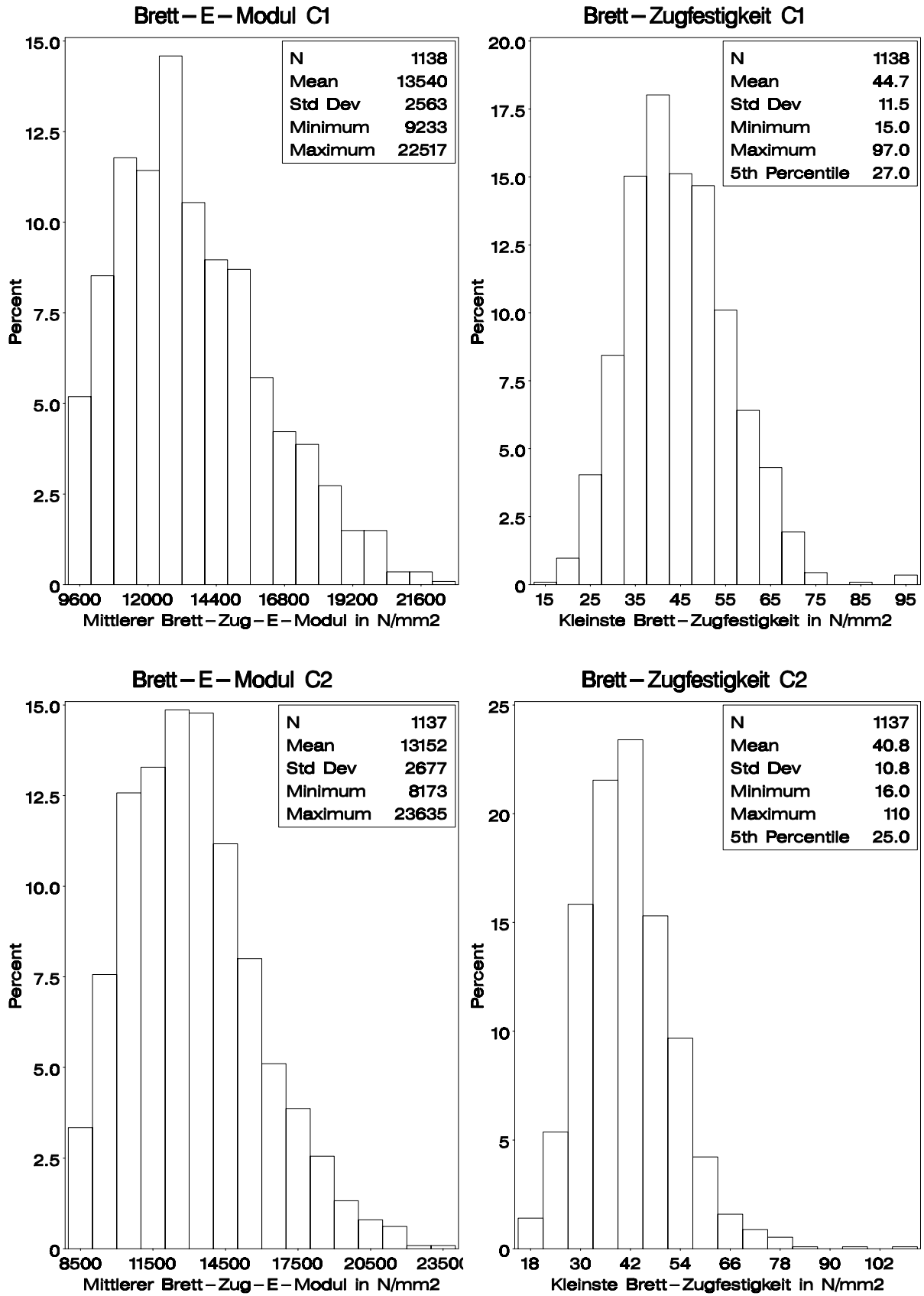


Bild A-58 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren C1/C2

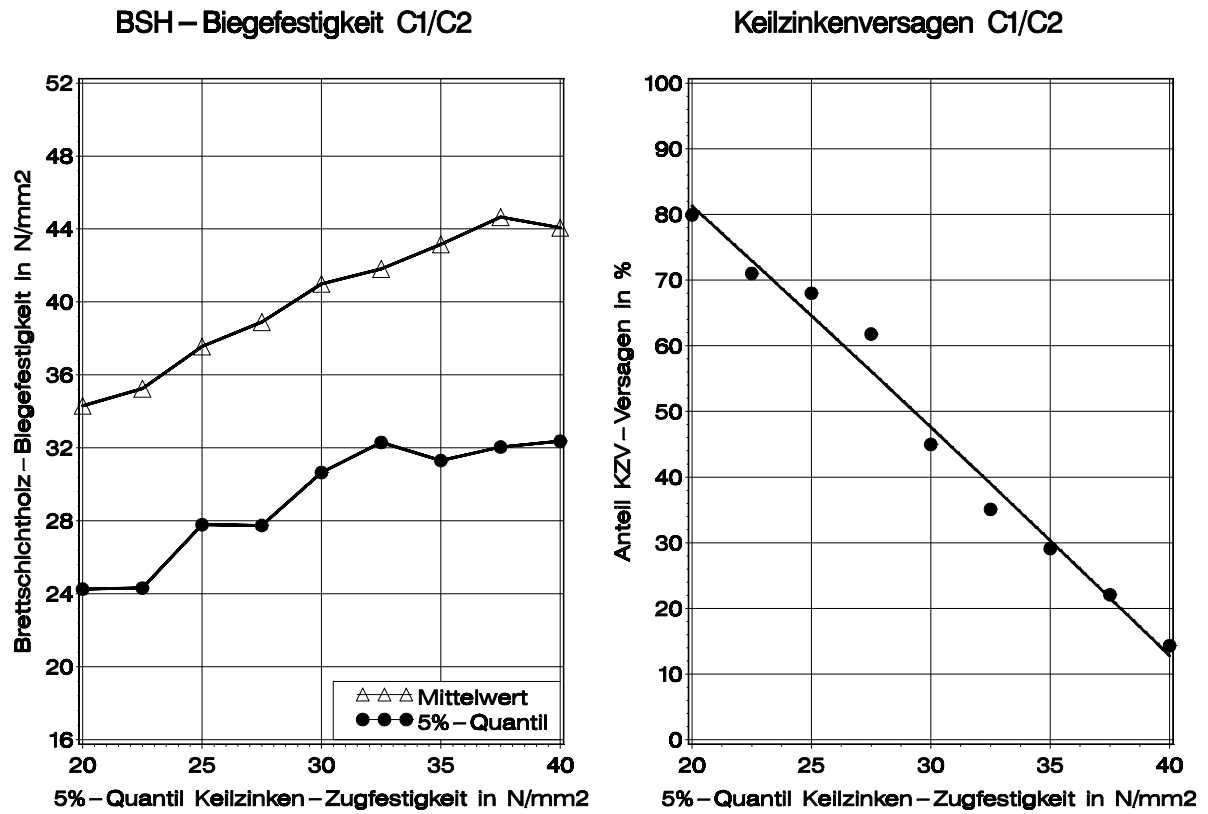


Bild A-58 (Forts.) Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren C1/C2

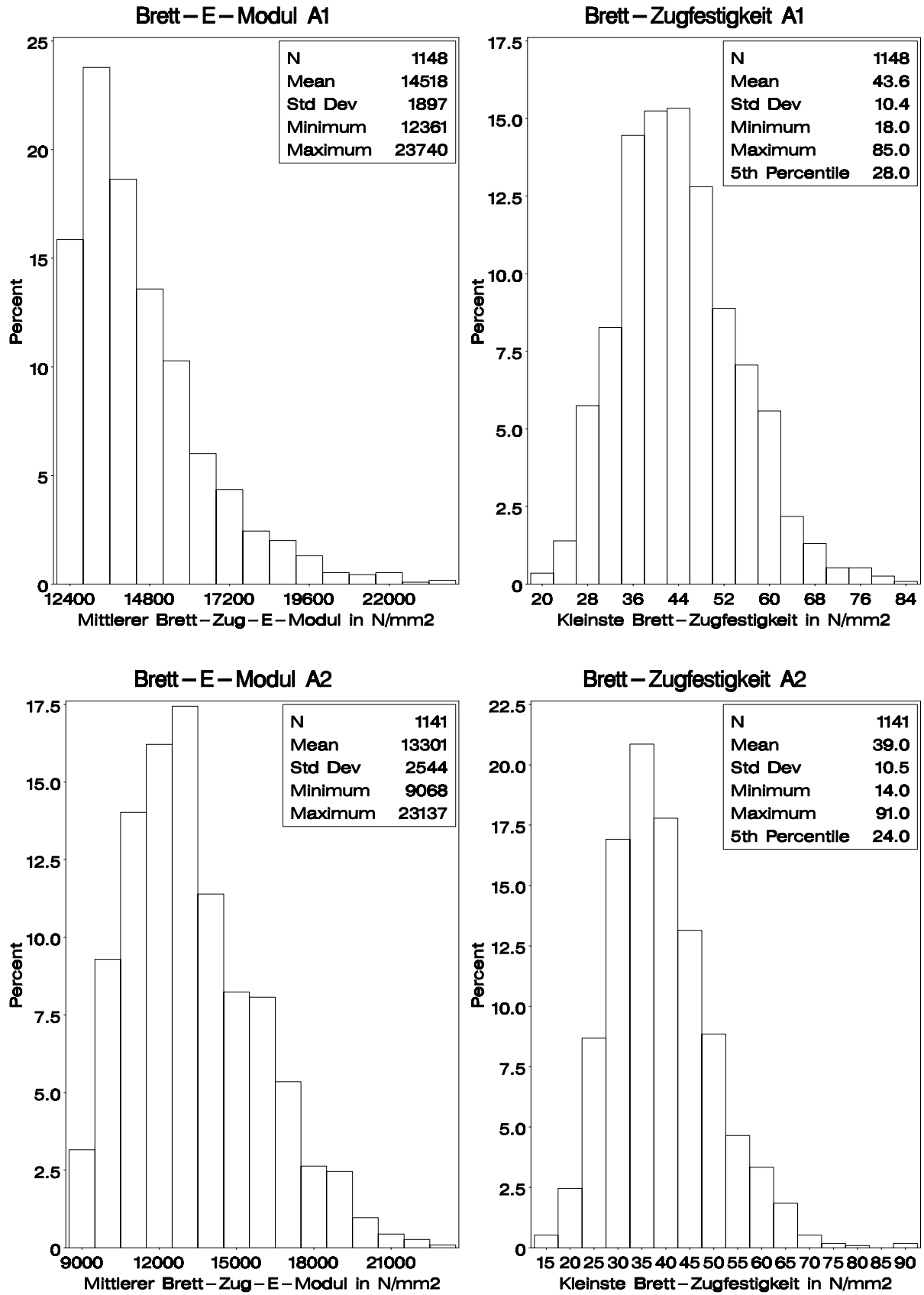


Bild A-59 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren A1/A2

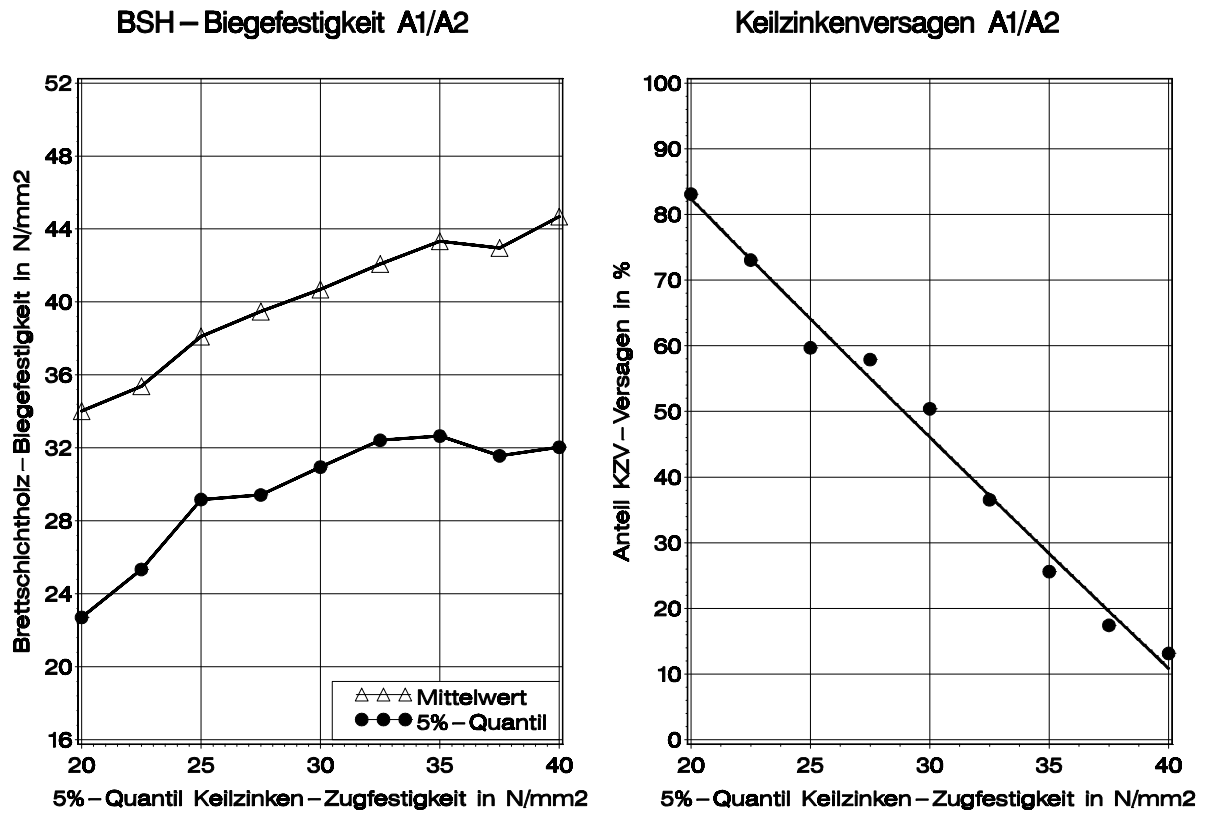


Bild A-59 (Forts.) Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren A1/A2



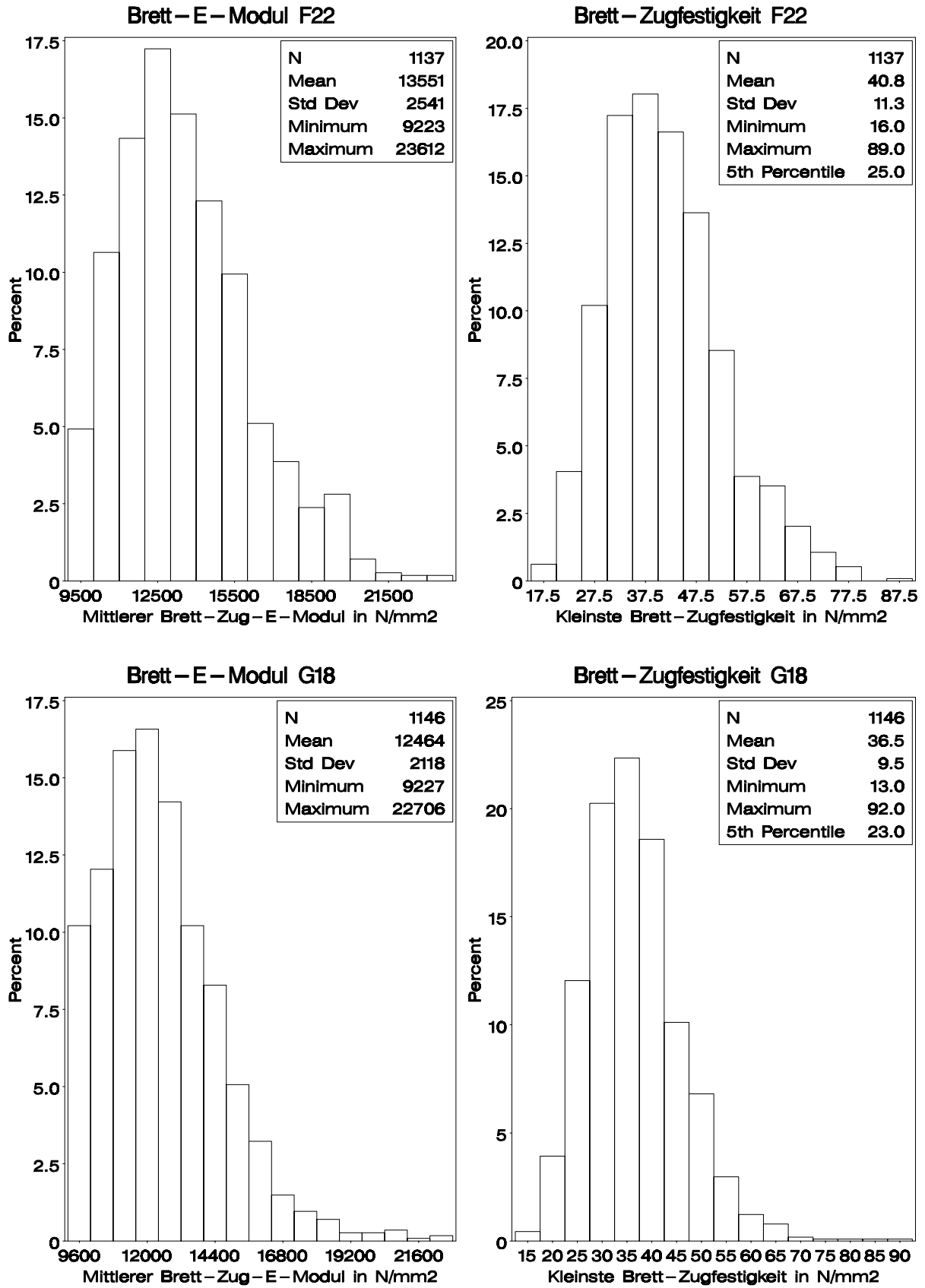


