

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Experimentelle und numerische Untersuchungen der relevanten Einflussgrößen auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholzträgern

Stefan Bedö

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät für Bau Geo und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Chr. Gehlen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. St. Winter
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Kreuzinger (i. R.)
3. Prof. Dr.-Ing. F. Colling  
Hochschule Augsburg

Die Dissertation wurde am 19.09.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfacultät für Bau Geo und Umwelt am 04.02.2014 angenommen.

Leerseite

## **Zusammenfassung**

Die Biegetragfähigkeit von Brettspertholzträgern hängt von einer Vielzahl von unterschiedlichen Eigenschaften (Holz-, Keilzinkenfestigkeit, Größe, etc.) ab. Um die verschiedenen Parameter und deren Einfluss systematisch zu untersuchen, wäre eine enorme Anzahl an Versuchen in Bauteilgröße durchzuführen. Da dies aus Zeit- und Kostengründen jedoch nicht möglich ist, werden die relevanten Einflussgrößen mittels eines eigens hierfür entwickelten Rechenmodells numerisch untersucht. Zur Verifizierung der Simulationsrechnungen wurde eine Vielzahl von Versuchen an Bauteilen durchgeführt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird ein Bemessungsmodell abgeleitet, mit dem es möglich ist, die Biegetragfähigkeit in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen allgemein anzugeben.

## **Abstract**

The bending load bearing capacity of cross-laminated timber is dependent on a multitude of different properties and characteristics (wood quality, finger joint strength, size, etc.). In order to investigate these various parameters and systemically determine their effects, a large number of tests using true component size would be required. Due to time and cost constraints, such tests are not feasible. Instead, for this purpose, a computational model is developed to numerically investigate the relevant determining factors. To assess the computed simulations and prove their validity, several tests of components were performed. As a result of these findings, the derived design model enables the calculation of the bending load bearing capacity of cross-laminated timber beams based on relevant variables.

## Vorwort

Die Vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter für das HTO-Projekt „Neue Holzwerkstoffe“ an der Fachhochschule Augsburg.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger danke ich ganz herzlich für die Übernahme des Hauptreferates und die wertvollen Diskussionen, die den Fortgang der Arbeit begleiteten sowie für die bereitwillige Unterstützung, die er mir stets zukommen ließ. Außerdem möchte ihm ganz besonders dafür danken, dass er bereit war die Bewilligung der Arbeit zu unterstützen, obwohl ich kein abgeschlossenes Universitätsstudium habe, sondern einen Fachhochschulabschluss.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter für die kritische Durchsicht der Arbeit und die freundliche Übernahme des Koreferates sehr herzlich bedanken.

Außerdem möchte ich mich auch ganz besonders bei Herrn Prof. Dr.-Ing. François Colling für genaue durchsicht meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des weiteren Korreferates bedanken. Er hatte stets Zeit für wertvolle Diskussionen, die den Fortschritt dieser Arbeit ebenfalls begleiteten. Ein besonderer Dank gilt ihm auch deshalb, da er mir mit der Mitarbeit an dem Forschungsprojekt erst die Möglichkeit zur Promotion gegeben.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Verlobten Sandra, die mir während der gesamten Zeit viel Geduld und Verständnis entgegengebracht hat.

Großen Dank schulde ich auch meiner Mutter, die mir während der ganzen Zeit viele alltägliche Arbeiten abgenommen hat und mir somit den Rücken für diese Arbeit freigehalten hat.

Bedanken möchte ich mich außerdem noch recht herzlich bei den Diplomanden Daniel Caesar, Hermann Kapfer, Adriana Fuchs sowie meinen Arbeitskollegen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften zu Augsburg, die mir stets ihre Hilfe zukommen ließen.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><u>EINLEITUNG</u></b>	<b>1</b>
1.1	ALLGEMEINES	1
1.2	DER WERKSTOFF BRETTSPERRHOLZ	1
1.3	HERSTELLUNG VON BRETTSPERRHOLZ	3
<b>2</b>	<b><u>DERZEITIGER KENNTNISSTAND UND ZIEL DER ARBEIT</u></b>	<b>4</b>
2.1	SCHNITTGRÖßENERMITTLUNG	5
2.2	BEMESSUNG	7
2.3	BISHERIGE VERSUCHE AN BRETTSPERRHOLZTRÄGERN ZUR ERMITTLUNG DER BIEGEFESTIGKEIT	10
2.4	BISHERIGE ERKENNTNISSE ZU SYSTEM-/VERGÜTUNGSEFFEKTEN	13
2.5	ZIEL DER ARBEIT	14
<b>3</b>	<b><u>DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE</u></b>	<b>16</b>
3.1	BEGRIFFE UND BEZEICHNUNGEN	16
3.2	AUSANGSMATERIAL FÜR DIE VERSUCHE	17
3.3	VORGEHEN ZUR ERMITTLUNG DER STEIFIGKEITS- UND FESTIGKEITSKENNWERTE	17
3.4	BEZEICHNUNGEN FÜR DIE EINZELNEN VERSUCHSREIHEN	18
3.5	VERSUCHE ZUR BIEGEFESTIGKEIT VON BAUTEILEN <u>OHNE KEILZINKENVERBINDUNGEN (1B.B)</u>	22
3.5.1	PRÜFPROGRAMM, PRÜFAUFBAU	22
3.5.2	VERSUCHSERGEBNISSE	24
3.5.3	ERGEBNISSE FÜR DIE VERSCHIEDENEN PARAMETER	26
3.5.4	ZUSAMMENFASSUNG	29
3.6	VERSUCHE ZUR BIEGEFESTIGKEIT VON BAUTEILEN MIT <u>KEILZINKENVERBINDUNGEN (2B.B)</u>	30
3.6.1	PRÜFPROGRAMM, PRÜFAUFBAU	30
3.6.2	VERSUCHSERGEBNISSE	34
3.6.3	ERGEBNISSE FÜR DIE VERSCHIEDENEN PARAMETER	40
3.6.4	ZUSAMMENFASSUNG	44
3.7	VERSUCHE ZUR TRAGFÄHIGKEIT VON KEILZINKENVERBINDUNGEN <u>(3B.B, 3K.B, 3K.Z)</u>	45
3.7.1	PRÜFAUFBAUTEN	45
3.7.2	ERGEBNISSE DER KEILZINKENBIEGEPRÜFUNGEN AN DEN ZU DEN BAUTEILVERSUCHEN ZUGEHÖRIGEN LAMELLEN (3B.B)	46
3.7.3	ERGEBNISSE DER BIEGEPRÜFUNGEN AN SEPARATEN BRETTTERN MIT KEILZINKUNGEN (3K.B)	49
3.7.4	ERGEBNISSE DER ZUGPRÜFUNGEN AN BRETTTERN MIT KEILZINKUNGEN (3K.Z)	50
3.7.5	VERGLEICH DER ERGEBNISSE DER KEILZINKENPRÜFUNGEN	51
3.7.6	ZUSAMMENFASSUNG	55

<b><u>4</u></b>	<b><u>VERGLEICH DER BAUTEIL-FESTIGKEITEN UND KEILZINKEN-FESTIGKEITEN</u></b>	<b>56</b>
4.1	ZUSAMMENFASSUNG DER BISHERIGEN ERGEBNISSE UND ERKENNTNISSE	56
4.1.1	BAUTEILE OHNE KEILZINKENVERBINDUNGEN (1B.B)	56
4.1.2	BAUTEILE MIT KEILZINKENVERBINDUNGEN (2B.B)	57
4.1.3	KEILZINKUNGEN BIEGEPRÜFUNGEN AN DEN ZU DEN BAUTEILVERSUCHEN GEHÖRENDEN BRETTTERN (3B.B)	58
4.1.4	KEILZINKUNGEN ZUGPRÜFUNGEN (3K.B)	59
4.1.5	KEILZINKUNGEN ZUGPRÜFUNGEN (3K.Z)	60
4.2	VERGLEICH DER BAUTEILFESTIGKEITEN OHNE UND MIT KEILZINKUNGEN	61
4.3	VERGLEICH DER FESTIGKEITEN DER BAUTEILE MIT KEILZINKUNGEN MIT DEN KEILZINKEN-BIEGEFESTIGKEITEN	63
4.4	VERGLEICH DER FESTIGKEITEN DER BAUTEILE MIT KEILZINKUNGEN MIT DEN KEILZINKEN-ZUGFESTIGKEITEN	64
<b><u>5</u></b>	<b><u>MECHANISCHES MODELL ZUR BERECHNUNG DER SPANNUNGEN VON BRETTSPERRHOLZTRÄGERN</u></b>	<b>64</b>
5.1	STATISCHES SYSTEM	65
5.2	HERLEITUNG DER DIFFERENTIALGLEICHUNG FÜR EINEN 3-TEILIGEN QUERSCHNITT	67
5.3	ANALYTISCHE LÖSUNG MITTELS SCHUBANALOGIEVERFAHREN	70
5.4	HERLEITUNG DER STEIFIGKEITSMATRIX	70
5.5	VERGLEICH ANALYTISCHE/FE-LÖSUNG	75
5.6	ERLÄUTERUNGEN ZUM VEREINFACHTEN MECHANISCHEN MODELL	77
<b><u>6</u></b>	<b><u>TRAGVERHALTEN VON BRETTSPERRHOLZTRÄGERN MIT BRETTABSCHNITTEN UNTERSCHIEDLICHER STEIFIGKEIT</u></b>	<b>78</b>
6.1	ALLGEMEINES	78
6.2	TRÄGER MIT KONSTANTEN LAGEN-ELASTIZITÄTSMODULN	79
6.2.1	ERGEBNISSE FÜR DEN TRÄGER 1 (QS129)	81
6.2.2	ERGEBNISSE FÜR DEN TRÄGER 3 (QS125-3L)	82
6.2.3	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	82
6.3	TRÄGER MIT NICHT KONSTANTEN LAGEN-ELASTIZITÄTSMODULN	84
6.3.1	ERGEBNISSE FÜR DEN TRÄGER 1 (QS129)	84
6.3.2	ERGEBNISSE FÜR DEN TRÄGER 2 (QS125-3L)	85
6.3.3	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	86
<b><u>7</u></b>	<b><u>PROGRAMM ZUR VORHERSAGE DER BIEGETRAGFÄHIGKEIT VON BRETTSPERRHOLZTRÄGERN</u></b>	<b>88</b>
7.1	SIMULATION DER HOLZEIGENSCHAFTEN	88
7.1.1	ALLGEMEINES	88
7.1.2	HOLZFEUCHTE	88
7.1.3	LAGE DER KEILZINKENVERBINDUNGEN	89
7.1.4	ROHDICHTE	89
7.1.5	ÄSTIGKEIT	89
7.1.6	ERMITTLUNG DES ZELLEN- UND BRETT-ELASTIZITÄTSMODULS	91
7.1.7	ERMITTLUNG DER ZELLEN-FESTIGKEIT	93
7.1.8	KONTROLLE DER SIMULATIONSQUALITÄT	94
7.2	BERÜCKSICHTIGUNG DES BRUCHVERHALTENS VON BRETTSPERRHOLZTRÄGERN	97