Bild A-60 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren F22/G18

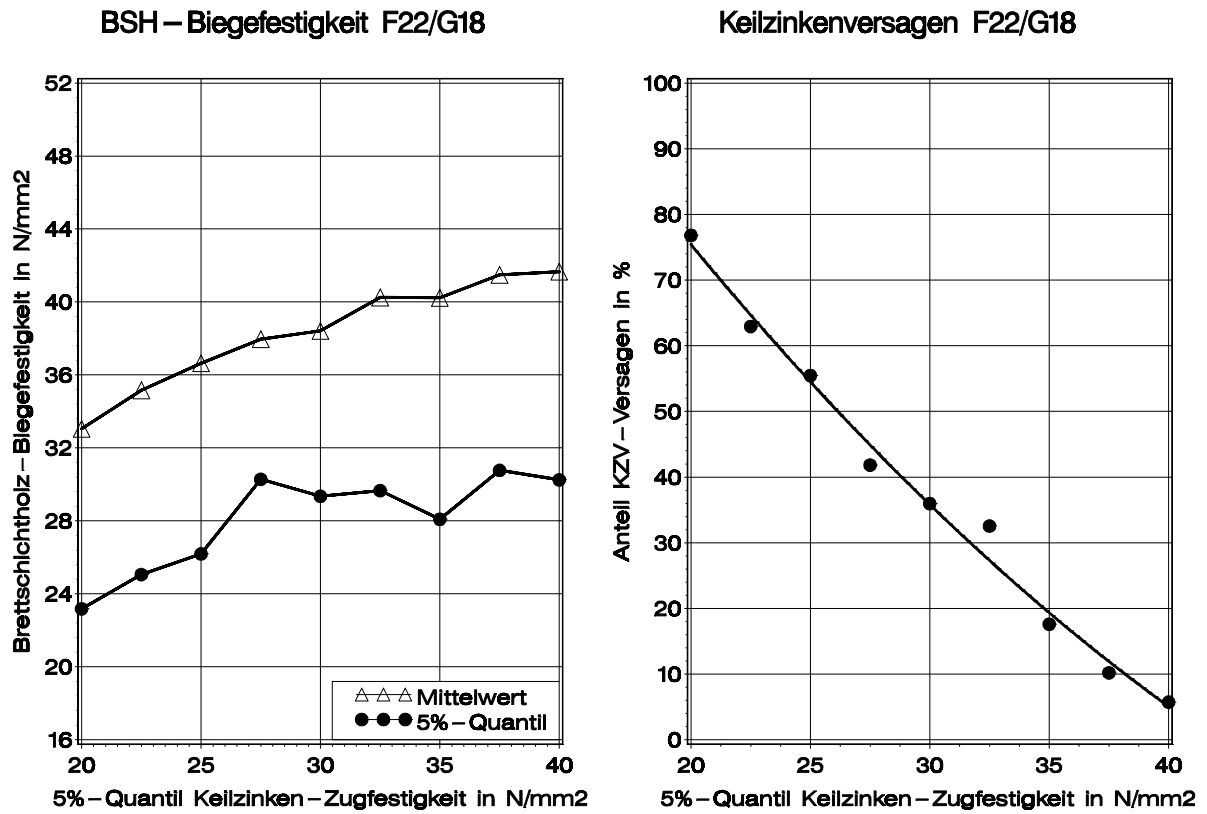


Bild A-60 (Forts.) Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren F22/G18

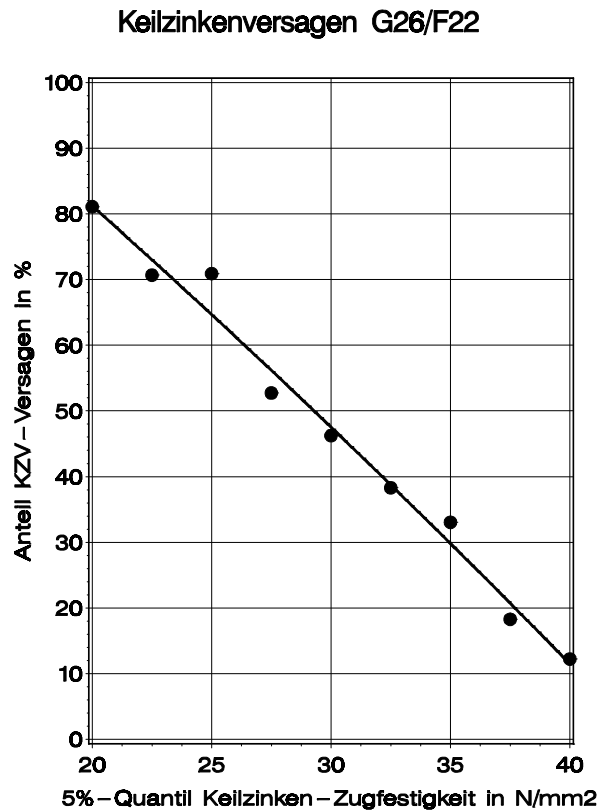
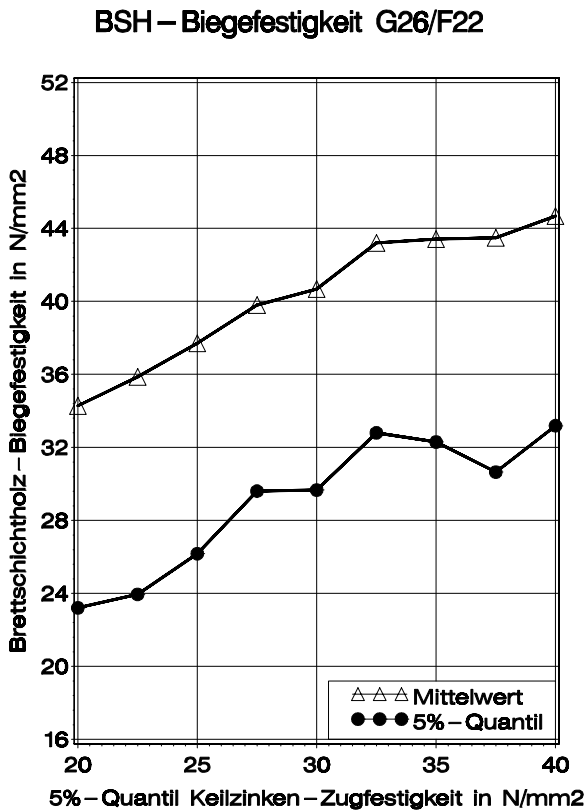
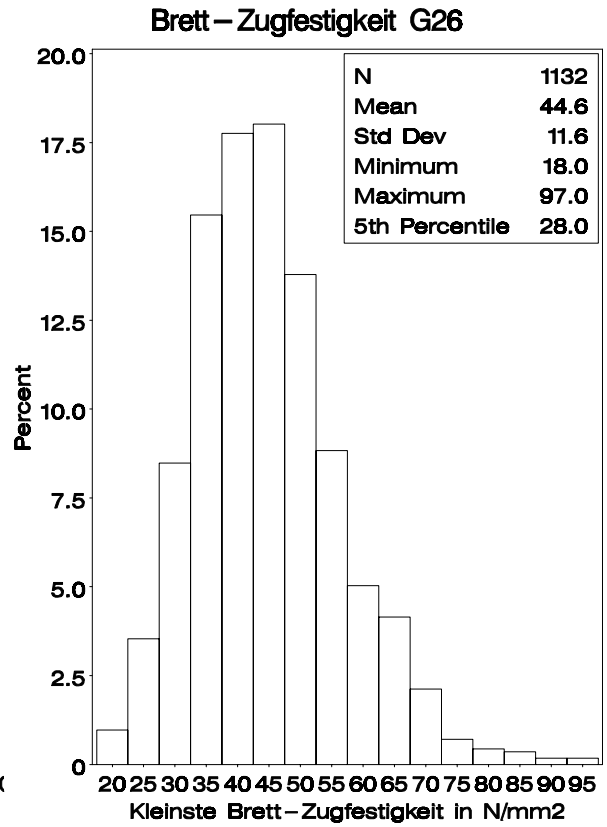
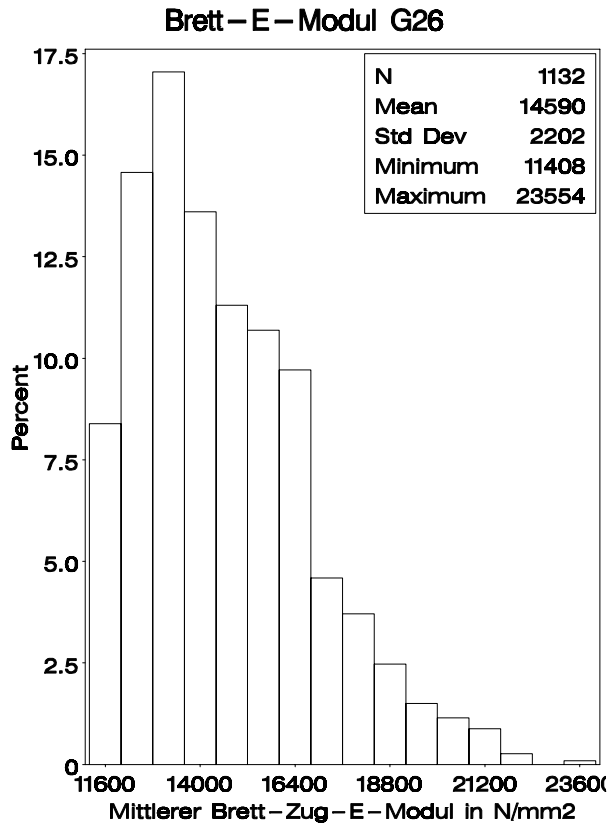


Bild A-61 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren G26/F22; F22 s. Bild A-60

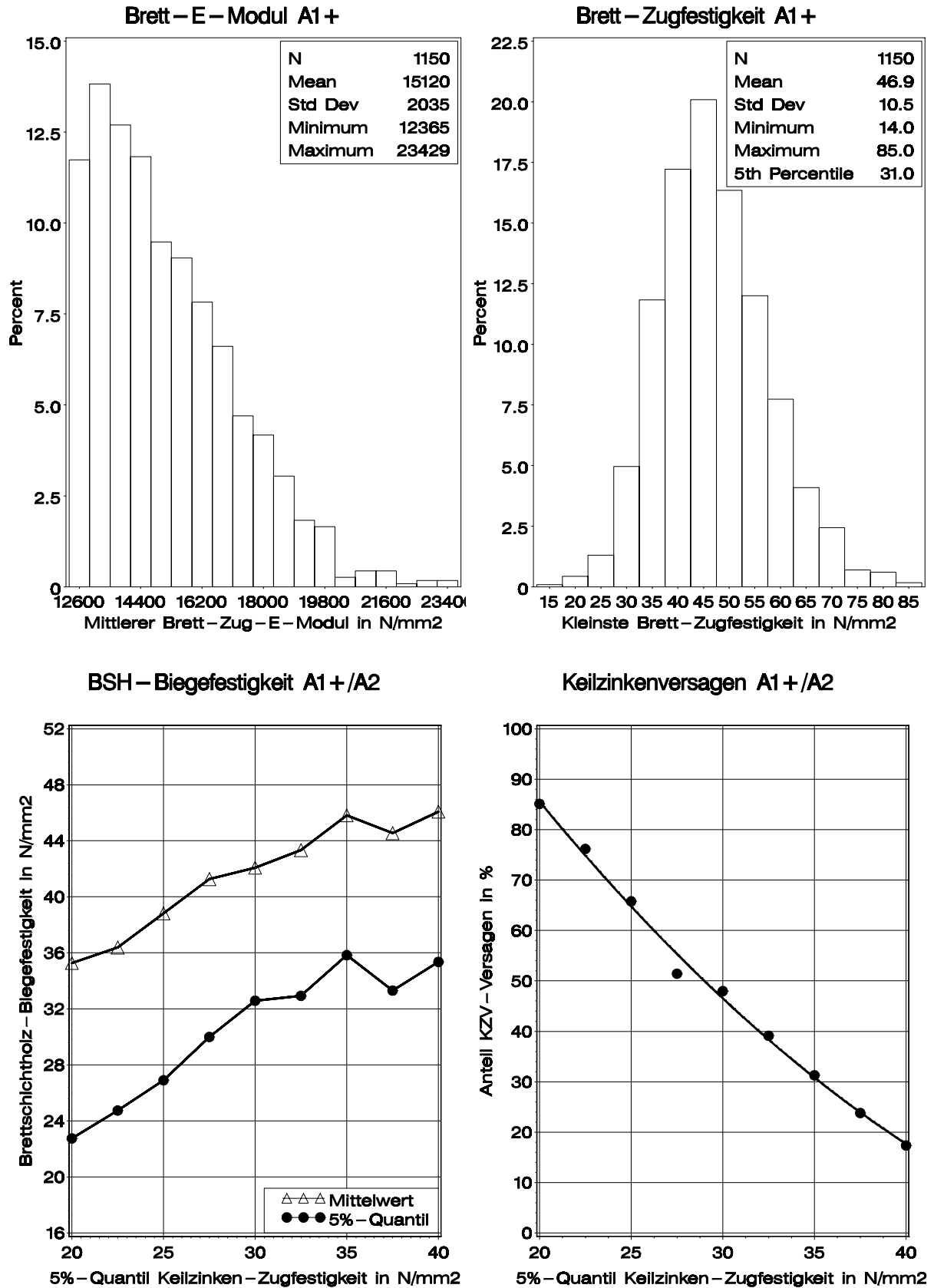


Bild A-62 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren A1+/A2; A2 s. Bild A-59