7.2.1	ALLGEMEINES	97
7.2.2	NICHTLINEARES TRAGVERHALTEN UNTER DRUCKBEANSPRUCHUNG	98
7.2.3	AUSFALL EINES ELEMENTS IM ZUGBEREICH	99
7.2.4	VERSAGENSKRITERIEN	100
<b>8</b>	<b><u>VERGLEICH DER SIMULATIONSWERTE MIT VERSUCHSWERTEN</u></b>	<b>103</b>
<b>8.1</b>	<b>VERGLEICH SIMULATIONSWERTE MIT VERSUCHSWERTEN AUS ABSCHNITT 3.5 UND 3.6</b>	<b>104</b>
8.1.1	TRÄGER OHNE KEILZINKENVERBINDUNGEN	104
8.1.2	TRÄGER MIT KEILZINKENVERBINDUNGEN	105
<b>8.2</b>	<b>VERGLEICH SIMULATIONSWERTE MIT VERSUCHSWERTEN AUS [46] UND [47]</b>	<b>108</b>
8.2.1	TRÄGER OHNE KEILZINKENVERBINDUNGEN	108
8.2.2	TRÄGER MIT KEILZINKENVERBINDUNGEN	110
<b>8.3</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>111</b>
<b>9</b>	<b><u>BESTIMMUNG DER FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN DER „MATERIALIEN“ HOLZ UND KEILZINKENVERBINDUNGEN</u></b>	<b>111</b>
<b>9.1</b>	<b>TRAGFÄHIGKEIT DER TRÄGER MIT HOLZVERSAGEN („MATERIAL“ HOLZ)</b>	<b>113</b>
9.1.1	ALLGEMEINES	113
9.1.2	STANDARD-TRÄGER – EINFLUSS DER HOLZEIGENSCHAFTEN	114
9.1.3	EINFLUSS DER TRÄGERGRÖÖE UND DER BELASTUNGSART	119
<b>9.2</b>	<b>TRAGFÄHIGKEIT DER TRÄGER MIT KEILZINKENVERSAGEN</b>	<b>127</b>
9.2.1	ALLGEMEINES	127
9.2.2	EINFLUSS DER KEILZINKENZUGFESTIGKEIT	128
9.2.3	EINFLUSS DER TRÄGERLÄNGE	129
9.2.4	EINFLUSS DER BELASTUNGSART	137
9.2.5	EINFLUSS DER TRÄGERBREITE	144
9.2.6	ZUGFESTIGKEIT DER KEILZINKENVERBINDUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN HOLZEIGENSCHAFTEN	151
<b>9.3</b>	<b>ZUSAMMENSTELLUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE</b>	<b>152</b>
9.3.1	TRÄGER MIT HOLZVERSAGEN	152
9.3.2	TRÄGER MIT KEILZINKENVERSAGEN	153
<b>10</b>	<b><u>THEORETISCHES MODELL ZUR ERMITTLUNG DER BIEGEFESTIGKEIT VON BRETTSPERRHOLZ</u></b>	<b>155</b>
<b>10.1</b>	<b>AUFTEILUNG DES ENDPRODUKTES BRETTSPERRHOLZ IN DIE BEIDEN „MATERIALIEN“ KEILZINKENVERBINDUNGEN UND HOLZ</b>	<b>156</b>
<b>10.2</b>	<b>BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEIT VON BRETTSPERRHOLZTRÄGERN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN FESTIGKEITSEIGENSCHAFTEN DER BEIDEN „MATERIALIEN“ HOLZ UND KEILZINKENVERBINDUNGEN</b>	<b>157</b>
<b>10.3</b>	<b>BESTIMMUNG DER AUFTRETENSHÄUFIGKEIT EINER BESTIMMTEN VERSAGENSART</b>	<b>159</b>
<b>10.4</b>	<b>ZAHLENBEISPIEL</b>	<b>160</b>
<b>11</b>	<b><u>BEMESSUNGSVORSCHLAG</u></b>	<b>161</b>
<b>11.1</b>	<b>TRAGFÄHIGKEIT DES STANDARDBRETTSPERRHOLZTRÄGERS</b>	<b>161</b>
<b>11.2</b>	<b>EINFLUSSPARAMETER FÜR BELIEBIGE BRETTSPERRHOLZTRÄGER</b>	<b>162</b>
<b>11.3</b>	<b>ANFORDERUNGEN AN DIE KEILZINKENFESTIGKEIT</b>	<b>164</b>
<b>11.4</b>	<b>ERMITTLUNG DER RELEVANTEN BEMESSUNGSSPANNUNG</b>	<b>166</b>

<b><u>12</u></b>	<b><u>ZUSAMMENFASSUNG</u></b>	<b>167</b>
<b><u>13</u></b>	<b><u>LITERATURVERZEICHNIS</u></b>	<b>170</b>
<b><u>14</u></b>	<b><u>NORMENVERZEICHNIS</u></b>	<b>174</b>
<b><u>15</u></b>	<b><u>ZULASSUNGSVERZEICHNIS</u></b>	<b>175</b>
<b><u>16</u></b>	<b><u>TABELLENVERZEICHNIS</u></b>	<b>176</b>
<b><u>17</u></b>	<b><u>DIAGRAMMVERZEICHNIS</u></b>	<b>180</b>
<b><u>18</u></b>	<b><u>BILDVERZEICHNIS</u></b>	<b>186</b>
<b><u>ANHANG A</u></b>	<b><u>ERGÄNZENDE AUSFÜHRUNGEN ZUM ABSCHNITT 5</u></b>	<b>188</b>
<b>ANHANG A.1</b>	<b>KOEFFIZIENTENMATRIX A FÜR DEN DREITEILIGEN QUERSCHNITT</b>	<b>188</b>
<b>ANHANG A.2</b>	<b>„MAPLE WORKSHEET“ ZUM ABSCHNITT 5.3</b>	<b>189</b>
<b>ANHANG A.3</b>	<b>UNTERMATRIZEN DER KOEFFIZIENTENMATRIX A</b>	<b>192</b>
<b><u>ANHANG B</u></b>	<b><u>ERWEITERTE ERGEBNISSE ZU DEN BAUTEILVERSUCHEN OHNE KEILZINKENVERBINDUNGEN (1B.B)</u></b>	<b>193</b>
<b>ANHANG B.1</b>	<b>ERGEBNISSE DER ROHDICHTEBESTIMMUNG</b>	<b>193</b>
<b>ANHANG B.2</b>	<b>ERGEBNISSE DER STEIFIGKEITSBETRACHTUNGEN</b>	<b>195</b>
<b>ANHANG B.2.1</b>	<b>ALLGEMEIN</b>	<b>195</b>
<b>ANHANG B.2.2</b>	<b>EINFLUSS DER „SORTIERUNG“</b>	<b>198</b>
<b>ANHANG B.2.3</b>	<b>EINFLUSS DES „QUERSCHNITTS“</b>	<b>199</b>
<b>ANHANG B.2.4</b>	<b>EINFLUSS DER „BREITE“</b>	<b>199</b>
<b>ANHANG B.3</b>	<b>ERGEBNISSE DER FESTIGKEITSBERECHNUNGEN</b>	<b>200</b>
<b>ANHANG B.3.1</b>	<b>ERGEBNISSE OHNE BERÜCKSICHTIGUNG DER „AUSREIßER“</b>	<b>200</b>
<b><u>ANHANG C</u></b>	<b><u>ERWEITERTE ERGEBNISSE ZU DEN BAUTEILVERSUCHEN MIT KEILZINKENVERBINDUNGEN (2B.B)</u></b>	<b>205</b>
<b>ANHANG C.1</b>	<b>ERGEBNISSE DER ROHDICHTEBESTIMMUNG</b>	<b>205</b>
<b>ANHANG C.2</b>	<b>ERGEBNISSE DER STEIFIGKEITSBETRACHTUNGEN</b>	<b>207</b>
<b>ANHANG C.2.1</b>	<b>ALLGEMEIN</b>	<b>207</b>
<b>ANHANG C.2.2</b>	<b>EINFLUSS DER „SORTIERUNG“</b>	<b>209</b>
<b>ANHANG C.2.3</b>	<b>EINFLUSS DES „QUERSCHNITTS“</b>	<b>209</b>
<b>ANHANG C.2.4</b>	<b>EINFLUSS DER „BREITE“</b>	<b>209</b>
<b>ANHANG C.2.5</b>	<b>EINFLUSS DER „KEILZINKUNG“</b>	<b>210</b>
<b>ANHANG C.3</b>	<b>ERGEBNISSE DER FESTIGKEITSBERECHNUNGEN</b>	<b>210</b>
<b>ANHANG C.3.1</b>	<b>ANMERKUNGEN ZU DEN ERGEBNISSEN NACH DEN VERSCHIEDENEN BERECHNUNGSMETHODEN</b>	<b>210</b>
<b>ANHANG C.3.2</b>	<b>ERGEBNISSE OHNE BERÜCKSICHTIGUNG DER „AUSREIßER“ UND EINZELNER „EXTREMWERTE“</b>	<b>212</b>
<b><u>ANHANG D</u></b>	<b><u>ERWEITERTE ERGEBNISSE ZU DEN TRAGFÄHIGKEITEN DER KEILZINKENVERBINDUNGEN (3B.B, 3K.B, 3K.Z)</u></b>	<b>215</b>