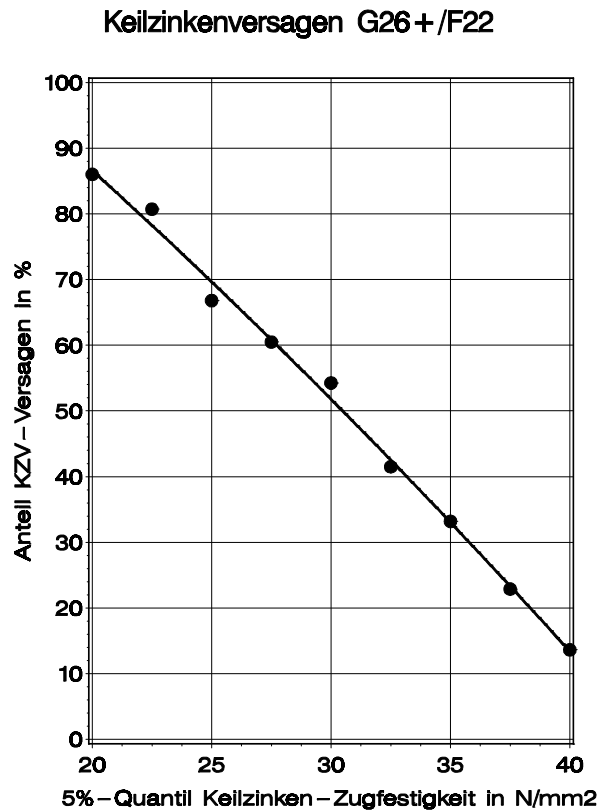
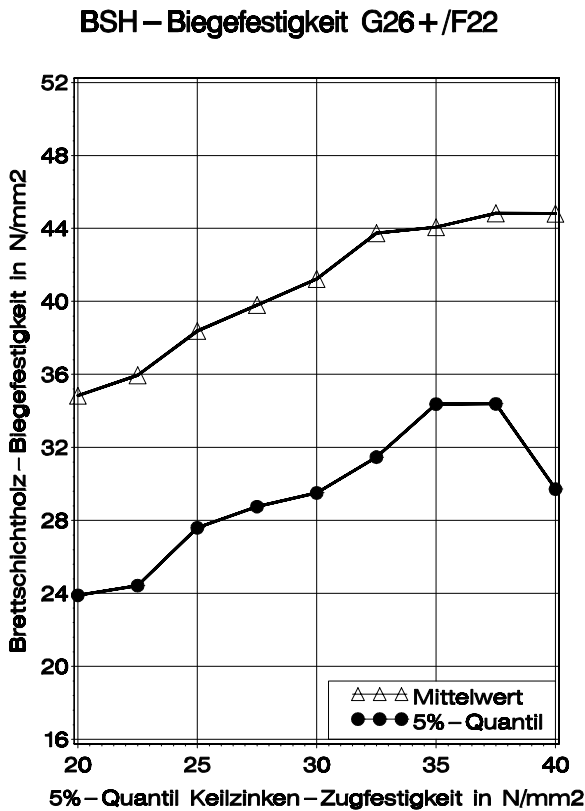
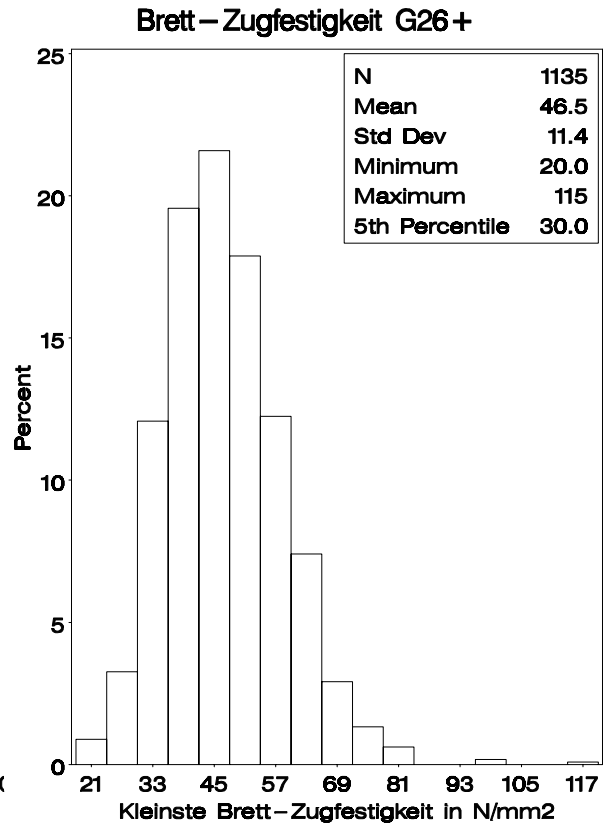
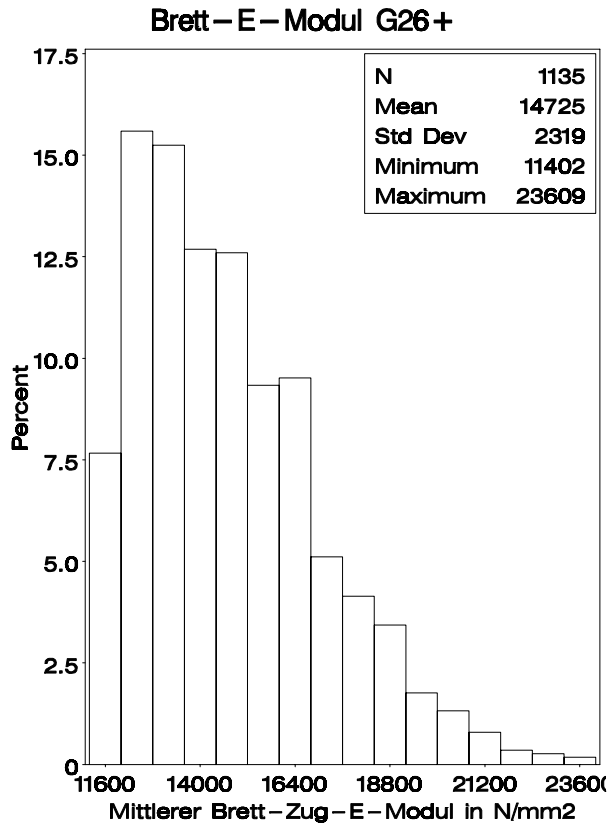


Bild A-63 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren G26+/F22; F22 s. Bild A-60

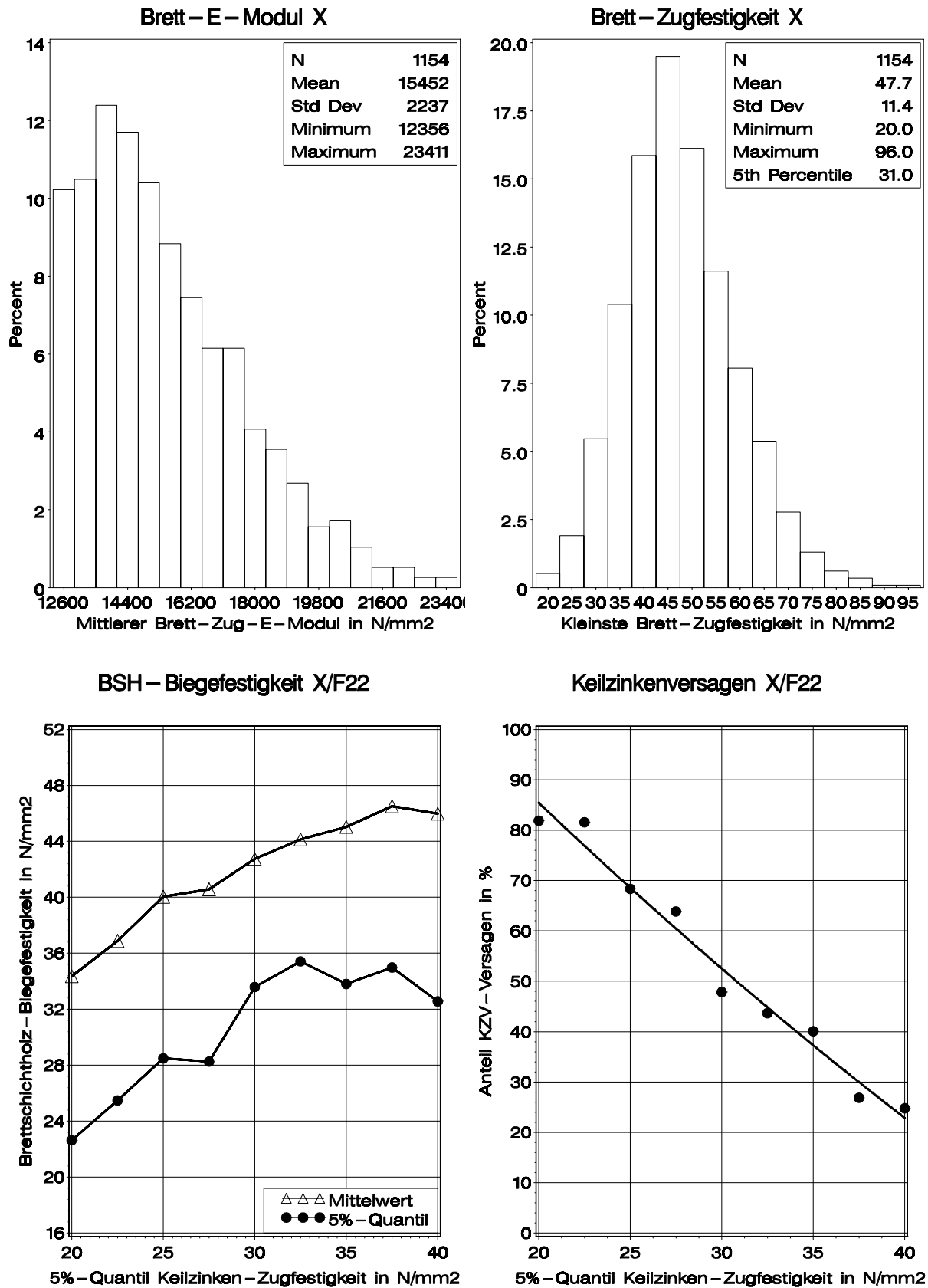
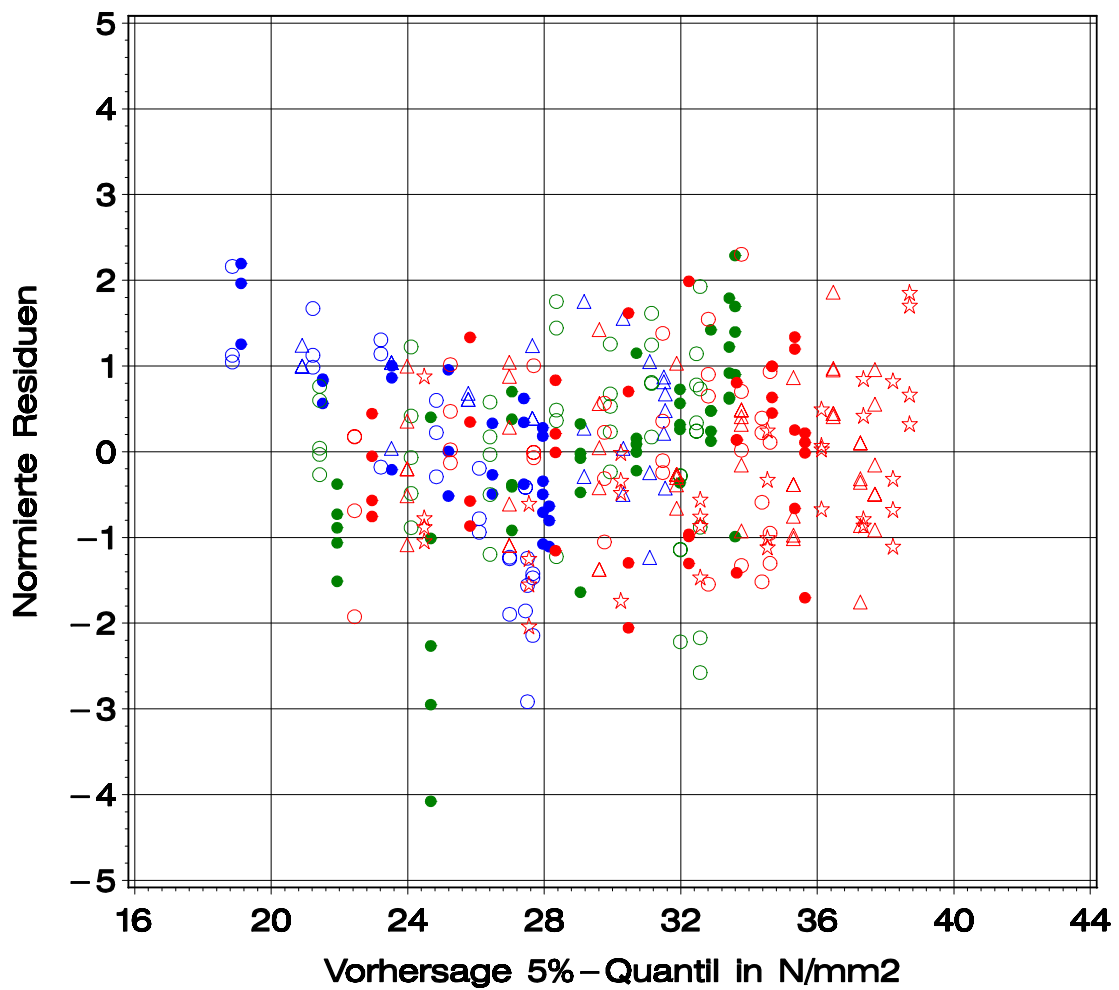


Bild A-64 Simulationsergebnisse für die Sortierverfahren X/F22; F22 s. Bild A-60

## A 4 Residualanalyse



Sortierung (ft,l,k)	Symbol	Bezeichnung (Anzahl)
○ ○ ○	○ ○ ○	VIS-1 (13)
△ △ △	△ △ △	VIS-3 (21)
● ● ●	● ● ●	RHO-5 (25)
● ● ●	● ● ●	EDYN-2 (29)
☆ ☆ ☆	☆ ☆ ☆	EDYN-4 (35)
● ● ●	● ● ●	VIS-2 (14)
○ ○ ○	○ ○ ○	RHO-4 (23)
○ ○ ○	○ ○ ○	EDYN-1 (27)
△ △ △	△ △ △	EDYN-3 (33)

Bild A-65 Modellgleichungen (20) bzw. (21): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten

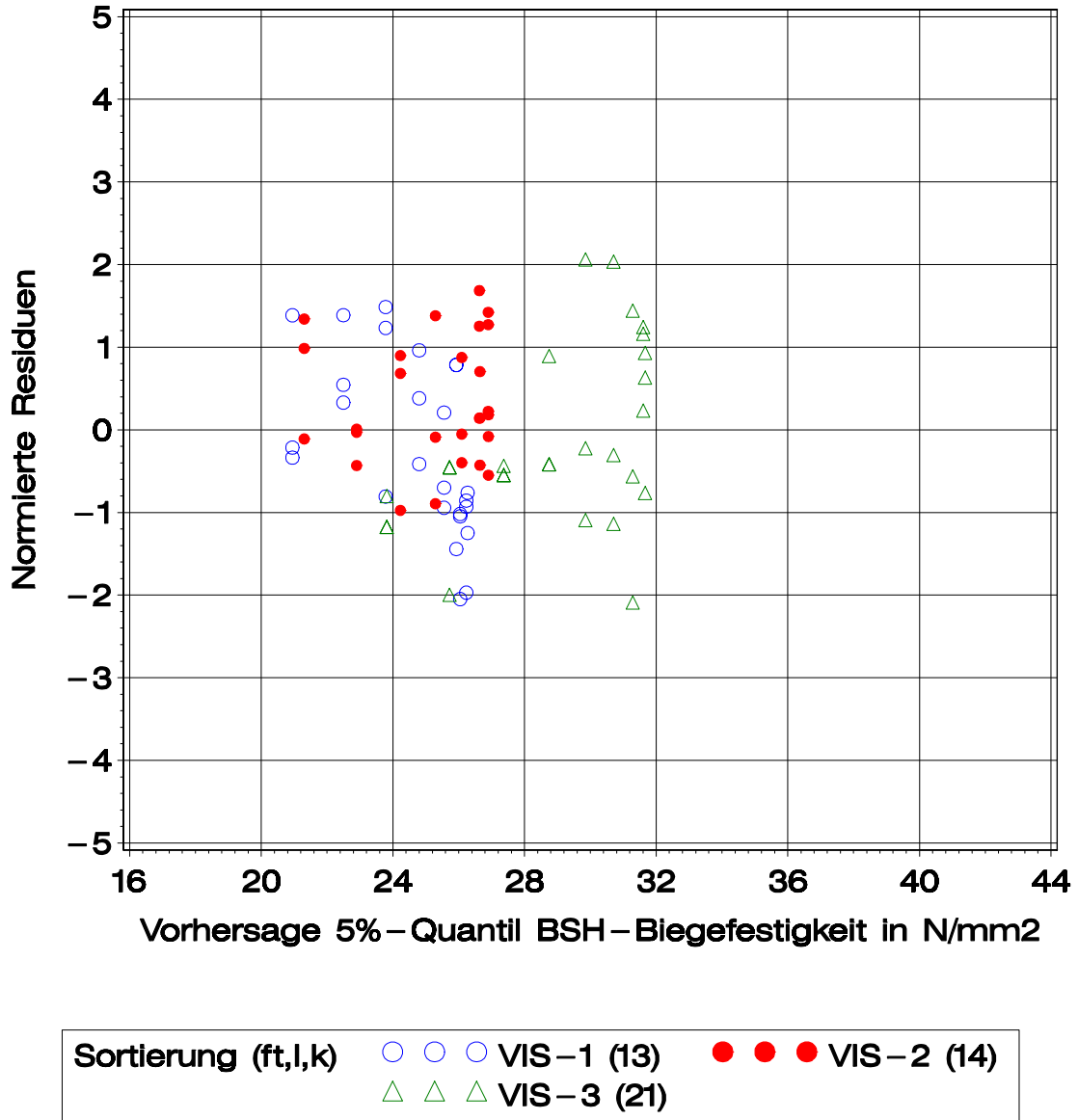


Bild A-66 Modellgleichungen (24) bzw. (25): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten



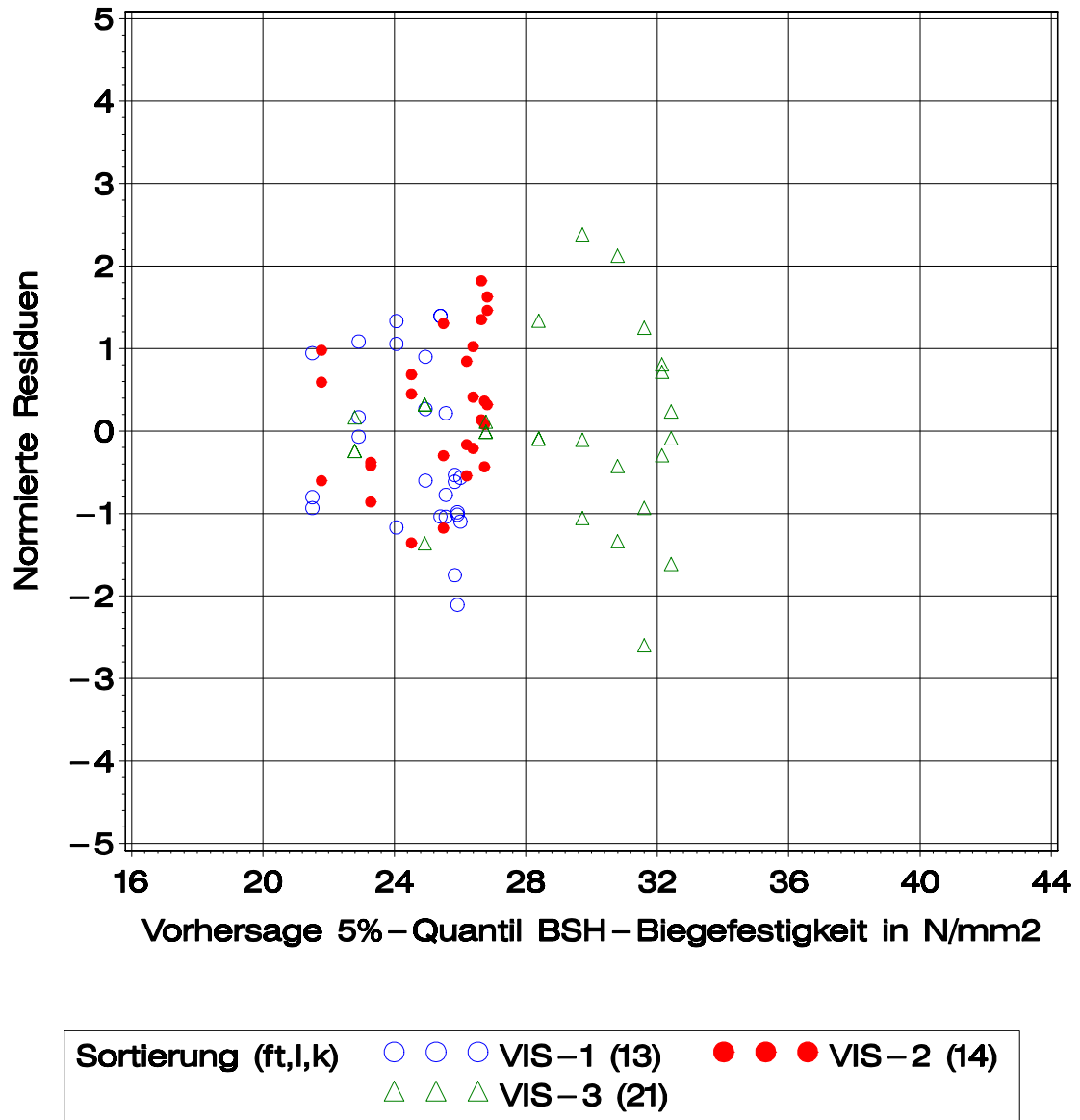


Bild A-67 Modellgleichungen (26) bzw. (27): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten

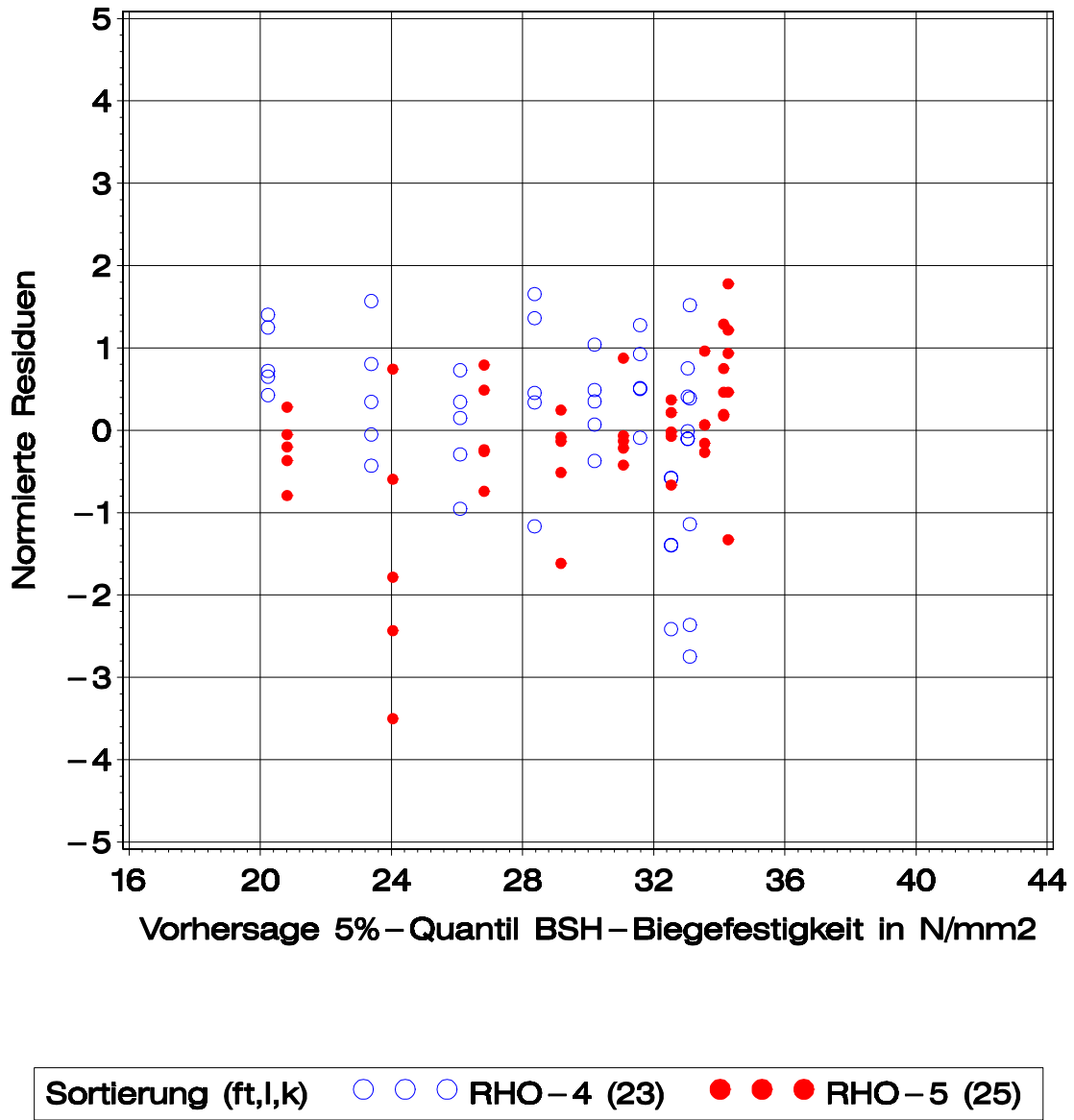


Bild A-68 Modellgleichungen (30) bzw. (31): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten

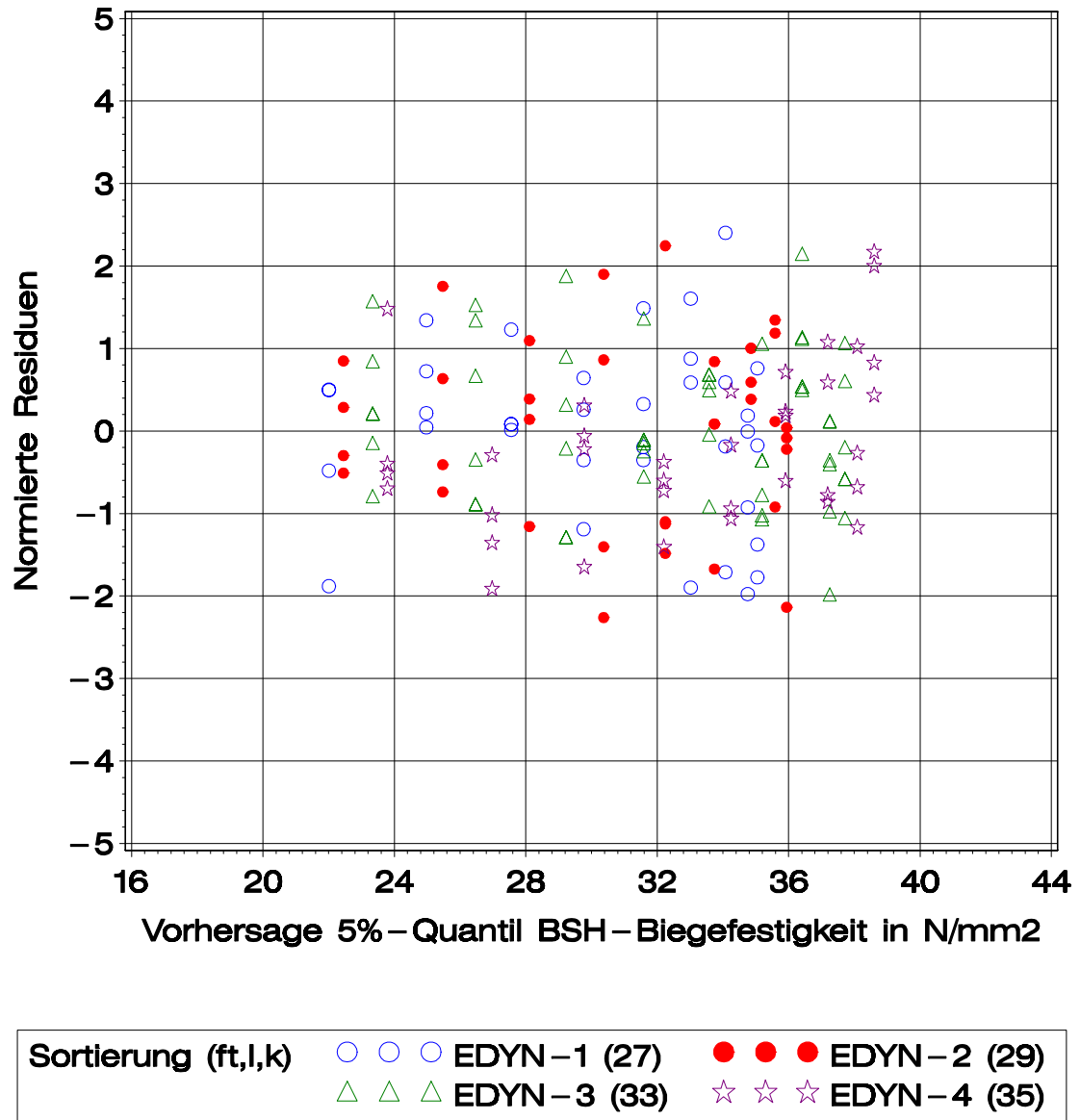


Bild A-69 Modellgleichungen (32) bzw. (33): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten

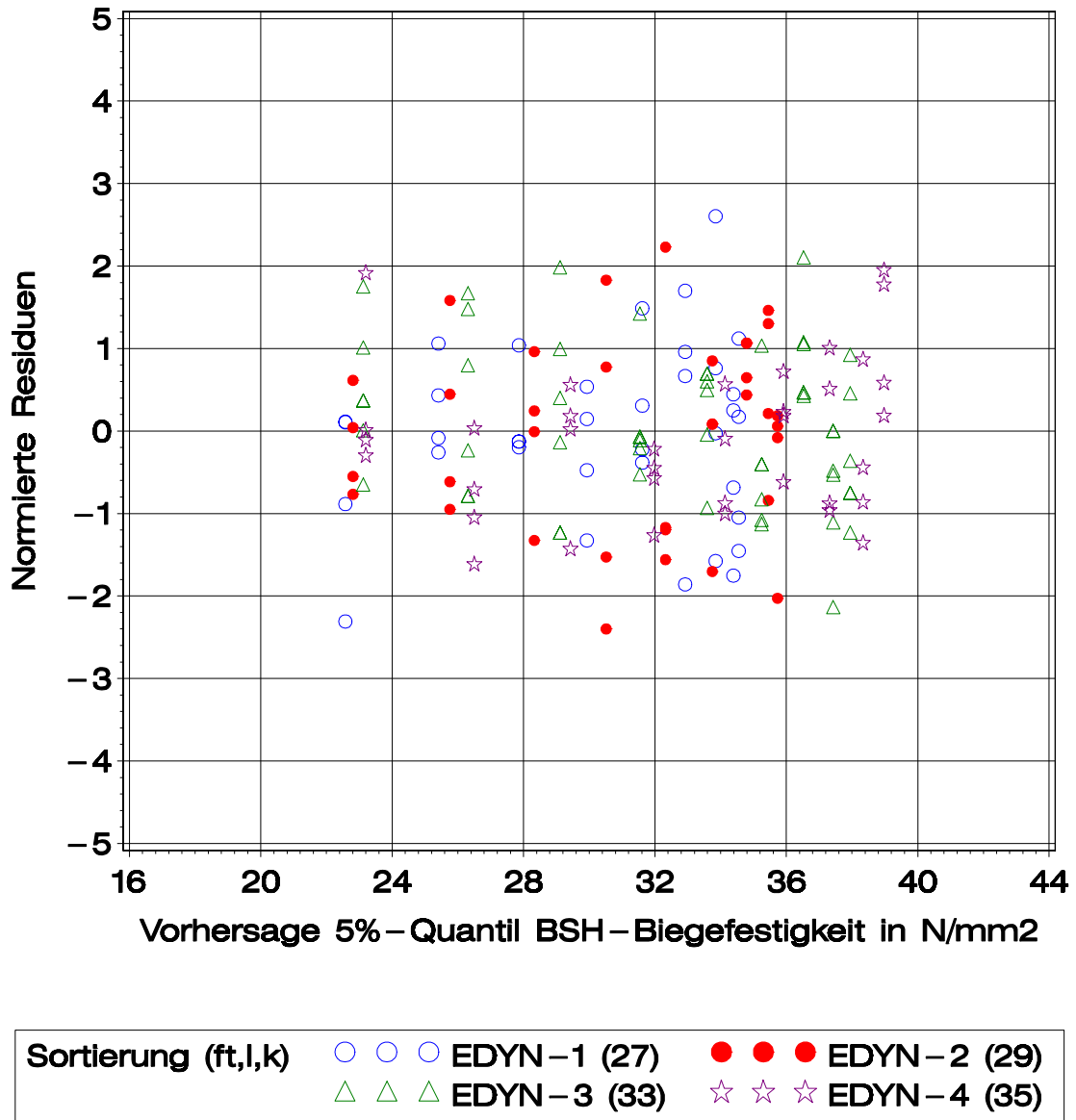


Bild A-70 Modellgleichungen (34) bzw. (35): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten

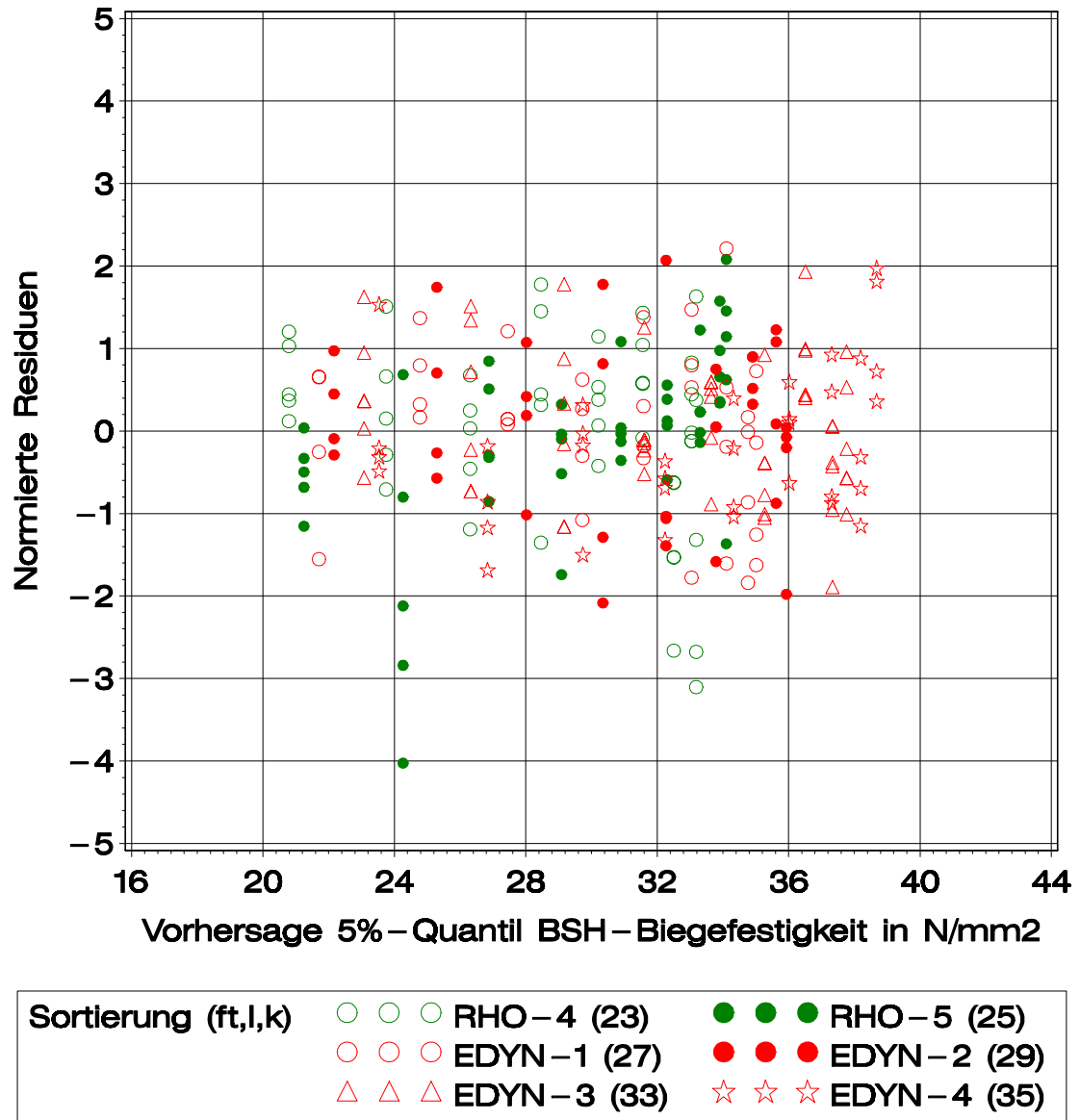


Bild A-71 Modellgleichungen (36) bzw. (37): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten

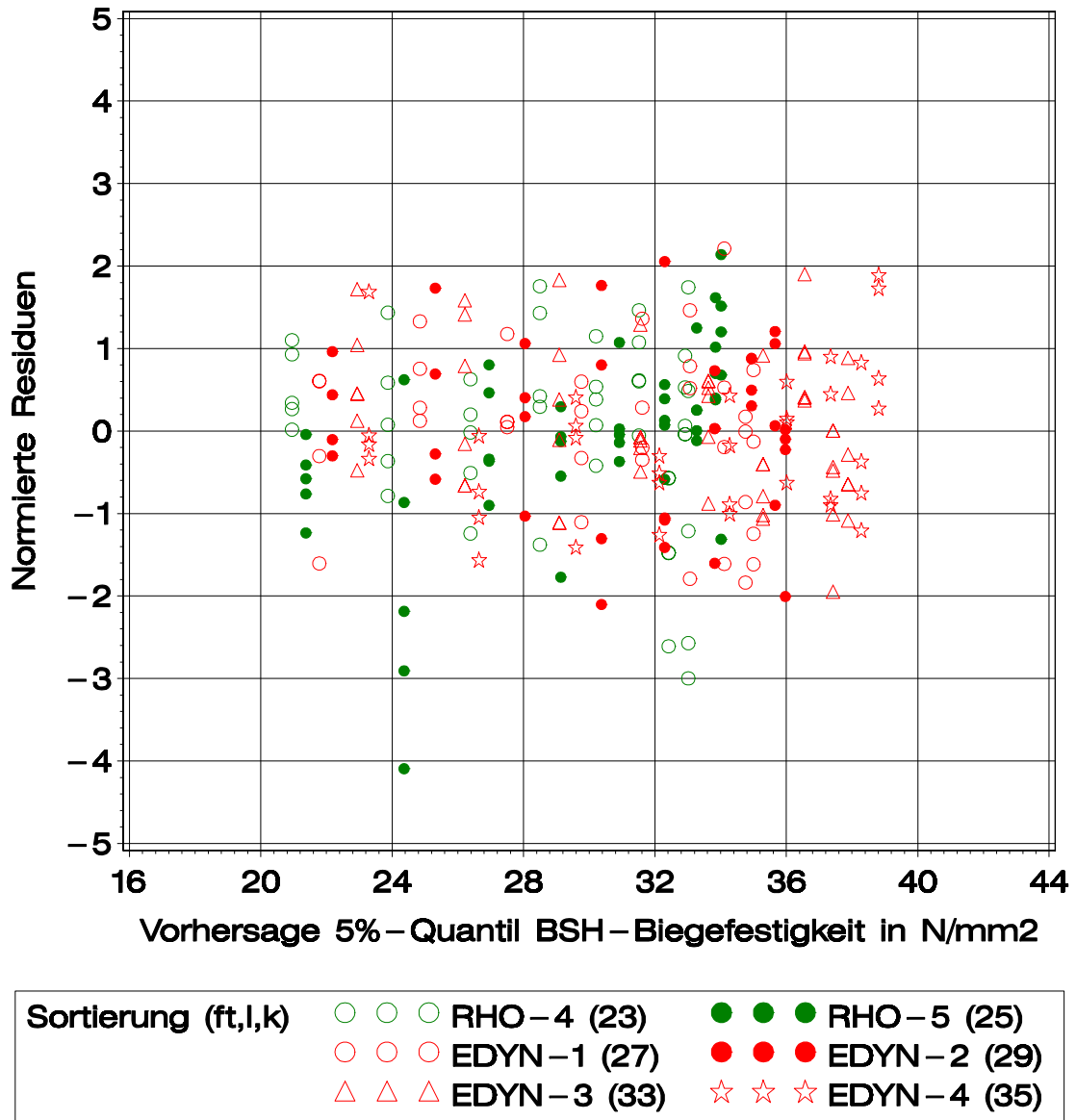


Bild A-72 Modellgleichungen (40) bzw. (41): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten

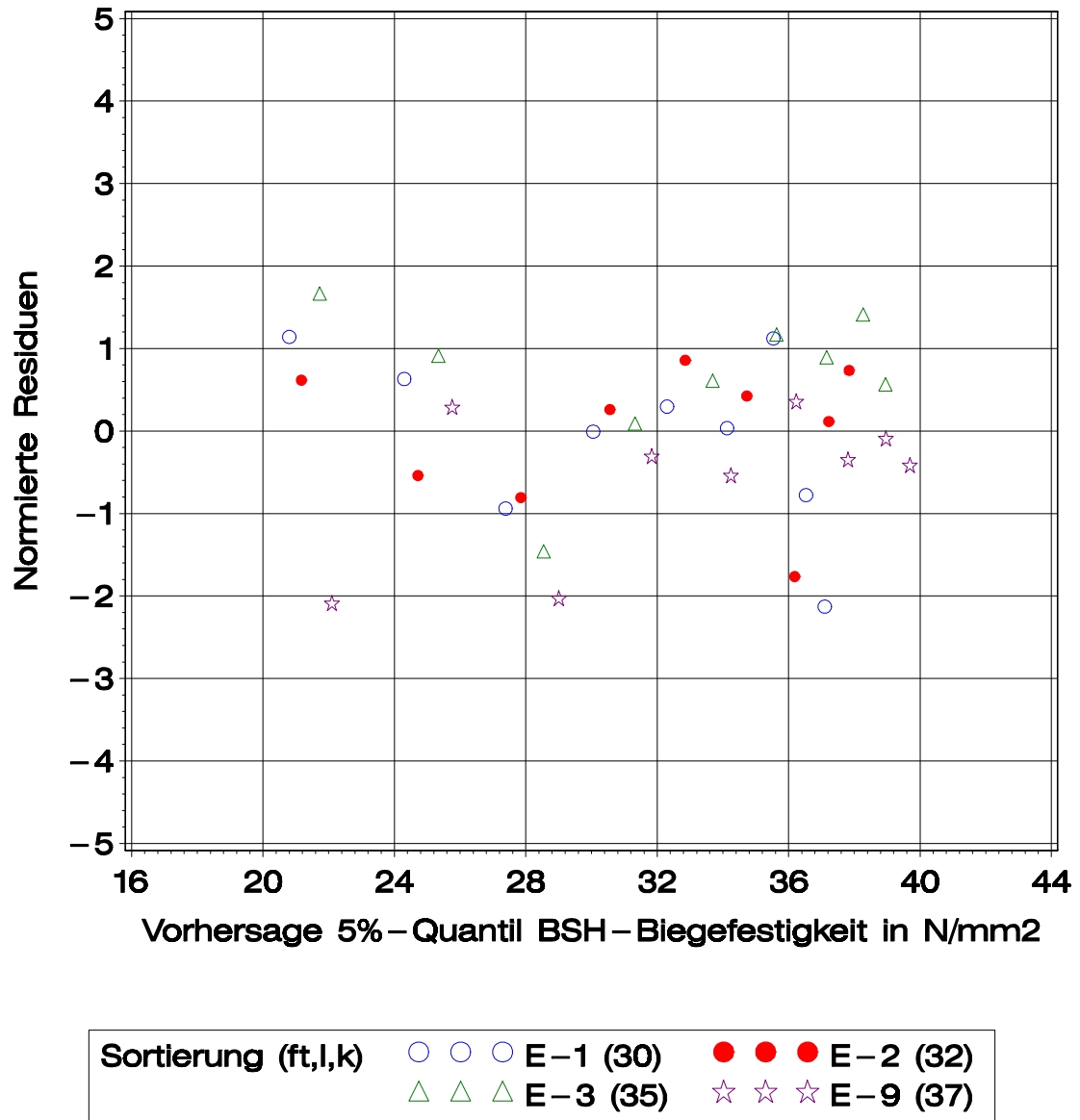
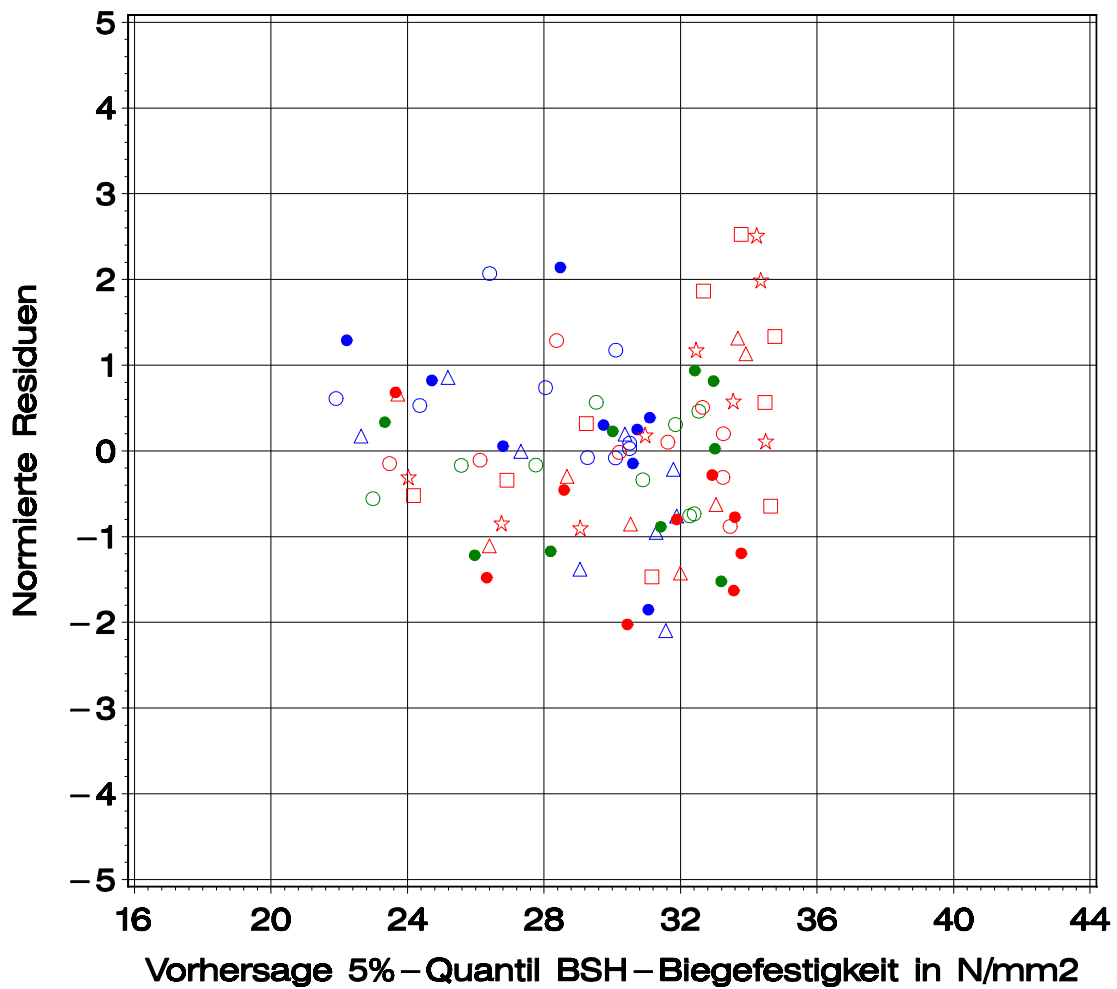


Bild A-73 Modellgleichungen (42) bzw. (43): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten



Sortierung (ft,l,k)	○ ○ ○ D2 (22,3)	● ● ● F22 (23,2)
	△ △ △ B2 (24,4)	○ ○ ○ D1 (25,4)
	● ● ● G26 (26,4)	○ ○ ○ A1 (26,8)
	● ● ● C1 (27,3)	△ △ △ G26+ (27,5)
	☆ ☆ ☆ A1+ (28,4)	□ □ □ X (28,8)

Bild A-74 Modellgleichungen (44) bzw. (45): Normierte Residuen über vorhergesagten Werten



## A 5 Weitere Biegeversuche

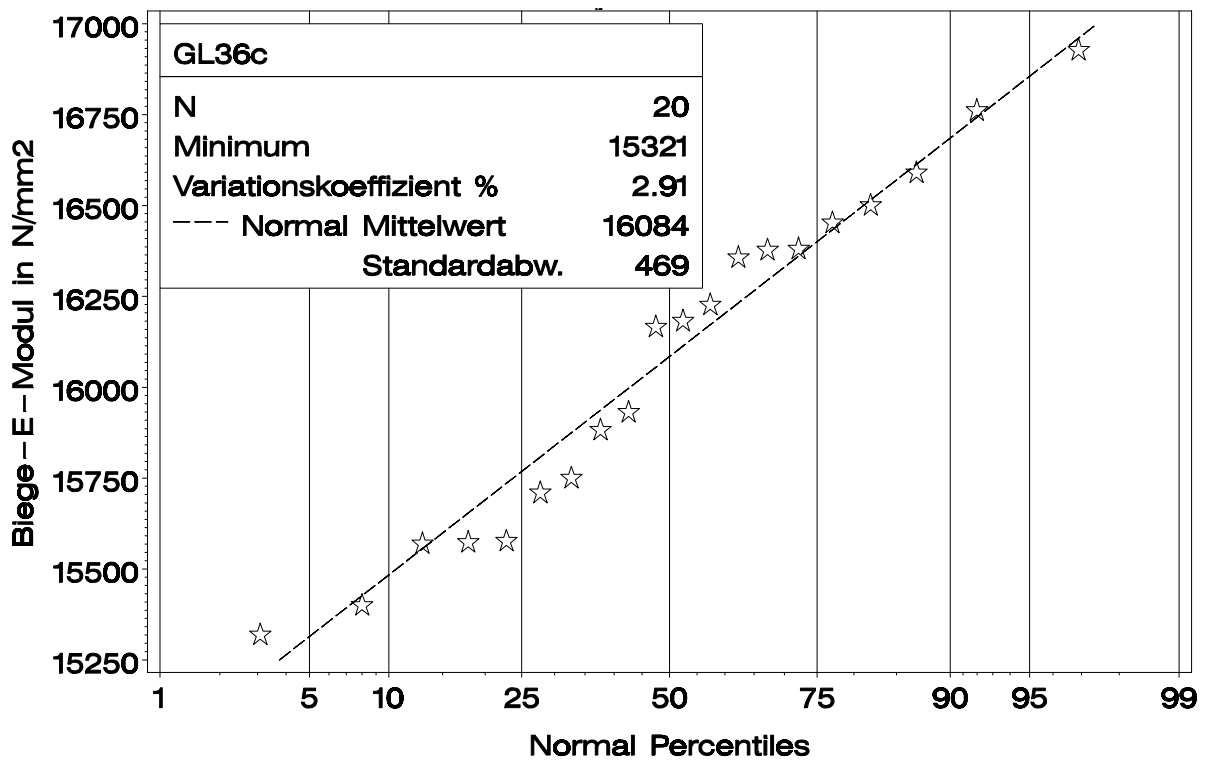
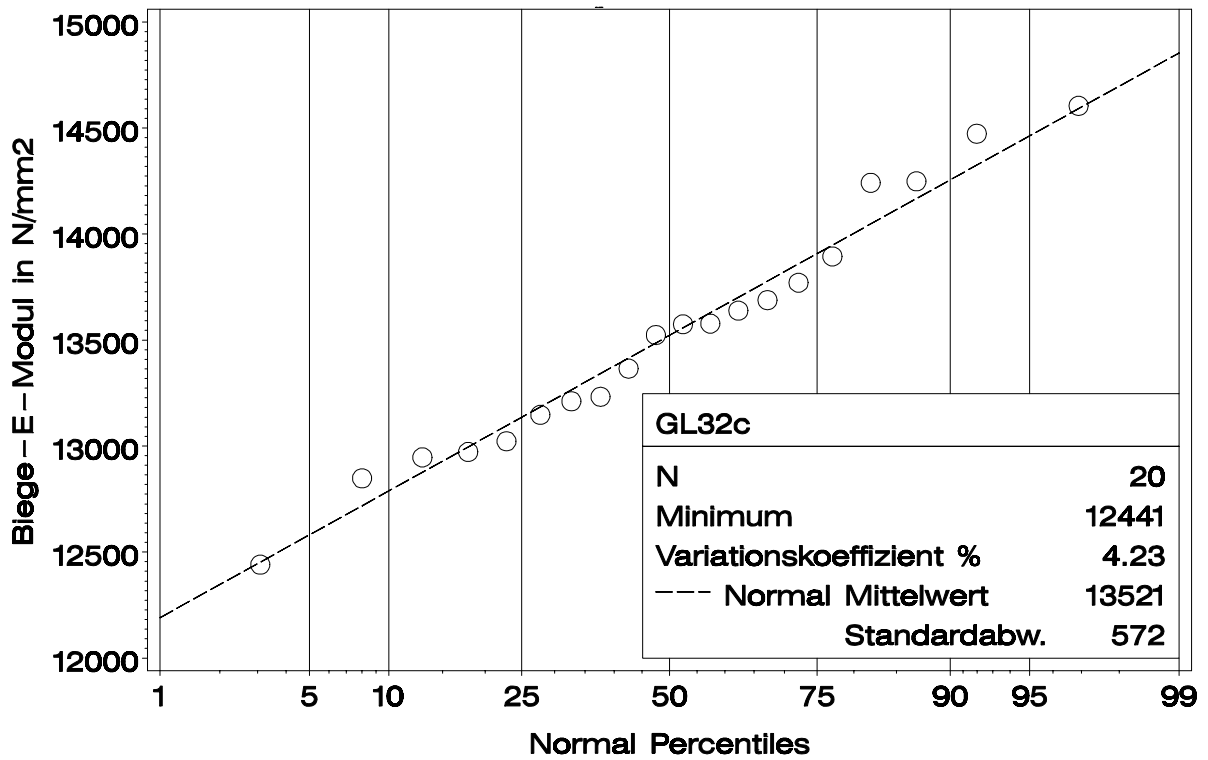