---

<b>ANHANG D.1</b>	<b>VERSUCHSREIHE 3B.B</b>	<b>215</b>
ANHANG D.1.1	ERGEBNISSE DER ROHDICHTEBESTIMMUNG	215
ANHANG D.1.2	ERGEBNISSE DER FESTIGKEITSBERECHNUNGEN	216
<b>ANHANG D.2</b>	<b>VERSUCHSREIHE 3K.B</b>	<b>217</b>
ANHANG D.2.1	ERGEBNISSE DER ROHDICHTEBESTIMMUNG	217
ANHANG D.2.2	ERGEBNISSE DER FESTIGKEITSBERECHNUNGEN	218
<b>ANHANG D.3</b>	<b>VERSUCHSREIHE 3K.Z</b>	<b>219</b>
ANHANG D.3.1	ERGEBNISSE DER ROHDICHTEBESTIMMUNG	219
ANHANG D.3.2	ERGEBNISSE DER FESTIGKEITSBERECHNUNGEN	220
<b><u>ANHANG E</u></b>	<b><u>MESSWERTE DER EINZELNEN VERSUCHSREIHEN</u></b>	<b><u>221</u></b>
<b>ANHANG E.1</b>	<b>HOLZFEUCHTEN, ROHDICHTEN UND PRÜFKRÄFTE DER VERSUCHSSERIE 1B.B</b>	<b>221</b>
<b>ANHANG E.2</b>	<b>HOLZFEUCHTEN, ROHDICHTEN UND PRÜFKRÄFTE DER VERSUCHSSERIE 2B.B</b>	<b>224</b>
<b>ANHANG E.3</b>	<b>HOLZFEUCHTEN, ROHDICHTEN UND PRÜFKRÄFTE DER VERSUCHSSERIE 3B.B</b>	<b>226</b>
<b>ANHANG E.4</b>	<b>HOLZFEUCHTEN, ROHDICHTEN UND PRÜFKRÄFTE DER VERSUCHSSERIE 3K.B</b>	<b>227</b>
<b>ANHANG E.5</b>	<b>HOLZFEUCHTEN, ROHDICHTEN UND PRÜFKRÄFTE DER VERSUCHSSERIE 3K.Z</b>	<b>228</b>
<b><u>ANHANG F</u></b>	<b><u>ZUSÄTZLICHE TABELLEN UND DIAGRAMME ZU DEN VERSUCHSSERIEN</u></b>	<b><u>229</u></b>
<b>ANHANG F.1</b>	<b>TABELLEN UND DIAGRAMME DER VERSUCHSSERIE 1B.B</b>	<b>229</b>
<b>ANHANG F.2</b>	<b>TABELLEN UND DIAGRAMME DER VERSUCHSSERIE 2B.B</b>	<b>242</b>
<b>ANHANG F.3</b>	<b>TABELLEN UND DIAGRAMME DER VERSUCHSSERIE 3B.B</b>	<b>257</b>
<b>ANHANG F.4</b>	<b>TABELLEN UND DIAGRAMME DER VERSUCHSSERIE 3K.B</b>	<b>261</b>
<b>ANHANG F.5</b>	<b>TABELLEN UND DIAGRAMME DER VERSUCHSSERIE 3K.Z</b>	<b>263</b>

Leerseite

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

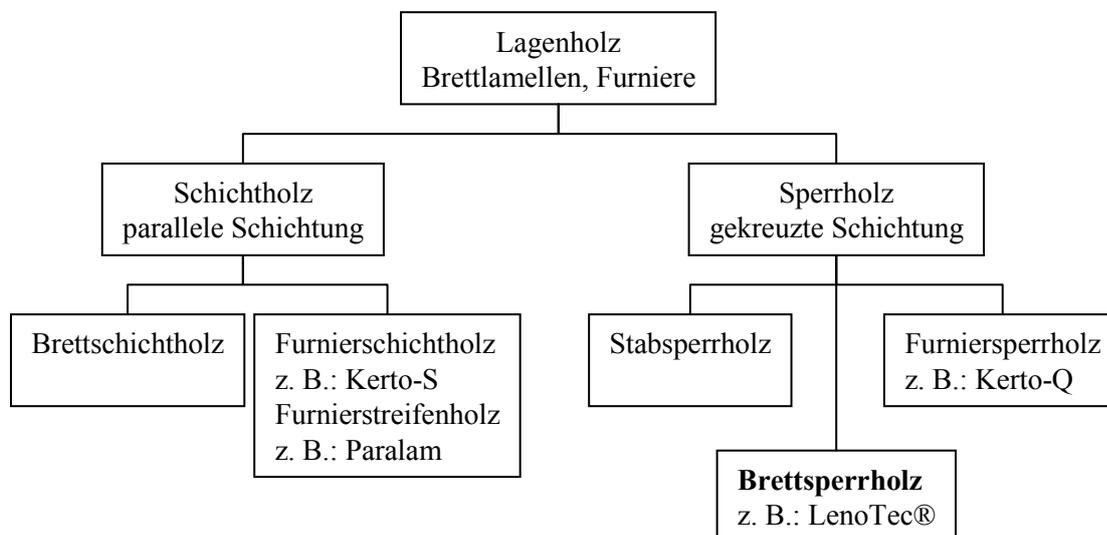
Mit dem Rohstoff Holz steht dem Menschen seit jeher ein äußerst leistungsfähiger und leicht zu verarbeitender natürlich gewachsener Werkstoff zur Verfügung. Wachstumsbedingt ist Holz von Natur aus ein stabförmiges Bauteil, das von seinen Abmessungen begrenzt ist. Über Jahrhunderte wurde der Mensch durch die Abmessungen des Einzelbaumes in seinem Drang nach dem maximal möglichen begrenzt.

Durch das natürliche Wachstum unterscheiden sich die Materialeigenschaften einer Baumart je nach Standort sowie den vorherrschenden Wachstumsbedingungen. Innerhalb eines Baumes werden die Materialschwankungen durch Äste und unterschiedlichen Jahrringbreiten verursacht.

Neben den baumspezifischen Besonderheiten wie Wuchs, Ästigkeit und von der Rohdichte abhängende Festigkeit sind für den Werkstoff Holz auch die feuchtigkeitsbedingten Formänderungen durch Schwinden und Quellen charakteristisch.

Die Intention, größere Bauteile herzustellen und die holzspezifischen Eigenschaften zu eliminieren, machte es erforderlich das Ausgangsprodukt Holz zu zerkleinern, um es anschließend wieder zu größeren Bauteilen zusammen zu fügen. So lässt sich die Herstellung dünner Bretter und deren Weiterverarbeitung bis in die Zeit 2000 v. Chr. zurückverfolgen. Bereits den Ägyptern war die Herstellung von Sperrholz bekannt.

Die erste industrielle Produktion der Holzwerkstoffe begann um 1900 herum. Seit dieser Zeit hat sich eine Vielzahl der verschiedensten Holzwerkstoffe entwickelt. Eine Gruppe der Holzwerkstoffe stellen die Lagenhölzer da. Bild 1-1 gibt einen Überblick über die heute vorhandenen Arten von Lagenhölzern.



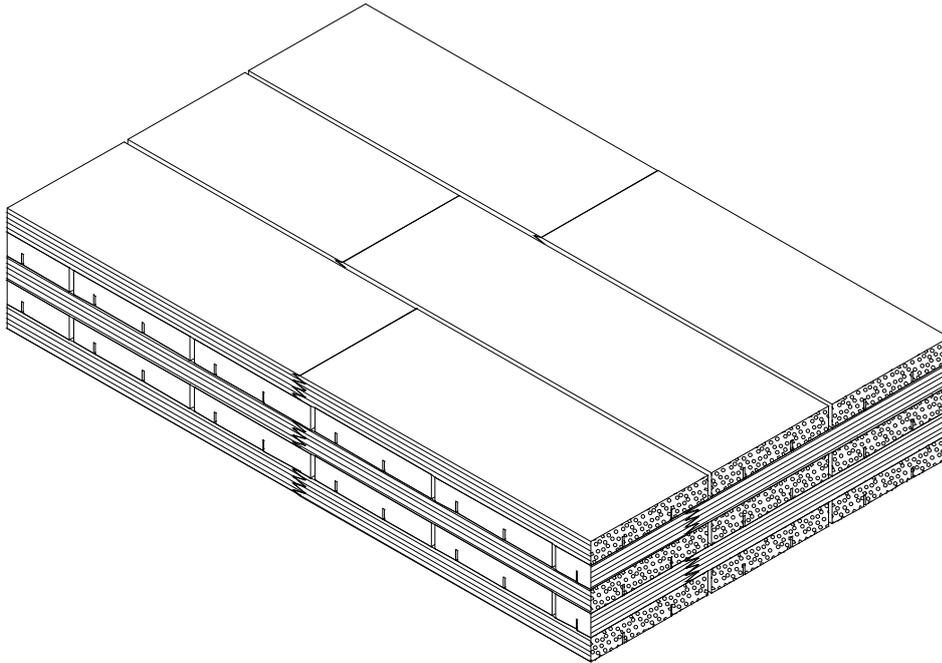
**Bild 1-1** Gliederung der Lagenhölzer

## 1.2 Der Werkstoff Brettsperrholz

Brettsperrhölzer bestehen aus einfachen, nach DIN 4074 gütesortierten Vollholzbrettern, die kreuzweise miteinander verklebt werden und aus mindestens drei Lagen bestehen. Für die Herstellung kann günstiges Ausgangsmaterial, wie z. B. Kürzungsware verwendet werden, welches mittels Keilzinkenverbindung wieder zu einer Endloslamelle zusammengefügt werden kann. Durch das Verkleben der einzelnen Bretter entsteht ein zusammengesetzter, flächiger Querschnitt ohne nachgiebigen Verbund. Der prinzipielle Aufbau von Brettsperrholz ist in Bild 1-2 dargestellt.

Mit der kreuzweisen Verklebung der Einzelbretter können flächige Holzbauteile gefertigt werden, die auch eine zweiachsige Lastabtragung ermöglichen. Bauteilabmessungen mit einer Breite bis zu 4,80 m und einer Länge bis zu 20 m sowie einer Dicke bis zu 300 mm sind mit diesem Werkstoff ohne Probleme herzustellen. Bei der Firma Finnforest Merk sind auf Anfrage sogar Bauteile mit einer Länge bis zu 30 m und einer Gesamtdicke von 500 mm möglich. Neben den großen Abmessungen können auch einfach, zweifach oder mehrfach gekrümmte, flächige Bauteile hergestellt werden. Dem Baustoff Holz bieten sich hierdurch völlig neue Möglichkeiten.

Im Bereich des Holzbaus werden derartige großflächige Platten sowohl im Wohnungsbau als auch bei mehrgeschossigen Wohngebäuden, Hallen, sonstigen Objektbauten und darüber hinaus auch bei Brücken verwendet.



**Bild 1-2    Prinzipieller Aufbau einer Brettsperrholzplatte**

Die großen Bauteilabmessungen erlauben ein wirtschaftliches Bauen, durch kurze Bauzeiten aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades. Eine Anpassung an individuelle Wünsche, wie z. B. Türen, Fenster, Elektrokanäle usw. ist mit der präzisen CNC-Abbundtechnik kein Problem. Zusätzliche Aussteifungsmaßnahmen sind nicht erforderlich, da die Bauteile selbst als Aussteifung genutzt werden können. Neben der tragenden Funktion bilden die Scheiben und Platten gleichzeitig den Raumabschluss.