Bild A-75 Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung des Biege-Elastizitätsmoduls; GL32c (oben) und GL36c (unten)

Tabelle A-8 Biegefestigkeit, Beobachtungen und Positionen der Bruchstellen

Träger	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	Beobachtungen
GL32c-1	28,9	Holzversagen, Pos. 35, s. Bild A-76
GL32c-2	28,3	Keilzinkenversagen, Pos. 39, s. Bild A-77
GL32c-3	34,5	Holzversagen, Pos. 46, s. Bild A-78
GL32c-4	30,4	Keilzinkenversagen, Pos. 23, s. Bild A-79
GL32c-5	36,8	Holzversagen, Pos. 42-43, sowie Holz- und Keilzinkenversagen, Pos. 28/2, s. Bild A-80
GL32c-6	27,9	Holzversagen, Pos. 45-46, s. Bild A-81
GL32c-7	26,6	Holzversagen, Pos. 42-43 und Pos. 45, s. Bild A-82
GL32c-8	36,6	Holzversagen, Pos. 19 und 22-23, s. Bild A-83
GL32c-9	27,4	Holzversagen, Pos. 26, s. Bild A-84
GL32c-10	32,8	Holzversagen, Pos. 45, s. Bild A-85
GL32c-11	37,9	Keilzinkenversagen, Pos. 41/2, und Holzversagen, Pos. 44, s. Bild A-86
GL32c-12	36,2	Holzversagen, Pos. 26, und Keilzinkenabriss, Pos. 31, s. Bild A-87
GL32c-13	32,0	Keilzinkenversagen, Pos. 32, s. Bild A-88
GL32c-14	38,6	Holzversagen, Pos. 39-40 und Pos. 36/2, s. Bild A-89
GL32c-15	39,7	Holzversagen, Pos. 51, Bild A-90
GL32c-16	37,4	Holzversagen, Pos. 37, s. Bild A-91
GL32c-17	31,4	Holzversagen, Pos. 34-35, s. Bild A-92
GL32c-18	28,1	Holzversagen, Pos. 51, s. Bild A-93
GL32c-19	25,8	Holzversagen, Pos. 27-28, s. Bild A-94
GL32c-20	32,6	Holzversagen, Pos. 25-26, und Keilzinkenversagen, Pos. 31/2, s. Bild A-95



Bild A-76 GL32c-1: Holzversagen in der Randlamelle



Bild A-77 GL32c-2: Keilzinkenversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Detail (rechts)



Bild A-78 GL32c-3: Holzversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Detail der Bruchstelle (rechts)



Bild A-79 GL32c-4: Keilzinkenversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Detail (rechts)

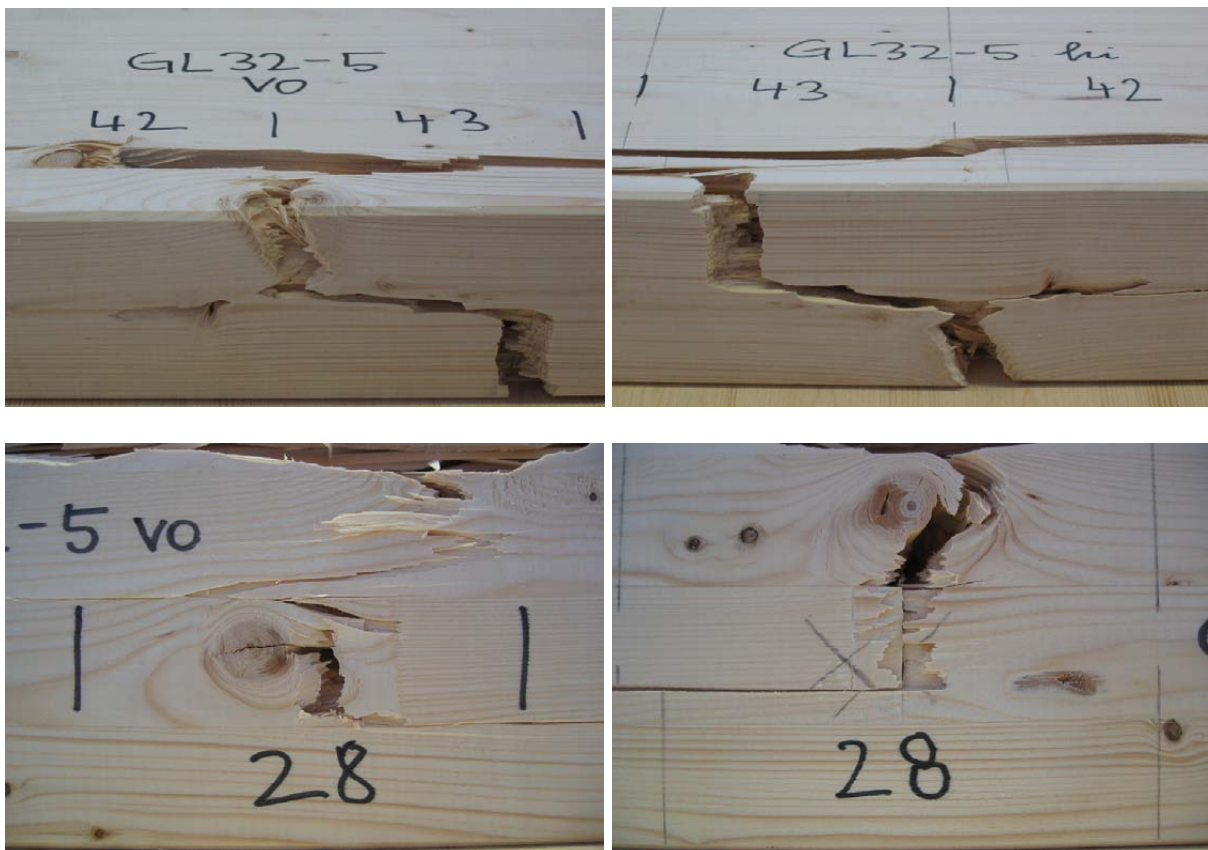


Bild A-80 GL32c-5: Holzversagen in der Randlamelle, 2 x Untersicht (oben) und kombiniertes Holz- und Keilzinkenversagen, Details von beiden Seiten (unten)



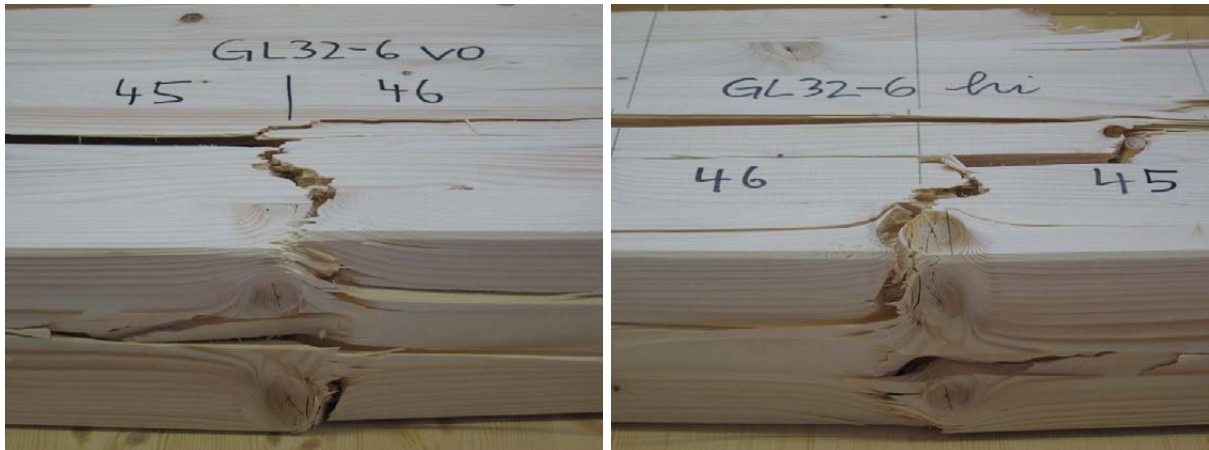


Bild A-81 GL32c-6: Holzversagen in der Randlamelle, 2 x Untersicht



Bild A-82 GL32c-7: Holzversagen an zwei Stellen in der Randlamelle, Ansicht von vorne (links) und von hinten (rechts)



Bild A-83 GL32c-8: Holzversagen an zwei Stellen in der Randlamelle, 2 x Untersicht



Bild A-84 GL32c-9: Holzversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Detail (rechts)

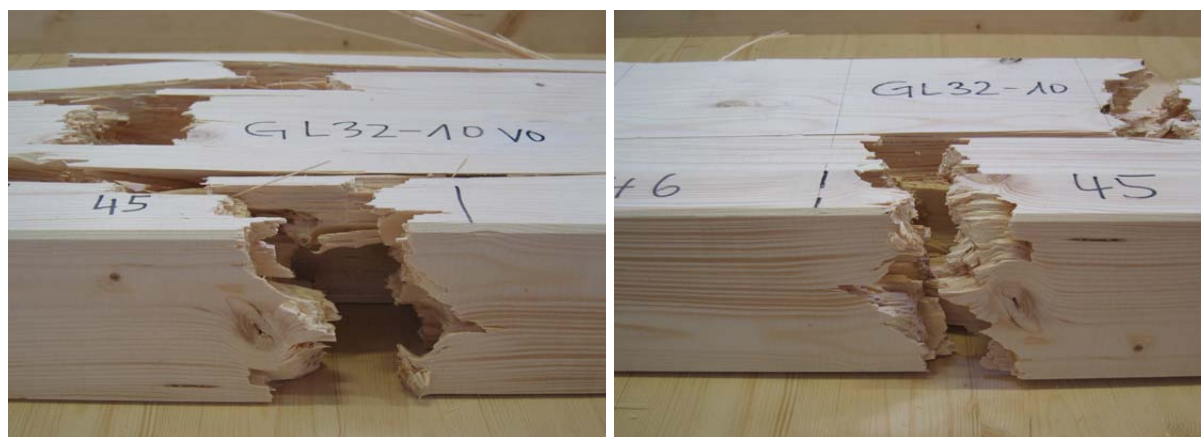


Bild A-85 GL32c-10: Holzversagen in der Randlamelle, 2 x Untersicht



Bild A-86 GL32c-11: Holzversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Keilzinkenversagen in der 2. Lage, Ansicht von hinten (rechts)





Bild A-87 GL32c-12: Holz- und Keilzinkenversagen in der Randlamelle, Untersicht (oben) und Details (unten)



Bild A-88 GL32c-13: Keilzinkenversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Detail (rechts)



Bild A-89 GL32c-14: Holzversagen in der Randlamelle, Ansicht (oben) und in der 2. Lage, Ansicht von vorne und von hinten (unten)



Bild A-90 GL32c-15: Holzversagen in der Randlamelle



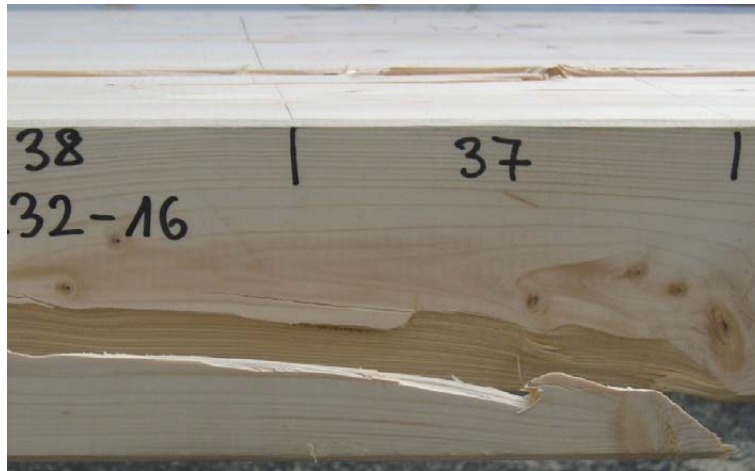


Bild A-91 GL32c-16: Holzversagen in der Randlamelle, Untersicht



Bild A-92 GL32c-17: Holzversagen in der Randlamelle, Untersicht



Bild A-93 GL32c-18: Holzversagen in der Randlamelle, Untersicht vor dem Versagen (links) und danach (rechts)



Bild A-94 GL32c-19: Holzversagen in der Randlamelle, Ansicht (links) und Untersicht (rechts)



Bild A-95 GL32c-20: Holzversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Keilzinkenversagen, Ansicht (rechts)

Tabelle A-9 Biegefestigkeit, Beobachtungen und Positionen der Bruchstellen

Träger	$f_m$ N/mm <sup>2</sup>	Beobachtung
GL36c-1	39,3	Holzversagen, Pos. 25
GL36c-2	38,9	Keilzinkenversagen, Pos. 40, und Holzversagen, Pos. 41/2, s. Bild A-96*
GL36c-3	44,4	Holzversagen, Pos. 50-52
GL36c-4	40,4	Holzversagen, Pos. 47
GL36c-5	41,6	Holzversagen, Pos. 37-42
GL36c-6	41,5	Holzversagen, Pos. 43-44 und Keilzinkenversagen, Pos. 48-49
GL36c-7	45,2	Holzversagen, Pos. 40
GL36c-8	43,7	Holzversagen, Pos. 34
GL36c-9	39,3	Holzversagen, Pos. 46-48
GL36c-10	46,1	Holzversagen, Pos. 24-25
GL36c-11	39,0	Holzversagen, Pos. 48-49 und 53
GL36c-12	38,6	Holzversagen, Pos. 40 und 45-46, s. Bild A-97*
GL36c-13	42,0	Holzversagen, Pos. 25-26 und 42
GL36c-14	50,4	Holzversagen, Pos. 25-26
GL36c-15	38,2	Holzversagen, Pos. 36-37, s. Bild A-98*
GL36c-16	40,4	Holzversagen, Pos. 33 und 42
GL36c-17	42,7	Holzversagen, Pos. 41-43
GL36c-18	39,2	Holzversagen, Pos. 31
GL36c-19	40,8	Holzversagen, Pos. 34
GL36c-20	45,4	Holzversagen, Pos. 33 und 41

\* Bilder der Bruchstellen nur für die drei Träger mit der kleinsten Biegefestigkeit



Bild A-96 GL36c-2: Keilzinkenversagen in der Randlamelle, Untersicht (links) und Holzversagen in der 2. Lage, Ansicht (rechts)

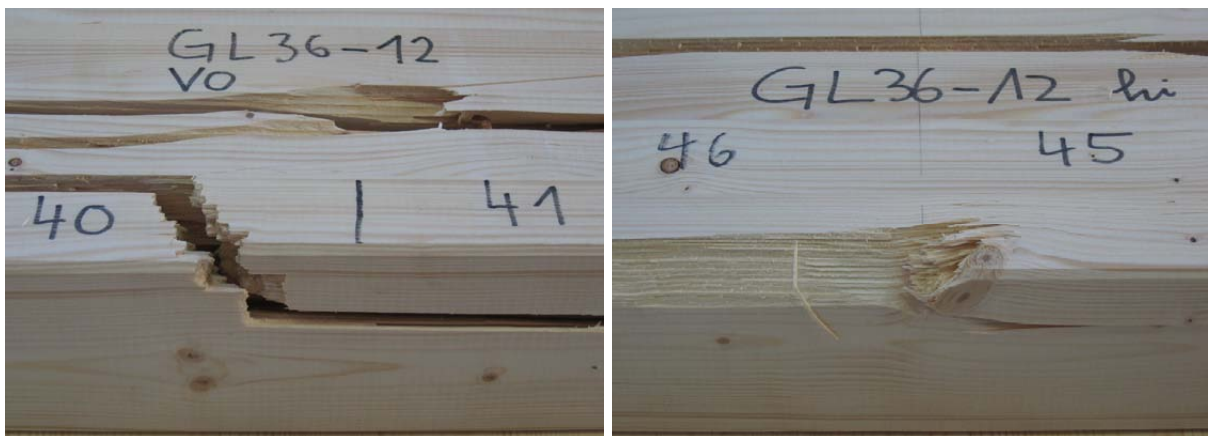


Bild A-97 GL36c-12: Holzversagen an zwei Stellen in der Randlamelle, 2 x Untersicht



Bild A-98 GL36c-15: Holzversagen in der Randlamelle, 2 x Untersicht

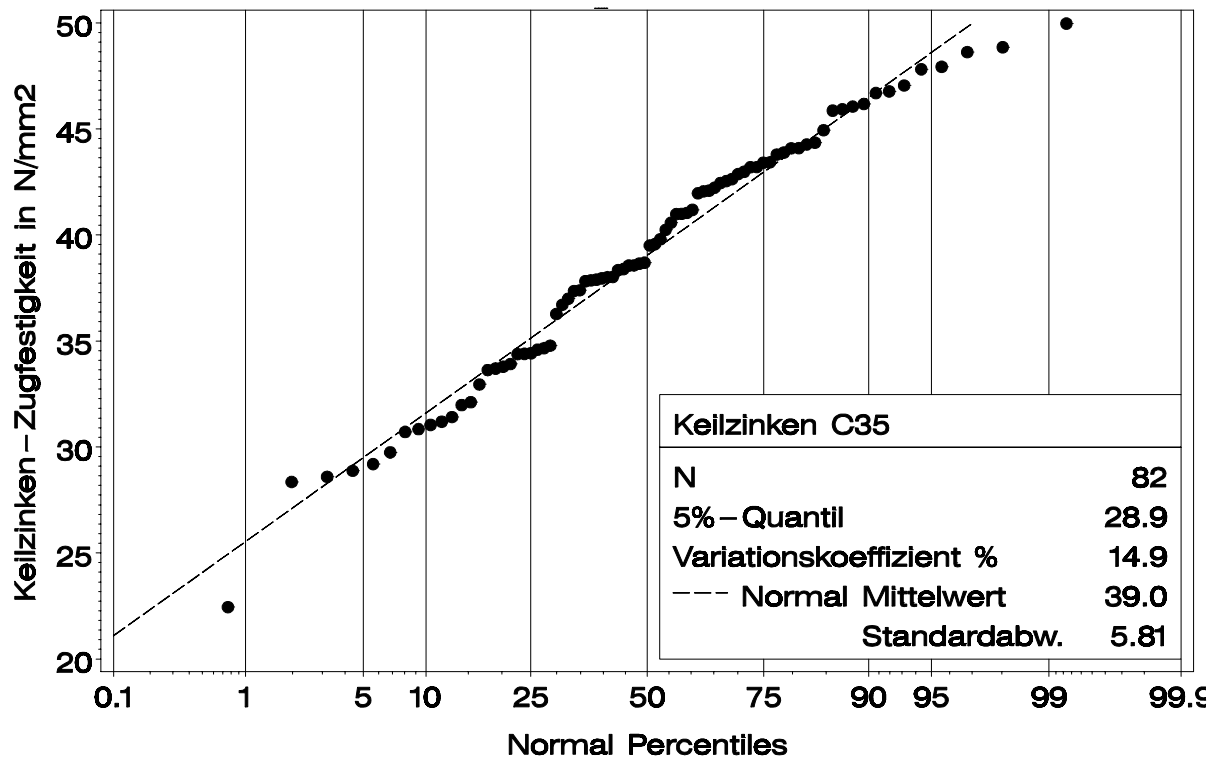
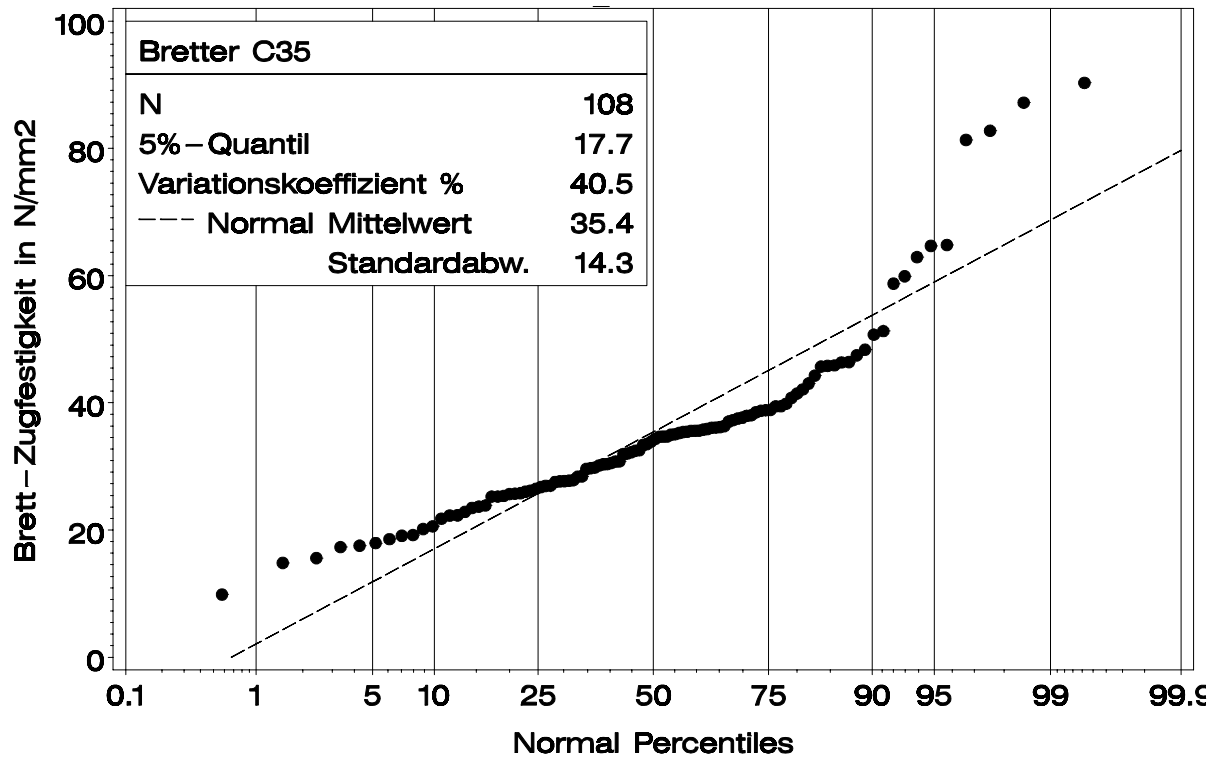


Bild A-99 Referenzproben C35: Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung der Brett- (oben) und Keilzinken-Zugfestigkeit (unten)

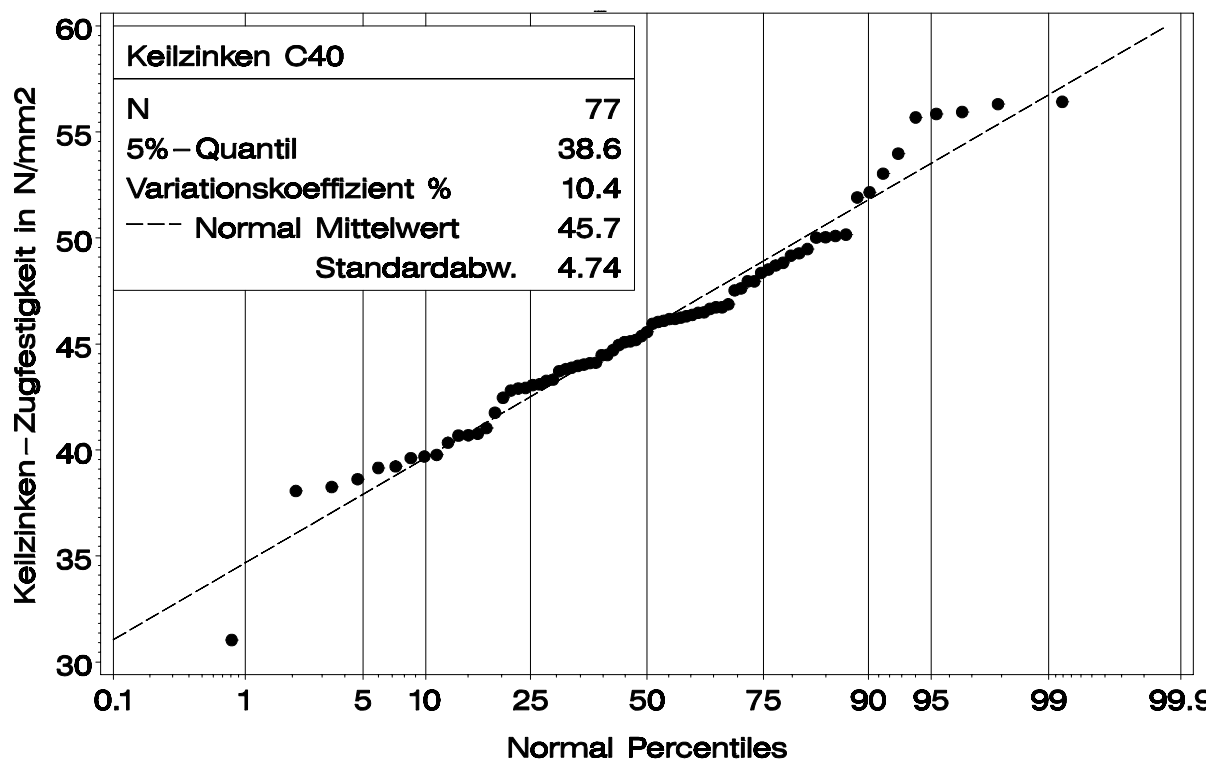
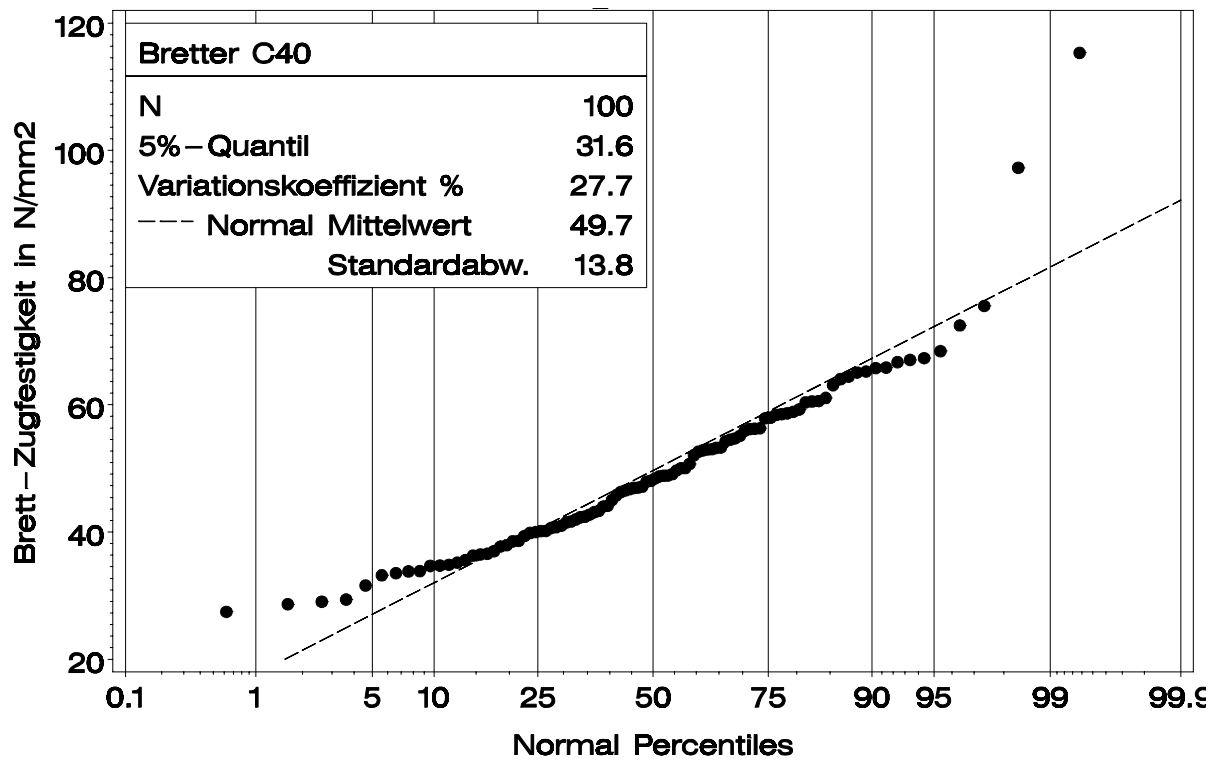


Bild A-100 Referenzproben C40: Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung der Brett- (oben) und Keilzinken-Zugfestigkeit (unten)



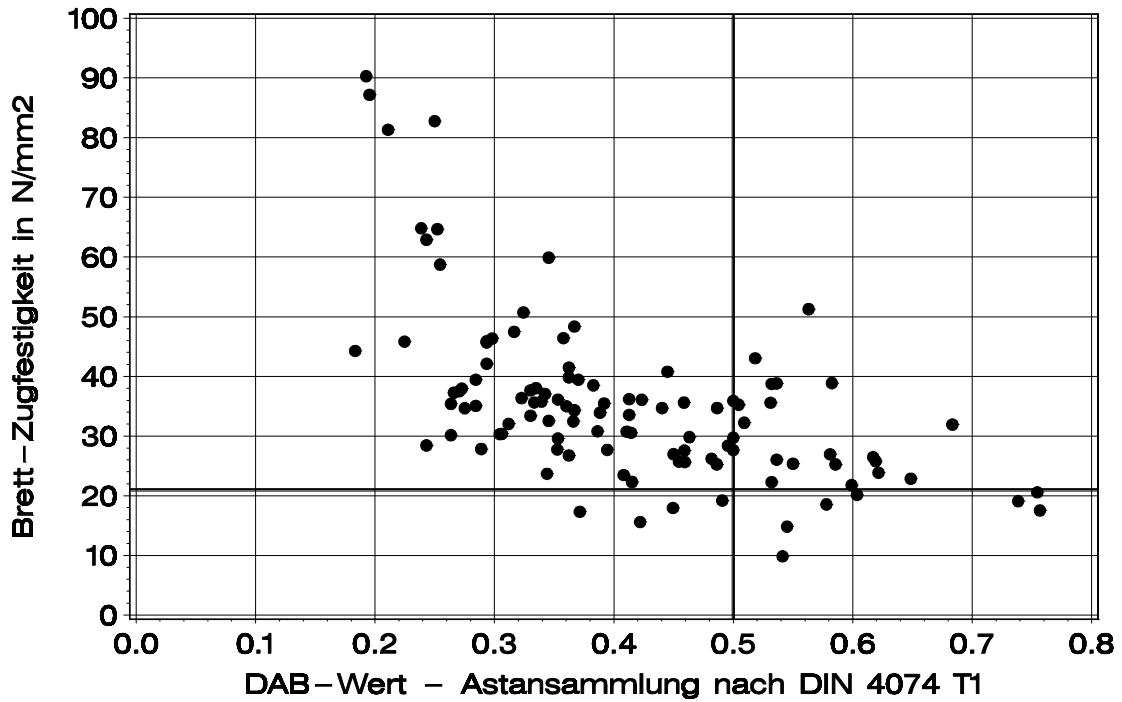


Bild A-101 C35: Brett-Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom DAB-Wert; dicke Hilfslinien verdeutlichen die charakteristische Zugfestigkeit 21 N/mm<sup>2</sup> für C35 bzw. den maximal zulässigen DAB-Wert 0,5 für S10

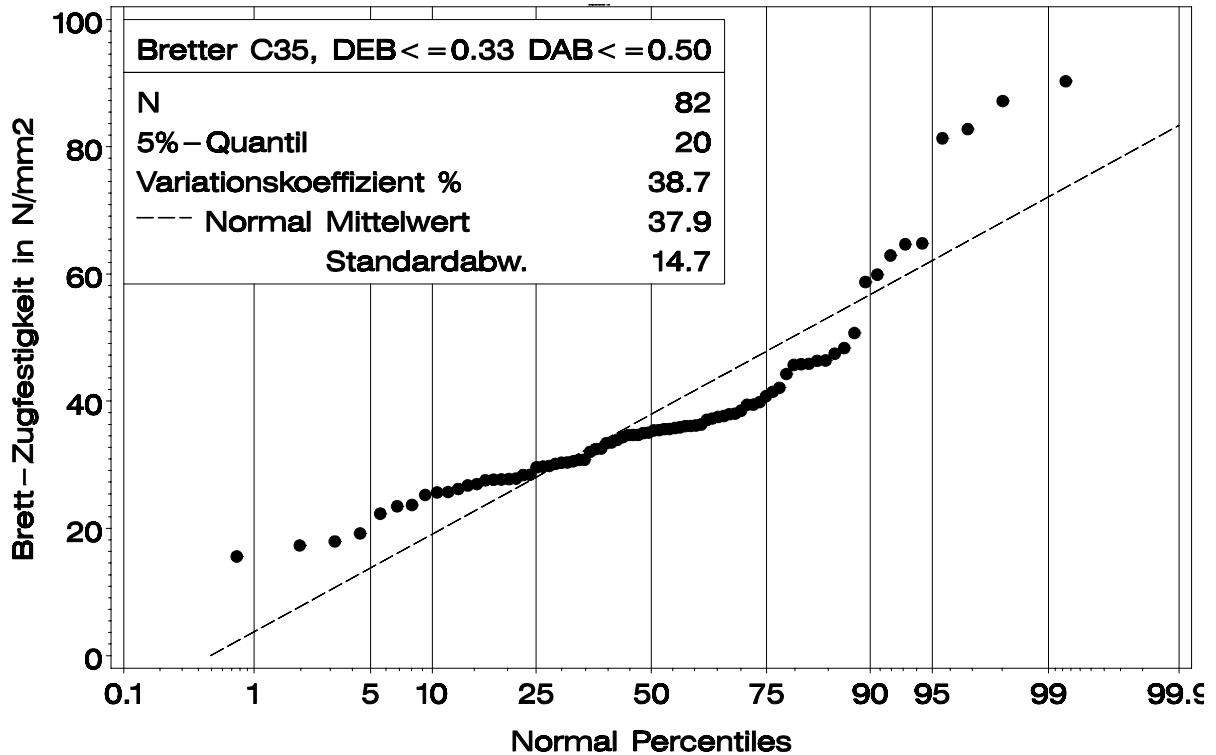


Bild A-102 C35: Empirische Verteilung und angepasste Normalverteilung für die Brett-Zugfestigkeit bei strikter Einhaltung der Grenzen des DEB- bzw. DAB-Wertes für die Sortierklasse S10





## A 6 Vorschlag I für prEN 14080

### 5.5 Strength and stiffness properties of glued laminated timber

#### 5.5.1 General

The strength- and stiffness-properties of the glued laminated timber can be verified from tests with glued laminated timber, from calculations and documented properties of the laminations or from classifications from lamination properties.