Die großen Schwind- und Quellverformung in Querrichtung der Bretter wird durch ihre kreuzweise Verklebung behindert. Es treten lediglich Verformungen in Längsrichtungen der Bretter auf, da diese jedoch äußerst gering sind, sind Brettsperrholzplatten nahezu formstabil. Finnforest Merk gibt als Größenordnung für die Formänderung in Plattenebene 1 mm auf 10 m Elementlänge bei 1% Holzfeuchteänderung an. Dies entspricht einer prozentualen Längenänderung von 0,01% je Prozent Änderung der Holzfeuchte. Die prozentuale Längenänderung einer vergleichbaren Vollholzplatte ist etwa um das 24fache größer.

Der besondere Aufbau der Brettsperrhölzer, d. h. die kreuzweise miteinander verklebten Bretter, macht es erforderlich, dies bei der Berechnung zu berücksichtigen. Neben der Anisotropie des Holzes ergibt sich durch den Aufbau auch noch eine konstruktive Anisotropie. Im Folgenden soll nur ein grober Überblick über die Besonderheiten der konstruktiven Anisotropie gegeben werden, die bei der Berechnung von Brettsperrhölzern zu beachten sind.

Betrachtet man die Spannungen im inneren eines Bauteils infolge äußerer Belastungen, so ergeben sich aufgrund der kreuzweise angeordneten Bretter unterschiedliche Spannungsverteilungen in den einzelnen Schichten. Dies hängt mit den unterschiedlichen Elastizitäts- und Schubmodulen der einzelnen Schichten in Richtung der betrachteten Spannung zusammen.

Da Holz von Natur aus ein längliches Bauteil ist, wurde es in der Vergangenheit hauptsächlich als stabförmiges Tragglied verwendet. Mit der Entwicklung der gekreuzt zusammengesetzten Holzstrukturen aus einzelnen Brettern, wurde man auf das Phänomen „Rollschub“ aufmerksam. Holz besitzt einen röhrenförmigen Aufbau, den man sich auch stark vereinfacht als ein Bündel Strohhalme vorstellen kann. Infolge der Querkraftbeanspruchung treten in der Platte Schubspannungen auf, die in Richtung der Fasern sowie quer dazu verlaufen. Dadurch werden die Faserbündel quer zur Längsachse der Fasern durch Schubspannungen belastet, wodurch die Fasern übereinander rollen können. Dies wird als Rollschub (rolling shear) bezeichnet. Da die Schubsteifigkeit senkrecht zur Faser nur 1/10 derer in Richtung der Faser beträgt (siehe DIN 1052 [N1]), muss bei derartigen Konstruktionen die Verformung infolge Querkraft bei einem Stützweitenverhältnis von  $L/D \leq 30$  berücksichtigt werden.

Angaben über die Berechnung und Bemessung von Brettsperrholz enthält zwar die DIN 1052 [N1], ihre Verwendung ist jedoch nicht normativ geregelt, sondern verlangt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.

Bei Beanspruchungen rechtwinklig zur Plattenebene (Plattenbiegung) sehen sowohl die DIN als auch die Zulassungen für die Bemessung vor, dass die auftretenden Spannungen jeder einzelnen Lage mit ihren charakteristischen Festigkeiten verglichen werden. Vergütungseffekte werden bei dieser Art von Bemessung nicht berücksichtigt, wodurch sich geringere rechnerische Tragfähigkeiten im Vergleich zu versuchstechnisch ermittelten Werten ergeben.

Darüber hinaus gibt es auch noch kein Bemessungskonzept, mit dessen Hilfe in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen die charakteristische Biegefestigkeit von beliebig aufgebauten Brettsperrholzträgern ermittelt werden kann.

Neben experimentellen Untersuchungen zur Biegetragfähigkeit von Brettsperrholz werden im Rahmen dieser Arbeit auch die verschiedenen Einflussgrößen numerisch untersucht. Außerdem werden noch Betrachtungen und Versuche zur Rollschubfestigkeit von Brettsperrträgern durchgeführt. Dies scheint insbesondere erforderlich, da in den einzelnen Zulassungen (siehe z.B. [Z1], [Z2], [Z3]) sich bezüglich der charakteristischen Rollschubfestigkeiten unterschiedliche Werte finden, die sich auch vom Wert in der DIN 1052 [N1] unterscheiden.

## 1.3 Herstellung von Brettsperrholz

Bei Brettsperrhölzern handelt es sich um relativ neue Bauprodukte, die über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen geregelt werden. Die Brettsperrhölzer der einzelnen Firmen unterscheiden sich nicht nur im Aufbau und den Eigenschaften sondern auch in der Herstellungsweise. Der prinzipielle Fertigungsablauf von Brettsperrhölzern wird exemplarisch für Merk-Dickholz® der Firma Finncor Forest Merk beschrieben.

Für die Herstellung von Merk-Dickholz® werden ausschließlich technisch getrocknete Hölzer, mit einer Holzfeuchte von  $(12 \pm 3)\%$ , verwendet. Die technisch getrocknete Rohware wird in Stapeln im so genannten *Vorlaufleger* in einer klimatisierten Halle für die Produktion bereitgestellt. Je nach Bedarf des erforderlichen Brettmaterials, werden die benötigten Brettstapel über einen Fördermechanismus zur *Entstapelungsanlage* gebracht. Hier werden die Bretter mittels eines Vakuumhebers von den Stapeln genommen und der eigentlichen Produktion zugeführt. Im Anschluss wird automatisch die Holzfeuchte jedes einzelnen Bretts gemessen und in einer Datenbank gespeichert. Liegt die Holzfeuchte der Bretter außerhalb des Toleranzbereiches, werden diese aussortiert und nochmals einer technischen Trocknung unterzogen.

Nach der Kontrolle der Holzfeuchte wird mittels eines Lasers die Lage der Bretter überprüft, da dies für die weitere Produktion berücksichtigt werden muss. Mit der technischen Trocknung kann zwar eine konstante und gleichmäßige Holzfeuchte aller Bretter für die Produktion gewährleistet werden, jedoch sind damit auch feuchtebedingte Verformungen verbunden, die in Abhängigkeit der Einschnittart der Bretter unterschiedliche Querschnittsformen (siehe z.B. COLLING [17]) ergeben.

Im nächsten Arbeitsschritt werden die Bretter visuell, nach den Kriterien der Sortierklasse S10 sortiert. Bretter, die über ihre gesamte Länge eine geringere Qualität aufweisen werden aussortiert. Bei Brettern mit nur bereichsweise schlechter Güte, werden diese von einem Mitarbeiter markiert, die

anschließend von einer Säge automatisch herausgeschnitten werden. Damit können auch Bretter verwendet werden, die nur stellenweise ungeeignet sind, wodurch ein sehr hoher Anteil der Rohware in die Produktion fließen kann und nur wenig „Ausschuss“ entsteht.

Als nächstes werden die Keilzinkenprofile in die Stirnseiten der Bretter gefräst. Anders, als bei der Herstellung der Keilzinkenprofile von Brettschichtholzlamellen, können hier auch Bretter mit sehr unterschiedlichen Längen verwendet werden. Dies wird dadurch ermöglicht, dass das Keilzinkenprofil in jedes Brett einzeln gefräst wird und nicht Paketweise. Durch diesen Produktionsablauf werden die einzelnen Bretter der Merk-Dickholz® Elemente mittels liegenden Keilzinkenprofils direkt nach dem Klebstoffauftrag zu einer Endloslamelle zusammengefügt. Im nächsten Arbeitsgang wird sie in einem Schritt auf die erforderliche Dicke und Breite gehobelt. Danach wird die Lamelle mit Längsverlaufenden Entlastungsnuten versehen.

Mittels einer Flug-Kapp-Säge werden dann von der Endloslamelle die notwendigen Brettlängen automatisch heruntergeschnitten. Diese werden für jede einzelne Schicht stapelweise im so genannten Zwischenlager solange gelagert, bis die Hölzer ohne Gefahr für die Festigkeit der Zinkenverbindung weiterverarbeitet werden können (siehe DIN 68140-1 [N3]).

Nachdem die Bretter ausreichend lange im Zwischenlager ausgehärtet sind, werden die Lamellen der einzelnen Schichten auf dem Pressbett verlegt. Die Bretter der Längslagen – in Richtung der Hauptspannrichtung – werden in der Regel von Hand ausgelegt, wohingegen die der Querlagen mit dem Leimwagen automatisch verteilt werden. Aufgetragen wird der Kleber mit dem so genannten Leimschlitten, nachdem eine Lage fertig ausgelegt ist. Für die restlichen Schichten wird in gleicher Weise verfahren.

Sobald alle Lagen des Querschnitts auf dem Pressbett ausgelegt sind, wird der „Deckel“ aufgesetzt und zu den Vakuumpumpen transportiert, wo die eingeschlossene Luft herausgesaugt wird. Durch den Unterdruck werden die einzelnen Lagen durch den außen anliegenden Luftdruck zusammengepresst. Der Unterdruck wird solange aufrechterhalten, bis der Klebstoff vollständig ausgehärtet ist.

Nach dem Verkleben und Aushärten werden die einzelnen Bauteile zum Abbund gebracht, wo die erforderlich Bearbeitung für Fensterausschnitte, Türöffnungen, Bohrungen, Schlitzte etc. durchgeführt werden. Danach ist das Merk-Dickholz® Element fertig für den Abtransport.

## 2 Derzeitiger Kenntnisstand und Ziel der Arbeit

Holz wird von jeher als leistungsfähiger Baustoff eingesetzt. Wachstumsbedingt ist Holz jedoch von Natur aus ein stabförmiges Bauteil mit einem relativ einfachen Tragverhalten, das mit den bekannten und gängigen Methoden der technischen Biegelehre (Balkentheorie) zutreffend beschrieben werden kann. Die verschiedenen Eigenschaften von Vollhölzern (z. B. Rohdichte, Elastizitätskennzahlen, Festigkeiten etc.) wurden in zahlreichen Untersuchungen eingehend ermittelt und verifiziert.

Die Brettsperrholzbauweise ist hingegen noch eine vergleichsweise junge Bauweise, über die man bisher noch relativ wenig weiß. Aufgrund des schichtenartigen Aufbaus sowie der konstruktiven Anisotropie, bedingt durch die Querlagen, weisen Brettsperrholzträger im Vergleich zu einem Vollholzträger ein wesentlich komplizierteres Tragverhalten auf. Bezüglich der Tragfähigkeit von Brettsperrholzträgern in Abhängigkeit der festigkeitsrelevanten Einflussgrößen gibt es bislang noch sehr wenige Erkenntnisse.

Die überwiegende Zahl der Arbeiten, die sich mit mehrschichtigen Platten aus Massivholz beschäftigen, zeigen lediglich verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung der Schnittgrößen auf. Untersuchungen zur Festigkeit von Brettsperrhölzern gibt es hingegen sehr wenige. Der aktuelle Abschnitt soll zunächst einen Überblick über die verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten von Brettsperrhölzern geben. Anschließend werden noch die Ergebnisse bisheriger Versuche an Brettsperrhölzern dargelegt.

Sämtliche nachfolgende Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf einen Träger/Balken mit der Gesamtbreite  $B$  unter einachsiger Beanspruchung in der  $xz$ -Ebene (Biegung um die  $y$ -Achse). Daher wird auf eine Indizierung für die verschiedenen Ebenen ( $xz/yz$ -Ebene) verzichtet.

## 2.1 Schnittgrößenermittlung

### Verbundtheorie

Nach der DIN 1052 [N1] können die Schnittgrößen von Flächen aus zusammengeklebten Schichten (z. B. Brettsperrholz) nach der Verbundtheorie mit starrem Verbund unter Berücksichtigung der Schubverformung berechnet werden. Hierzu werden zunächst die netto (effektive) Biegesteifigkeit  $B_n$  sowie die Schubsteifigkeit  $S$  unter Berücksichtigung des Querschnittsaufbaus nach Glg. 2-1 und Glg. 2-2 ermittelt. Die Netto-Biegesteifigkeit  $B_n$  setzt sich hierbei aus zwei Anteilen, der Eigenbiegesteifigkeit und den Steineranteilen der Biegesteifigkeit der einzelnen Lagen zusammen. Die Schubsteifigkeit  $S$  kann näherungsweise über Verformungsbetrachtungen ermittelt werden (siehe SCHOLZ [49]).

$$B_n = B_E + B_S = \sum_{i=1}^n B_{E,i} + \sum_{i=1}^n B_{S,i} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot B \cdot I_i + \sum_{i=1}^n E_i \cdot B \cdot d_i \cdot z_i^2 \quad \text{Glg. 2-1}$$

$$S = \frac{1}{B \cdot a^2} \cdot \left( \frac{d_1}{2 \cdot G_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{d_i}{G_i} + \frac{d_n}{2 \cdot G_n} \right) \quad \text{Glg. 2-2}$$

Hierin bedeuten:

- $B_n$  = netto (effektive) Biegesteifigkeit
- $B_E$  = Summe der Eigenbiegesteifigkeiten aus den einzelnen Lagen
- $B_S$  = Summe der Biegesteifigkeiten aus den Steineranteilen der einzelnen Lagen

Mit diesen Steifigkeitskennwerten können dann die Verformungen und Schnittgrößen, wie für einen Träger mit Vollquerschnitt nach der Balkentheorie unter Berücksichtigung der Schubverformung ermittelt werden. Die Längs- und Schubspannungen im Träger können dann ebenfalls mit den bekannten Formeln der technischen Biegelehre wie folgt ermittelt werden:

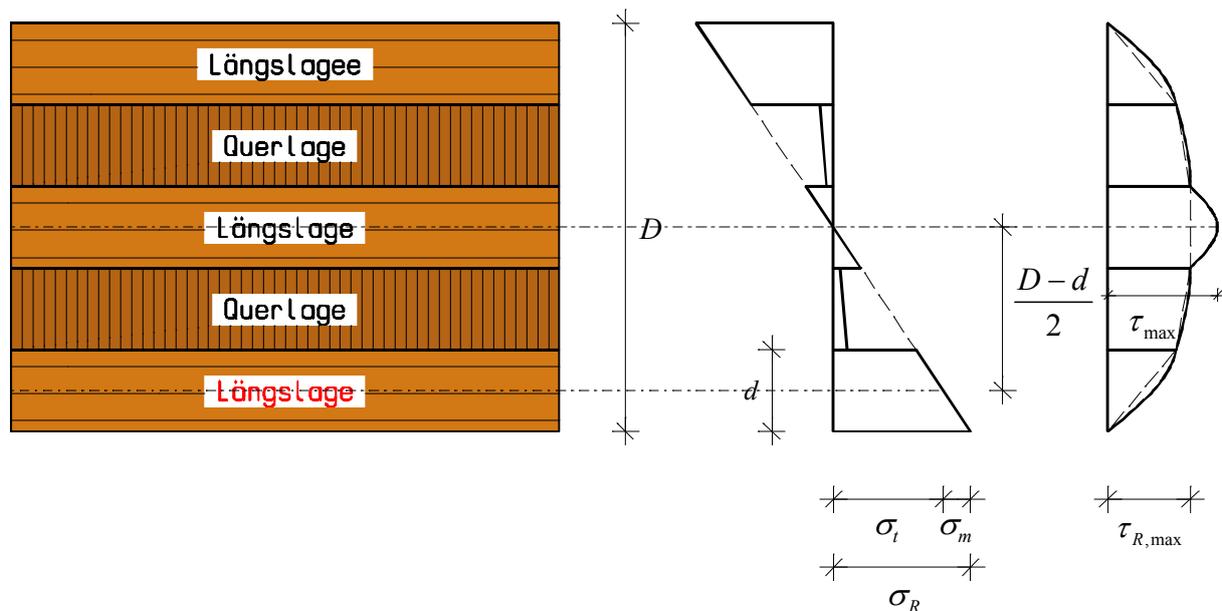
$$\sigma_i(z) = \frac{M}{B_n} \cdot E_i \cdot z_{0,i} \quad \text{Glg. 2-3}$$

$$\tau_i(z) = \frac{Q \cdot ES_i}{B_n} \cdot z_{0,i} \quad \text{Glg. 2-4}$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_i(z)$  = Biegespannung in der i-ten Lage im Abstand  $z$  vom elastischen Schwerpunkt
- $M$  = Biegemoment
- $B_n$  = netto Biegesteifigkeit des Querschnitts (unter Berücksichtigung des Querschnittsaufbaus)
- $E_i$  = Elastizitätsmodul der i-ten Lage
- $z_{0,i}$  = Abstand des Schwerpunkts der Lage  $i$  vom elastischen Schwerpunkt
- $\tau_i$  = Schubspannung in der i-ten Lage im Abstand  $z$  vom elastischen Schwerpunkt
- $Q$  = Querkraft
- $ES_i$  = Statisches Moment

Für einen fünfteiligen Brettsperrholzquerschnitt sind der Normalspannungsverlauf und der Schubspannungsverlauf über die Querschnittshöhe exemplarisch in Bild 2-1 dargestellt.



**Bild 2-1** Exemplarischer Verlauf der Normal- und Schubspannungen über die Querschnittshöhe für einen fünfteiligen Brettsperrholzquerschnitt (Annahme: Elastizitätsmodul der Querlagen  $E_{90} \neq 0$ )

Die Ermittlung der Schnittgrößen- und Spannungen nach Verbundtheorie unter Berücksichtigung der Schubverformung stellt lediglich eine Näherungslösung dar, die für die meisten baupraktischen Anwendungen jedoch ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

### Schubanalogie-Verfahren

Mit dem von KREUZINGER entwickelten Schubanalogie-Verfahren (siehe z. B. HARTMANN [35] und SCHOLZ [49]) können Träger mit nachgiebigem Verbund (z. B. Holz-Beton-Verbund) oder auch Brettsperrholzträger unter Berücksichtigung der Schubweichheit berechnet werden. Der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Verformungen und Schnittgröße nicht nur auf analytischem Weg ermittelt werden können, sondern auch mit gängigen Stabwerksprogrammen, die Schubverformungen berücksichtigen können. Systeme mit beliebigen Randbedingungen und Lastkonstellationen können damit effektiv und problemlos ohne Spezialsoftware berechnet werden.

Der Grundgedanke des Schubanalogie-Verfahrens besteht darin, den tatsächlichen Querschnitt in einen zwei- bzw. dreiteiligen ideellen Modellquerschnitt zu transformieren, für den das eigentliche Tragsystem geniert wird und an dem dann die Schnittgrößen berechnet werden. Den einzelnen Teilquerschnitten des ideellen Querschnittes - im Weiteren auch „Ebenen“ (A, B und C) genannt - werden hierzu definierte Steifigkeiten zugewiesen. Der „Ebene A“, die schubstarr ausgebildet wird, werden die Eigenbiegesteifigkeiten des Gesamtquerschnittes zugewiesen. Die „Ebene B“ erhält die Biegesteifigkeiten aus den Steineranteilen sowie die Schubsteifigkeit des Gesamtquerschnittes. Die Dehnsteifigkeit erhält die „Ebene C“, die als Gelenkstabkette generiert wird und von den beiden „Ebenen“ A und B gestützt wird. Für die Berechnung werden die einzelnen „Ebenen“ über die Durchbiegungen gekoppelt. Wenn lediglich nach Theorie I. Ordnung gerechnet wird oder der Normkraftanteil des Gesamttragwerkes deutlich unter der kritischen Last des ideellen Systems liegt, kann auf die „Ebene C“ verzichtet werden. Die Dehnsteifigkeit kann dann auf die beiden „Ebenen“ A und B entsprechend verteilt werden.

Der Schubanalogie liegt die Annahme zu Grunde, dass die Schwerpunkte der Teilquerschnitte im verformten Zustand auf einer Gerade liegen. Für zweiteilige und dreiteilige symmetrische Querschnitte ist diese Voraussetzung immer erfüllt, womit die Differentialgleichungen der Schubanalogie für diese Fälle mit denen der analytischen Theorie genau übereinstimmen. Für mehrteilige Querschnitte mit annähernd symmetrischem Aufbau und ungefähr gleichen Fugensteifigkeiten liefert die Schubanalogie hingegen nur Näherungslösungen. SCHOLZ [49] zeigt in seiner Dissertation, dass die Schubanalogie für übliche Querschnittsgeometrien und

Steifigkeitsverhältnisse für baupraktische Anwendungen dennoch ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

### **Balkenschichtmodell**

Mit dem von HARTMANN [35] und KNEIDL/HARTMANN [40] vorgestellten Modell, zur Berechnung von Trägern mit nachgiebigem Verbund, gibt KREUZINGER [41] neben der Schubanalogie (siehe oben) eine weitere Möglichkeit zur Berechnung von Brettsperrhölzern an. In diesem, nachfolgend als „Fachwerkmodell“ bezeichnet Berechnungsmodell, werden die einzelnen Querschnitte als biegesteife Fachwerkgurte abgebildet. Benachbarte Gurte werden über Fachwerkdagonalen miteinander verbunden, wodurch die Nachgiebigkeit der Schubverformung berücksichtigt wird. Für die Normalkräfte der Teilquerschnitte und den Schubfluss der einzelnen Verbindungsschichten ergibt sich ein treppenförmiger Verlauf. Ein sägezahnartiger Verlauf der Schnittgrößen stellt sich für die Querkkräfte der Teilquerschnitte ein. Mit diesem „Fachwerkmodell“ können auch Brettsperrholzträger mit beliebigem Querschnittsaufbau (auch unsymmetrische) mit gängigen Stabwerksprogrammen ausreichend genau berechnet werden. Nachteilig ist hingegen jedoch der hohe Modellierungsaufwand.