The characteristic strength and stiffness properties are based on tests in accordance with EN 408.

The characteristic bending strength is related to elements with a depth of 600 mm.

The characteristic tensile strength parallel to the grain is related to elements with a depth  $h$  of 600 mm or a width  $b$  of 600 mm.

The characteristic tensile strength perpendicular to the grain is related to elements with a stressed volume of  $0,01 \text{ m}^3$ .

The characteristic shear strength is related to elements with homogeneously stressed volume of  $0,0005 \text{ m}^3$ .

The compression strength perpendicular to the grain given in this European standard are approximately half of those used in some design codes for the strength verification of supports.

The 5%-percentile of a shear modulus or a modulus of elasticity can be estimated from the mean value taken into account a ratio of  $G_{05}/G_{50} = 5/6$  respectively  $E_{05}/E_{50} = 5/6$ .

NOTE: According to EN 1995-1-1 the characteristic value for the bending strength can be enlarged by a factor  $k$  for glulam members subjected to flatwise-bending.

For the verification of the lateral torsional stability of glued laminated timber members made of at least ten lamellas ( $E_{0,g,05} \cdot G_{g,05}$ ) can be enlarged by a factor  $k = 1,40$ .

The requirements for the strength and stiffness properties of the lamellas given in 5.5 shall be fulfilled.

If the grading procedures reliably ensures that all parts of the split member meet the declared properties, members are allowed to be split lengthwise. Splitting is also allowed for glued laminated timber whose outer lamellas have a characteristic tensile strength of not less than  $18 \text{ N/mm}^2$  if the characteristic bending and tensile strength of the split members is reduced by  $4 \text{ N/mm}^2$  compared with the non-split member.

#### 5.5.2 Verification from classification of standardised beam lay ups and lamella properties which can be classified into a strength class

##### 5.5.2.1 Properties of the lamellas

The lamellas shall comply with a strength class given in table 3.

Table 3 – Characteristic strength and stiffness properties in  $\text{N/mm}^2$  and densities in  $\text{kg/m}^3$  for lamellas for glued laminated timber

Lamella strength class	$f_{t,0,l,k}$	$E_{t,0,l,k}$	$\rho_{l,k}$
	$[\text{N/mm}^2]$	$[\text{N/mm}^2]$	$[\text{kg/m}^3]$
T11 E9	11	9.000	320
T14 E11	14	11.000	350
T18 E12	18	12.000	380
T21 E13	21	13.000	400
T24 E14	24	14.000	420
T27 E14.8	27	14.800	430
T30 E15.6	30	15.600	440
T33 E16.4	33	16.400	450
T36 E17.2	36	17.200	460

NOTE: The first five classes given in table 3 comply with C-Classes given in EN 338: 2005.

#### 5.5.2.2 Strength of finger joints

The requirements for finger joints in lamellas can be taken from table 4 or have to be calculated according to 5.5.3.2.

Table 4 – Required characteristic values for tensile strength or bending strength of finger joints in lamellas in  $\text{N/mm}^2$  for lamella strength classes given in table 3

Lamella strength class	$f_{t,j,k}$	$f_{m,j,k}$
	$[\text{N/mm}^2]$	$[\text{N/mm}^2]$
T11 E9	22	31
T14 E11	24	33
T18 E12	25	35
T21 E13	27	38
T24 E14	29	41
T27 E14.8	31	43
T30 E15.6	32	45
T33 E16.4	34	47
T36 E17.2	35	49

#### 5.5.2.3 Beam lay up and strength class

It can be assumed that glued laminated timber fulfils the requirements of a strength class given in table 6 or table 7 if the beam lay-up is in accordance with table 5.

Table 5 – Beam lay-up of glued laminated timber

Homogeneous glued laminated timber		Combined glued laminated timber		
Strength class		Strength class		
lamellas	glued laminated timber	outer lamellas	inner lamellas	glued laminated timber
T14 E11	GL 24h	T18 E12	T11 E9	GL 24c
T18 E12	GL 26h	T21 E13	T14 E11	GL 26c
T21 E13	GL 28h	T24 E14	T18 E12	GL 28c
T24 E14	GL 30h	T27 E14.8	T18 E12	GL 30c
T27 E14.8	GL 32h	T30 E15.6	T21 E13	GL 32c
T30 E15.6	GL 34h	T33 E16.4	T24 E14	GL 34c
T33 E16.4	GL 36h	T36 E17.2	T27 E14.8	GL 36c

Homogeneous glued laminated timber consists of lamellas of the same strength class or strength profile.

For combined glued laminated timber it is assumed that zones of different lamella grades amount to at least 1/6 of the beam depth or two lamellas, whichever is the greater.

The outer lamellas are of a higher strength class or strength profile, the inner part of the cross-section comprises lamellas of a lower strength class or strength profile, see table 5.

Table 6 - Characteristic strength and stiffness properties in N/mm<sup>2</sup> and densities in kg/m<sup>3</sup> (for homogeneous glulam)

Glulam strength class		GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h	GL34h	GL36h
Bending strength	$f_{m,g,k}$	24	26	28	30	32	34	36
Tensile strength	$f_{t,0,g,k}$	20	22	24	26	27	29	30
	$f_{t,90,g,k}$	0,4						
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	27	29	30
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Shear strength (shear and torsion)	$f_{v,g,k}$	3,0						
Rolling shear strength	$f_{r,g,k}$	1,5						
Modulus of elasticity	$E_{0,g,mean}$	11.000	12.000	13.000	14.000	14.800	15.600	16.400
	$E_{90,g,mean}$	300						
Shear-Modulus	$G_{g,mean}$	650						
Rolling shear modulus	$G_{r,g,mean}$	65						
Density	$\rho_{g,k}$	380	420	440	460	470	480	490

Table 7 - Characteristic strength and stiffness properties in N/mm<sup>2</sup> and densities in kg/m<sup>3</sup> (for combined glulam)

Glulam strength class		GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c	GL34c	GL36c
Bending strength	$f_{m,g,k}$	24	26	28	30	32	34	36
Tensile strength	$f_{t,0,g,k}$	22	24	24	26	27	29	30
	$f_{t,90,g,k}$	0,4						
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	22	24	24	26	27	29	30
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Shear strength (shear and torsion)	$f_{v,g,k}$	3,0						
Rolling shear strength	$f_{r,g,k}$	1,5						
Modulus of elasticity	$E_{0,g,mean}$	11.000	12.000	13.000	14.000	14.800	15.600	16.400
	$E_{90,g,mean}$	300						
Shear-Modulus	$G_{g,mean}$	650						
Rolling shear modulus	$G_{r,g,mean}$	65						
Density	$\rho_{g,k}$	350	380	420	420	440	460	470

### 5.5.3 Verifications from calculations based on the properties of the lamellas

#### 5.5.3.1 Properties of the lamellas

If the lamellas comply with one of the relevant grading rules the strength and stiffness properties may be taken from table 3.

If lamellas are used, which do not comply with table 3 of this European standard, the characteristic values of the tensile strength parallel to the grain  $f_{t,0,l,k}$ , the modulus of elasticity parallel to the grain  $E_{0,l,mean}$  and the density  $\rho_{l,k}$  shall be derived from tests according to EN 408 and calculated according to the principles given in EN 384.

#### 5.5.3.2 Strength of finger joints

If the lamellas comply with one of the relevant grading rules the strength of the finger joints may be taken from table 4 or have to be calculated according to 5.5.3.2.

If lamellas are used which do not comply with table 3 of this European standard, the declared strength of finger joints shall be verified by tests in accordance with Annex F.

The finger joints of the lamellas shall fulfil the requirements either given in equation (3) or (4).

$$f_{t,j,k} \geq 16 + 0,53 f_{t,0,l,k} \quad (3)$$

Where:

$f_{t,j,k}$  is the characteristic tensile strength of the finger joint in N/mm<sup>2</sup>;

$f_{t,0,l,k}$  is the characteristic tensile strength of the lamella in N/mm<sup>2</sup>.

$$f_{m,j,k} \geq 22,5 + 0,75 f_{t,0,l,k} \quad (4)$$

Where:

$f_{m,j,k}$  is the characteristic bending strength of the finger joint in N/mm<sup>2</sup>;

$f_{t,0,l,k}$  is the characteristic tensile strength of the lamella in N/mm<sup>2</sup>;

### 5.5.3.3 Calculation of characteristic values for glued laminated timber

The strength and stiffness properties of glued laminated timber shall be calculated from the strength and stiffness properties of the lamellas using the equations given in table 8.

The stress analysis may be carried out by linear elastic beam theory.

The strength verification shall be made at all relevant points of the cross-section.

It is assumed that zones of different lamination grades amount to at least two lamellas.

Table 8 – Characteristic strength and stiffness properties in N/mm<sup>2</sup> and densities in kg/m<sup>3</sup> of glued laminated timber

Property		
Bending strength	$f_{m,g,k}$	$17 + 0,45 f_{t,0,l,k} + 0,004 f_{t,0,l,k}^2$
Tensile strength	$f_{t,0,g,k}$	$0,85 f_{m,g,k}$
	$f_{t,90,g,k}$	$0,40 \text{ N/mm}^2$
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	$0,85 f_{m,g,k}$
	$f_{c,90,g,k}$	$2,5 \text{ N/mm}^2$
Shear strength	$f_{v,g,k}$	$3,0 \text{ N/mm}^2$
	$f_{r,g,k}$	$1,5 \text{ N/mm}^2$
Modulus of elasticity	$E_{0,g,mean}$	$330 + 450 f_{m,g,k}$
	$E_{90,g,mean}$	$300 \text{ N/mm}^2$
Shear modulus	$G_{g,mean}$	$650 \text{ N/mm}^2$
	$G_{r,g,mean}$	$65 \text{ N/mm}^2$
Density	$\rho_{g,k}$	$1,1 \rho_{l,k}^{1)}$
<sup>1)</sup> Where $\rho_{l,k}$ is the density of the lamella having the lowest characteristic value of tensile strength.		

## 5.5.4 Verifications from tests with glued laminated timber

### 5.5.4.1 Properties of the lamellas

Section 5.5.3.1 applies.

### 5.5.4.2 Strength of finger joints

Section 5.5.3.2 applies with the following exception. If lamellas are used, which do not comply with table 3 of this European standard, the declared strength of the finger joints shall be verified by tests in accordance with Annex F.

### 5.5.4.3 Testing of glued laminated timber

A homogenous glued laminated member can be assigned to one of the strength classes given in tables 6 or table 7 or to any other strength profile if its characteristic bending strength parallel to the grain, its modulus of elasticity parallel to the grain and density derived from tests according to Annex G are not less than the declared values.

The other strength and stiffness properties may be assessed using the equations given in table 9.

Table 9 – Assessment of the strength and stiffness properties in  $\text{N/mm}^2$  and the densities in  $\text{kg/m}^3$  for glued laminated timber which have not been derived from tests

Modulus of elasticity	$E_{90,g,\text{mean}}$	= 300 $\text{N/mm}^2$
Shear modulus	$G_{g,\text{mean}}$	= 650 $\text{N/mm}^2$
Tensile strength	$f_{t,0,g,k}$	= 0,85 $f_{m,g,k}$
	$f_{t,90,g,k}$	= 0,40
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	= 0,85 $f_{m,g,k}$
	$f_{c,90,g,k}$	= 2,5 $\text{N/mm}^2$
Shear strength	$f_{v,g,k}$	= 3,0 $\text{N/mm}^2$
	$f_{r,g,k}$	= 1,5 $\text{N/mm}^2$
	$G_{r,g,\text{mean}}$	= 65 $\text{N/mm}^2$
Density	$\rho_{g,k}$	= 1,1 $\rho_{l,k}$ <sup>1)</sup>
<sup>1)</sup> Where $\rho_{l,k}$ is the density of the lamella having the lowest characteristic value of tensile strength.		

## A 7 Vorschlag II für prEN 14080

Alpo Ranta-Maunus 24.3.2008

proposal

5.5.2 Verification from classification of standardised beam lay ups and lamella properties which can be classified into a strength class

### 5.5.2.1 Properties of the lamellas

The lamellas shall comply to strength class given in Table 3. Tension strength  $f_{t,0,l,k}$  and modulus of elasticity  $E_{t,0,l,mean}$  are grade determining properties.

Table 3 – Characteristic strength and stiffness properties in N/mm<sup>2</sup> and densities in kg/m<sup>3</sup> for lamellas for glued laminated timber

Lamella strength class	$f_{t,0,l,k}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,0,l,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho_{l,k}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
T11 E9	11	9.000	320
T15 E11	15	11.000	350
T18 E11.5	18	11.500	360
T21 E12	21	12.000	370
T24 E13	24	13.000	390
T27 E14	27	14.000	410
T30E15	30	15.000	430
T33E16	33	16.000	450

### Note for WG3:

Main motivation of this proposal is to correct too low tension strength values, and obtain more balanced strength-stiffness-density profiles. Grades are based mainly on lamella classes proposed by Blass.

If lower tension strength values (in comparison to E and density) will be used, then variable T-E- $\rho$  combinations need to be adopted such as

T18 E11  $\rho$  350      T21 E12  $\rho$ 370      T24 E13  $\rho$ 390      T27 E14  $\rho$ 410

T18 E11  $\rho$  370      T21 E12  $\rho$ 390      T24 E13  $\rho$ 410      T27 E14  $\rho$ 430

T18 E12  $\rho$  350      T21 E13  $\rho$ 370      T24 E14  $\rho$ 390      T27 E15  $\rho$ 410

T18 E12  $\rho$  370      T21 E13  $\rho$ 390      T24 E14  $\rho$ 410      T27 E15  $\rho$ 430

Brettschichtholz wird seit Jahrzehnten erfolgreich z.B. für anspruchsvolle Tragwerke des Ingenieurholzbaus eingesetzt. Die Biegefestigkeit, vor allem für die Zuverlässigkeit von Brettschichtholzbauteilen relevant, wurde in den 1980er Jahren in Deutschland systematisch erforscht. Seitdem ist Brettschichtholz immer wieder Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Bei einer im Jahre 2005 durchgeführten Forschungsarbeit haben Biegeversuche an Brettschichtholz gezeigt, dass die erwarteten und in Normen als Rechenwerte festgelegten Biegefestigkeiten von den experimentellen Festigkeitswerten abweichen. Das war Auslöser für die vorliegende Arbeit.

Darin wird die charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholz neu modelliert. Erkenntnisse über festigkeitssortierte Bretter, die in den 1980er Jahren noch nicht vorlagen, werden gezielt berücksichtigt. Mithilfe eines neu entwickelten Rechenmodells werden heute eingesetzte Sortierverfahren für Bretter und Biegeversuche an Brettschichtholz simuliert. Mit den numerisch gewonnenen Daten wird ein Festigkeitsmodell für die charakteristische Biegefestigkeit entwickelt. Dieses steht in guter Übereinstimmung mit aktuellen experimentellen Festigkeitswerten.

Mit dem Festigkeitsmodell wird gezeigt, dass die gegenwärtig genormten Anforderungen an Bretter und Keilzinken angehoben werden müssen, um die Nennwerte der charakteristischen Biegefestigkeit zu gewährleisten. Änderungsvorschläge bezüglich der Normung von Brettschichtholz werden in dieser Forschungsarbeit dargelegt.