Eine Alternative zu dem oben beschriebenen „Fachwerkmodell“ stellt das „Rahmenmodell“ von BERGELDER [2] (siehe auch HARTMANN [35]) zur Berechnung von nachgiebig zusammengesetzten Biegeträgern dar. Die Nachgiebigkeiten werden bei diesem Modell über angepasste Biegesteifigkeiten der einzelnen Rahmenstäbe berücksichtigt. Auch bei diesem Modell ist der Modellierungsaufwand recht beträchtlich.

Aufbauend auf den Arbeiten von BOSL [3] und KNEIDL [39] stellt JAKOBS [36] in seiner Dissertation für die Berechnung von Brettlagenholz mit starrem Verbund die beiden folgenden ingenieurmäßigen Näherungslösungen vor:

- Berechnungsmodell für Brettlagenholz mit starrem Verbund aufbauend auf der Theorie des Mehrschichtenverbundes mit Schubdeformation (nachfolgend als MSV bezeichnet)
- Berechnungsmodell für Brettlagenholz mit starrem Verbund unter Verwendung von Schalen- und Federelementen aufbauend auf KNEIDL [39] (nachfolgend als „Kneidl“ bezeichnet)

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für die verschiedenen Berechnungsmodelle mit teilweise analytischen Lösungen, einer 3D-finite-Elemente Berechnung sowie mit experimentellen Untersuchungen zeigten für eine gleichmäßige Belastung (Gleichlast) für beide Modelle bezüglich der Durchbiegung in Feldmitte als auch den maximalen Spannungen in Feldmitte sehr gute Übereinstimmungen. Bei Einzellasten zeigte sich, dass mit dem Modell „MSV“ keine zufrieden stellenden Ergebnisse erzielt werden konnten. Dies hing damit zusammen, dass für das Modell „MSV“ von der Schubdeformationstheorie 1. Ordnung ausgegangen wurde. Mit dem Modell „Kneidl“ konnten hingegen auch bei Einzellasten sehr gute Übereinstimmungen mit den Referenzlösungen festgestellt werden.

### **Theorie der nachgiebig verbundenen Biegeträger**

SCHWAR/BRETSCHNEIDER [50] untersuchten für dreilagige Brettsperrholzplatten im Maßstab 1:1 das Tragverhalten unter Biegebeanspruchung. Hierzu wurden insgesamt 6 Brettsperrholzplatten geprüft und die Versuchsergebnisse mit zwei unterschiedlichen Berechnungsansätzen verglichen: Berechnung mittels der Theorie der nachgiebig verbundenen Biegeträger BLASS/GÖRLACHER [8] sowie einer FEM-Strukturanalyse mit 3D-Volumenelementen. Die Untersuchungen zeigten eine gute Übereinstimmung der beiden Berechnungsmodelle mit den Versuchsergebnissen. Die Biegeversuche ergaben eine mittlere Rollschubfestigkeit von ungefähr  $f_R = 1,07 \text{ N/mm}^2$ , die auch BLASS/GÖRLACHER [8] angeben.

## **2.2 Bemessung**

Die bisherigen Ausführungen sollten einen Überblick über die derzeitigen Berechnungsmöglichkeiten von Brettsperrhölzern geben. Nachfolgend wird zunächst das Nachweisverfahren für Brettsperrholz

nach der DIN 1052 [N1] vorgestellt. Anschließend wird für das in der Zulassung geregelte Produkt Merk-Dickholz® [Z2], das darin angegebene vereinfachte Nachweisverfahren vorgestellt und dem der DIN 1052 [N1] gegenübergestellt.

Für den Nachweis der Tragfähigkeit schreibt die DIN 1052 [N1] im Abschnitt 10.7.1 Absatz (1) folgendes vor:

*Die aus den Schnittgrößen berechneten Spannungen sind den Bemessungswerten der Festigkeiten gegenüberzustellen. Bei Querschnitten aus verschiedenen Schichten gilt dies für jede Schicht i eines Querschnitts. Dabei sind die Spannungen in den Hauptrichtungen (in der Regel Faserrichtung und rechtwinklig dazu, siehe Bild 16) aus Platten- und Scheibenbeanspruchung zu betrachten. Gleichzeitiges Auftreten von verschiedenen Spannungen ist zu berücksichtigen.*

Der Nachweis der Normalspannung nach DIN 1052 [N1] lautet damit:

$$\frac{\sigma_{t,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad \text{Glg. 2-5}$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_{t,d}$  = Anteil der Zugspannung der untersten Lage in der Schwerachse
- $\sigma_{m,d}$  = Anteil der Biegespannung der untersten Lage
- $f_{t,0,d}$  = Zugfestigkeit der untersten Lage
- $f_{m,d}$  = Biegefestigkeit der untersten Lage

Besteht der Querschnitt aus  $n$ -Teilquerschnitten mit identischen Brettdicken, kann die Zugspannung  $\sigma_t$  sowie der Biegespannungsanteil  $\sigma_m$  der untersten Lage in Abhängigkeit der Biegerandspannung  $\sigma_R$  über das Verhältnis Lagendicke  $d$  zu Gesamtbauteildicke  $D$  ausgedrückt werden. Mit Bild 2-1 ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\sigma_t = \sigma_R \cdot \frac{D-d}{D} \quad \text{Glg. 2-6}$$

$$\sigma_m = \sigma_R \cdot \frac{d}{D} \quad \text{Glg. 2-7}$$

Hierin bedeutet:

- $\sigma_R$  = Biegerandspannung am unteren Rand der untersten Lage
- $\sigma_t$  = Schwerpunktspannung in der untersten Lage
- $\sigma_m$  = Anteil Biegespannung in der untersten Lage
- $D$  = Dicke des Gesamtquerschnitts
- $d$  = Dicke der untersten Lage

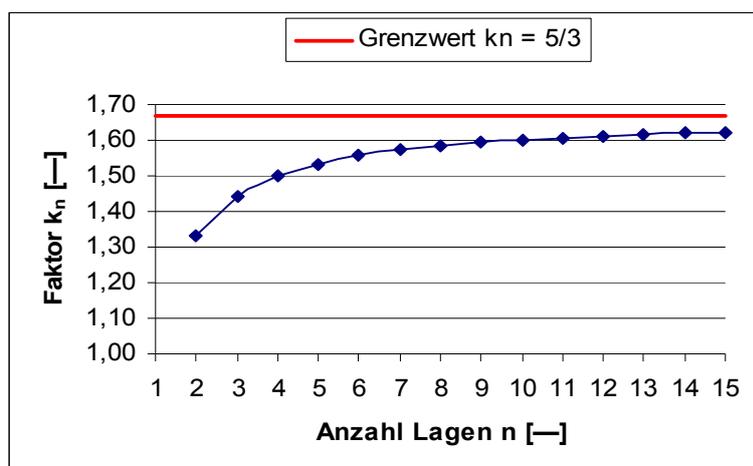
Setzt man in Glg. 2-5 die Glg. 2-6, Glg. 2-7 sowie die Beziehung  $f_{t,0,k} = 0,6 \cdot f_{m,k}$  nach DIN EN 338 [N4] bzw. DIN EN 384 [N5] ein, so erhält man folgende Gleichung:

$$\frac{\sigma_R}{f_m} \cdot \left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cdot \frac{d}{D} \right) \leq 1 \quad \text{Glg. 2-8}$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_R$  = Biegerandspannung am unteren Rand der untersten Lage
- $f_m$  = Biegefestigkeit der untersten Lage
- $d$  = Dicke der einzelnen Lagen
- $D$  = Dicke des gesamten Querschnittes

In Diagramm 2-1 ist der Klammerausdruck aus Glg. 2-8 in Abhängigkeit der Anzahl der Lagen  $n$  (Verhältnis  $d/D$ ) dargestellt.



**Diagramm 2-1** Verlauf des Faktors  $k_n$  für Querschnitte mit unterschiedlicher Lagenanzahl

Aus Diagramm 2-1 ist zu erkennen, dass mit zunehmender Anzahl an Lagen, aus denen der Querschnitt besteht, der Anteil der Biegespannung abnimmt. Dies bedeutet aber auch, dass die Bauteilbiegefestigkeit mit zunehmender Lagenanzahl verstärkt von der Zugfestigkeit der untersten Lage bestimmt wird. Bei einem Querschnitt mit zwei Lagen beträgt der Biegespannungsanteil  $\sigma_m$   $1/3$  der gesamten Biegerandspannung  $\sigma_R$ . Für einen fünfteiligen Querschnitt beträgt der Biegespannungsanteil  $\sigma_m$  hingegen nur noch  $2/15 \approx 0,13$ . Bei einem siebenteiligen Querschnitt liegt der Anteil der Biegespannung  $\sigma_m$  an der Biegerandspannung  $\sigma_R$  unter 10%. Anhand dieses Diagramms ist somit deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Anzahl an Lagen die Biegefestigkeit des Brettspertholzträgers vornehmend von der Zugfestigkeit der untersten Lage bestimmt wird.

Abweichend von dem oben vorgestellten Bemessungsverfahren, darf nach der aktuellen Zulassung von Merk-Dickholz<sup>®</sup> [Z2] die Tragfähigkeit auch vereinfachend nur über die Biegerandspannung unter Berücksichtigung des Plattenaufbaus erfolgen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Es liegt eine überwiegend gleichmäßig verteilte Belastung vor (Gleichstreckenlast)
- Das Verhältnis Spannweite  $l_S$  zu Bauteildicke  $D$  beträgt  $l_S/D \geq 15$

Der Nachweis der Normalspannung nach der Zulassung von Merk-Dickholz<sup>®</sup> [Z2] lautet damit:

$$\frac{\sigma_{R,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

**Glg. 2-9**

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned} \sigma_{R,d} &= \text{Biegerandspannung am unteren Rand der untersten Lage} \\ f_{m,d} &= \text{Biegefestigkeit der untersten Lage} \end{aligned}$$

Außerdem dürfen nach der aktuellen Zulassung von Merk-Dickholz<sup>®</sup> [Z2] beim Nachweis der Durchbiegungen, ab einem Verhältnis der Spannweite  $l_S$  zu Bauteildicke  $D$  von  $l_S/D > 30$ , die Schubverformungen unberücksichtigt bleiben.

Vergleicht man die beiden Bemessungsverfahren (DIN 1052 und Zulassung) miteinander, so ergibt sich, dass bei gleichen Biegefestigkeiten für die unterste Lage, die ermittelten Biegetragfähigkeiten nach DIN 1052 [N1] stets deutlich unter denen nach dem Bemessungsverfahren der Zulassung für Merk-Dickholz<sup>®</sup> [Z2] liegen. Für einen zweiteiligen Querschnitt, der nach Glg. 2-8 bemessen wird, ergibt sich somit eine rechnerische Tragfähigkeit, die um 25% niedriger ausfällt als nach der Zulassung. Bei einem fünfteiligen Querschnitt beträgt der Unterschied rund 35%.

Die Versuche, die im Rahmen der Zulassung für Merk-Dickholz<sup>®</sup> durchgeführt wurden, sowie den Versuchen für die werkseigene Produktionskontrolle zeigt sich, dass die ermittelten Tragfähigkeiten

nach dem Bemessungsverfahren der DIN 1052 [N1] (Glg. 2-8) schlechter mit den in den Versuchen ermittelten Festigkeiten übereinstimmen, als die rechnerisch ermittelten Tragfähigkeiten, die ausschließlich über die Biegerandspannung (Glg. 2-9) ermittelt wurden.

### 2.3 Bisherige Versuche an Brettsperrholzträgern zur Ermittlung der Biegefestigkeit

Der Ansatz, Brettsperrhölzer ausschließlich über die Biegerandspannung zu bemessen, wurde auch von JÖBSTL et al. [37] aufgegriffen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Biegefestigkeiten von insgesamt 106 Brettsperrholzträgern sowie die Zugfestigkeiten von 124 Brettern untersucht. Für die Versuche wurden ausschließlich Bretter ohne Keilzinkenverbindungen verwendet.

Geprüft wurden Brettsperrholzträger mit 1, 2, 4 und 8 nebeneinander liegenden Brettern senkrecht zu Spannrichtung. Alle Probkörper hatten denselben Querschnittsaufbau, bestehend aus insgesamt fünf Lagen mit einer Dicke der einzelnen Lage von  $d = 22$  mm und einer Gesamtdicke von  $D = 110$  mm. Der Faserverlauf der beiden äußeren Lagen sowie der mittleren Lage war parallel zur Spannrichtung. Der Faserverlauf der beiden übrigen Lagen war um  $90^\circ$  versetzt. Somit hatte der Querschnitt insgesamt drei Längs- und zwei Querlagen.

Zusätzlich wurden Träger ohne Querlagen mit denselben Dicken der einzelnen Lagen sowie derselben Anzahl an Lagen geprüft. Bei diesem Querschnitt handelte es sich somit um Brettschichtholz. Untersucht wurde hierfür ebenfalls die Biegetragfähigkeit für 1 und 4 nebeneinander liegende Bretter.

Das Ausgangsmaterial für die Herstellung von Brettschichtholz als auch Brettsperrholz ist das „einzelne Brett“. Durch das Zusammenfügen der einzelnen Bretter zu einem größeren Teil, wird eine Vergütung des Endproduktes erreicht. Bei Brettschichtholz, das aus mehreren übereinander liegenden Brettern besteht, wird diese Homogenisierung als „Laminierungseffekt“ bezeichnet. Die Vergütung erfolgt hierbei in vertikaler Richtung durch die übereinander liegenden Brettern.

Wegen der flächenartigen Struktur von Brettsperrholz sind diese Bauteile auch wesentlich breiter als Brettsperrholzträger, weshalb Brettsperrholz i. d. R. aus mehreren nebeneinander liegenden Brettern besteht. Aufgrund der nebeneinander liegenden Bretter kommt es auch bei Brettsperrholz zu einem Vergütungseffekt in horizontaler Richtung, dem so genannten „Systemfaktor“. Darüber hinaus kann Brettsperrholz aber auch aus mehreren faserparallelen Lagen bestehen, so dass es zu einer Kombination der beiden Vergütungseffekte (Laminierungseffekt und Systemfaktor) kommt. Dieser Vergütungseffekt ist für die Bemessung von biegebeanspruchten Brettsperrholzbauteilen von entscheidender Bedeutung.

Für Brettsperrholzträger mit vier oder mehr nebeneinander liegenden Brettern gibt JÖBSTL et al. [37] für den „Systemfaktor“  $k_{sys} = 1,1$  an. Dieser „Systemfaktor“ bedeutet, dass Brettsperrholzträger mit vier oder mehr nebeneinander liegenden Brettern 10% höhere Biegefestigkeiten haben als vergleichbare Brettsperrholzträger mit nur einer Brettbreite.

Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse leitet JÖBSTL et al. [37] ein Bemessungsverfahren für Brettsperrholz ab, welches sich an dem in der DIN EN 1194 [N8] angegebenen Verfahren für Brettschichtholzträger orientiert. Die Versuche für die Träger mit nur einer „Brettbreite“ ergaben für die Brettsperrholzprüfkörper einen 5%-Quantilwert der Biegerandfestigkeit von  $f_{R,c,05}^0 = 27,3$  N/mm<sup>2</sup>. Für die Brettschichtholzträger ergab sich der 5%-Quantilwert der Biegerandfestigkeit zu  $f_{R,g,05}^0 = 29,0$  N/mm<sup>2</sup>. Um die Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit den in der DIN EN 1194 [N8] angegebenen Verfahren bestimmen zu können, müssen die geringeren Biegefestigkeiten der Brettsperrholzträger im Vergleich zu den Brettschichtholzträgern berücksichtigt werden. Zur Berücksichtigung dieses Schachverhaltes, gibt JÖBSTL et al. [37] folgenden Verhältniswert an:

$$k_{CLT/GLT} = \frac{f_{R,c,05}^0}{f_{R,g,05}^0} = \frac{27,3}{29,0} \approx 0,94$$

**Glg. 2-10**

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 k_{CLT/GLT} &= \text{Faktor für das Verhältnis der Biegefestigkeiten von Brettsperrholz zu} \\
 &\quad \text{Brettschichtholz für die geprüften Träger} \\
 f_{R,c,05}^{\theta} &= 5\text{-Quantilwert der Biegefestigkeit des geprüften Brettsperrholzträgers} \\
 f_{R,g,05}^{\theta} &= 5\text{-Quantilwert der Biegefestigkeit des geprüften Brettschichtholzträgers}
 \end{aligned}$$

Nachfolgend wird mit dem oben vorgestellten „Systemfaktor“  $k_{\text{sys}} = 1,1$  und dem Verhältniswert  $k_{CLT/GLT} = 0,94$  das Bemessungsverfahren von JÖBSTL et al. [37] für Brettsperrholz, aufbauend auf dem in der DIN EN 1194 [N8] angegebenen Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern, wiedergegeben.

Nach der DIN EN 1194 [N8] ist die charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholz mit der charakteristischen Zugfestigkeit der äußersten Lage zu ermitteln (siehe Glg. 2-11).

$$f_{m,g,k} = 7 + 1,15 \cdot f_{t,0,l,k} \quad \text{Glg. 2-11}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 f_{m,g,k} &= \text{charakteristische Biegefestigkeit des Brettschichtholzes nach DIN EN 1194 [N8]} \\
 f_{t,0,l,k} &= \text{charakteristische Zugfestigkeit der äußersten Lage}
 \end{aligned}$$

Mit den Ergebnissen von BRANDNER [4] gibt JÖBSTL et al. [37] unter Berücksichtigung des Variationskoeffizienten für die Zugfestigkeit der Bretter für die Berechnung der Biegefestigkeit von Brettschichtholz folgende Gleichung an:

$$f_{m,g,k} = 1,06 \cdot (1,4 + 4,0 \cdot v_{t,0,l}) \cdot f_{t,0,l,k}^{0,8} \quad \text{Glg. 2-12}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 f_{m,g,k} &= \text{charakteristische Biegefestigkeit des Brettschichtholzes} \\
 v_{t,0,l} &= \text{Variationskoeffizient der Zugfestigkeit der Bretter} \\
 f_{t,0,l,k} &= \text{charakteristische Zugfestigkeit der äußersten Lage}
 \end{aligned}$$

Die mit der Glg. 2-12 ermittelte charakteristische Biegefestigkeit, gilt für einen Brettschichtholzträger mit einer Höhe von  $H = 600$  mm und einer Breite von  $B = 150$  mm. Da die untersuchten Träger, hingegen eine Höhe von  $H = 110$  mm und eine Breite von  $B = 120$  mm hatten, muss die charakteristische Biegefestigkeit nach Glg. 2-12 auf die tatsächlich vorhanden Abmessungen mit Hilfe des in der DIN EN 1194 [N8] angegeben Größenfaktors  $k_{\text{size}}$  (siehe Glg. 2-13) umgerechnet werden.

$$k_{\text{size}} = \left(\frac{600}{H}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{150}{B}\right)^{0,05} \quad \text{Glg. 2-13}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 k_{\text{size}} &= \text{Größenfaktor zur Anpassung an die tatsächlich vorhanden Bauteilabmessungen} \\
 H &= \text{Höhe des Brettschichtholzträgers} \\
 B &= \text{Breite des Brettschichtholzträgers}
 \end{aligned}$$

Nach JÖBSTL et al. [37] ergibt sich damit die Biegefestigkeit für einen beliebigen Brettsperrholzträger wie folgt:

$$f_{m,c,05} = k_{\text{sys}} \cdot k_{\text{size}} \cdot k_{CLT/GLT} \cdot f_{m,g,k} \quad \text{Glg. 2-14}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 f_{m,c,k} &= \text{charakteristische Biegefestigkeit des Brettsperrholzträgers} \\
 k_{\text{sys}} &= \text{„Systemfaktor“ zur Berücksichtigung der Vergütung bei mehreren nebeneinander} \\
 &\quad \text{liegenden Bretter (vier oder mehr } k_{\text{sys}} = 1,1, \text{ sonst } k_{\text{sys}} = 1,0) \\
 k_{\text{size}} &= \text{Faktor zur Berücksichtigung der Querschnittsabmessungen nach Glg. 2-13}
 \end{aligned}$$

$k_{CLT/GLT}$  = Faktor für das Verhältnis der Biegefestigkeiten von Brettsper Holz zu Brettschichtholz nach Glg. 2-10

$f_{m,g,k}$  = charakteristische Biegefestigkeit des Brettschichtholzträgers nach Glg. 2-12

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass für die oben beschriebenen Versuche ausschließlich Bretter ohne Keilzinkenverbindungen verwendet wurden. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt (siehe z. B. [15], [19] bis [23]), dass die Biegefestigkeit von Brettschichtholz jedoch nicht nur von den Eigenschaften der Brettlamellen abhängen, sondern auch wesentlich von der charakteristischen Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung beeinflusst wird.

In Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit gibt COLLING [15] für die charakteristische Biegefestigkeit von Brettschichtholz folgende Gleichung an:

$$f_{m,g,k} = 0,75 \cdot f_{m,j,k} \quad \text{Glg. 2-15}$$

Hierin bedeuten:

$f_{m,g,k}$  = charakteristische Biegefestigkeit des Brettschichtholzträgers mit einer Höhe von  $H = 600$  mm

$f_{m,j,k}$  = charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung

Die oben aufgeführte Gleichung gilt für einen Brettschichtholzträger mit einer Höhe von  $H = 600$  mm. Weicht die Höhe des Brettschichtholzträgers hiervon ab, muss die charakteristische Biegefestigkeit nach COLLING [15] mit folgender Gleichung modifiziert werden.

$$k_h = \left( \frac{h}{600} \right)^{0,2} \quad \text{Glg. 2-16}$$

Hierin bedeuten:

$h$  = Höhe des Trägers

$k_h$  = Faktor zur Berücksichtigung der Trägerhöhe

Die aktuelle Ausgabe der DIN EN 1194 [N8] stellt bei der Ermittlung der Biegefestigkeit von Brettschichtholz an die Qualität der Keilzinkenverbindung folgende Anforderungen, wobei hiervon mindestens eine erfüllt sein muss.

$$f_{t,j,k} \geq 5 + f_{t,0,l,k} \quad \text{Glg. 2-17}$$

$$f_{m,j,k} \geq 8 + 1,4 \cdot f_{t,0,l,k} \quad \text{Glg. 2-18}$$

Hierin bedeuten:

$f_{t,j,k}$  = charakteristische Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung

$f_{t,0,l,k}$  = charakteristische Zugfestigkeit der Lamelle

$f_{m,j,k}$  = charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung

Nach COLLING [15] ergibt sich die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit der charakteristischen Biegefestigkeit sowie der tatsächlichen Trägerhöhe. Bei der Bestimmung der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern nach DIN EN 1194 [N8] ist zwar ebenfalls die Trägerhöhe zu berücksichtigen, allerdings wird die Biegefestigkeit ausschließlich über die Zugfestigkeit der Lamellen ermittelt. Eine Gleichung zur Berechnung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit ist in der DIN EN 1194 [N8] nicht angegeben. Diese enthält lediglich Anforderungen an die Keilzinkenfestigkeit in Abhängigkeit der charakteristischen Zugfestigkeit der Lamellen. Dies bedeutet, dass sich nach COLLING [15] unterschiedliche Anforderungen an die Keilzinkenbiegefestigkeiten für Brettschichtholzträger mit unterschiedlichen Höhen ergeben. Nach der DIN EN 1194 [N8] hängt die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern hingegen nur von der Zugfestigkeit der Lamellen ab, so dass die Keilzinkenfestigkeit bei der Ermittlung der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern unberücksichtigt bleibt. Der Einfluss der Keilzinkenfestigkeit auf die

Festigkeit der Träger wird nach DIN EN 1194 [N8] ausschließlich in Abhängigkeit der charakteristischen Zugfestigkeit der Lamellen angegeben.

## 2.4 Bisherige Erkenntnisse zu System-/Vergütungseffekten

Verschiedene Produkte im Bereich des Holzbaus bestehen aus mehreren miteinander verbunden Einzelprodukten zu größeren Einheiten. Hierzu zählt beispielsweise Brettschichtholz, das aus mehreren einzelnen Brettern aufgebaut ist. Aber auch Materialien wie Duo- und Triobalken sind aus zwei bzw. drei faserparallel miteinander verklebten Brettern aufgebaut. Das Brettsperrholz besteht ebenfalls aus einzeln miteinander verklebten Brettern, die jedoch, anders als bei den beiden zuvor genannten Produkten, mit abwechselnder Orientierung miteinander verklebt werden.

Durch das Zusammenfügen des einzelnen Ausgangsprodukts (Brett) zu einer größeren Einheit entsteht ein neues Produkt, das aus den Eigenschaften des Ausgangsprodukt abgeleitet werden kann JÖBSTL [27]. Aus dem Zusammenfügen des Ausgangsprodukts zu einer größeren Einheit resultiert, dass die einzelnen Komponenten als eine zusammengehörige Einheit wirken BRANDNER/SCHICKHOFER [5]. Derartige Systeme weisen i. A. zwei wichtige neue Eigenschaften auf: die Lastverteilung und Lastumlagerung.

Bei der Lastverteilung sind die Steifigkeiten der einzelnen Komponenten von wesentlicher Bedeutung. Elemente mit einer höheren Steifigkeit ziehen mehr Last an, als weichere Elemente ([5], [11], [18]). Bei der Lastumlagerung können die benachbarten Elemente die zusätzlichen Belastungen infolge des Ausfalls eines einzelnen Elementes kompensieren. Die Größe der Lastumlagerung hängt jedoch von mehreren verschiedenen Faktoren ab, so dass es schwer ist, hierfür allgemeingültige Aussagen zu ermitteln. Eine wichtige Einflussgröße ist zum einen das System, hiervon hängt ab, wie die mögliche Lastumlagerung ermöglicht wird. Außerdem hat die Art der Belastung ebenfalls einen hohen Einfluss auf die Größe der Lastumlagerung KIM/KVAM [38].

Werden derartige Systeme experimentell untersucht und die Ergebnisse anschließend statistisch ausgewertet, zeigt sich, dass die Streuung der mechanischen Eigenschaften abnimmt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Ausgangssystem aus mehreren redundanten Komponenten besteht, die, wenn sie für sich alleine geprüft werden, höhere Streuungen aufweisen, als wenn mehrere dieser Komponenten zusammenwirken. Durch das Zusammenfügen der einzelnen Komponenten wird eine Homogenisierung erreicht. I. A. bleibt der Mittelwert hierbei konstant LIU/BULLEIT [43], in manchen Fällen, abhängig von der Charakteristik des Materials, ist auch eine geringfügige, nicht relevante Abnahme festzustellen WILLIAMS et al. [54]. Bei dem 5%-Quantilwert ist hingegen ein Anstieg zu beobachten.

Aufgrund der Homogenisierung reduziert sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein schwaches Element in einem hochbeanspruchten Bereich liegt HANSSON/ISAKSSON [26]. Auf der anderen Seite nimmt in einem System jedoch auch die Anzahl der Elemente zu und damit auch die Möglichkeit eines noch schwächeren Elements. Die Lastumlagerung ist somit eine Kombination aus strukturellen und statischen Einflüssen.

Nach BAKHT/JAEGER [1] ist einer der Haupteinflussparameter auf die Lastumlagerung von Holztragwerken die Streuung der Festigkeit. Sie konnten eine Funktion ermitteln in der die Streuung der Festigkeit in Abhängigkeit der beteiligten Elemente  $n$  ermittelt werden kann. Diese Funktion stellt jedoch eine konservative Annäherung da. Eine Anpassung der allgemeinen Funktion mittels der Standardabweichung der Normalverteilung und der Größe des Stichprobenumfangs ermöglicht eine bessere Abschätzung des Einflusses infolge mehrerer zusammenwirkender Elemente.

Aufbauend auf den Ergebnissen von BAKHT/JAEGER [1] wurden von BRANDNER/SCHICKHOFER [5] Versuche zur Untersuchung der Systemeffekte durchgeführt. Anhand dieser Ergebnisse wurde eine Funktion abgeleitet, mit der die reduzierten Variationskoeffizienten in Abhängigkeit der gleichzeitig wirksamen Elemente ermittelt werden kann. Aus den Versuchen wurden außerdem noch Systemfaktoren abgeleitet. Somit stellt diese Arbeit einen möglichen Ansatz zur Berücksichtigung des Systemeffekts bei Brettsperrholzträgern da.

## 2.5 Ziel der Arbeit

Nach derzeitigem Stand wird Brettsperrholz ausschließlich über bauaufsichtliche Zulassungen geregelt. Darin ist festgelegt, dass die Bauteilbiegefestigkeit nach der Verbundtheorie mit starrem Verbund mit den Festigkeitskennwerten für die Festigkeitsklassen der einzelnen Lagen zu ermitteln ist. In manchen Zulassungen wird noch die Möglichkeit eines Systemfaktors für die Breite zugelassen, die evtl. Lastumlagerungsmöglichkeiten durch mehrere nebeneinander liegende Brettlagen berücksichtigt. In keiner der aktuellen Zulassungen gibt es die Möglichkeit, die Biegefestigkeit in Abhängigkeit des verwendeten Ausgangsmaterials zu ermitteln.

Mit der vorliegenden Arbeit sollen die relevanten Einflussgrößen auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrhölzern ermittelt werden, um die Festigkeiten in Zukunft allgemeingültig ermitteln zu können. Hierzu wurden zahlreiche Bauteilbiegeversuche durchgeführt, mit denen zum einen die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Biegefestigkeit experimentell ermittelt werden sollten und für die weiteren numerischen Untersuchungen noch als Referenz und Modellkalibrierungswerte dienten.

Nachfolgend wird der Inhalt der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Im Anschluss daran wird ein Abriss über die theoretischen/numerischen Betrachtungen gegeben.

Der experimentelle Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der systematischen Untersuchung der Plattenbiegetragfähigkeit von Brettsperrholzelementen. Hierzu wurden zahlreiche Versuche mit unterschiedlichen Einflussparametern durchgeführt. Mit den Versuchen sollen die verschiedenen Einflüsse auf die Biegetragfähigkeit größenmäßig ermittelt werden. Für die Versuche wurden ausschließlich Brettsperrhölzer von der Firma Finnforest Merk, das so genannte Merk-Dickholz®, verwendet. Untersucht wurden folgende Parameter:

- Sortierung

Der Werkstoff Holz ist ein natürlich gewachsener Baustoff, dessen Eigenschaften in einem großen Bereich variieren. Um den Einfluss der Streuung auf die Ergebnisse so gering wie möglich zu halten, wurde für die Prüfkörper maschinell sortiertes Holz verwendet. Da die Firma Finnforest Merk für ihre Brettsperrhölzer jedoch ausschließlich visuell sortierte Bretter verwendet, wurde zu Vergleichszwecken ein Teil der Versuche auch mit Prüfkörpern durchgeführt, die aus visuell sortierten Brettern bestanden.

Mit der Verwendung von maschinell und visuell sortierten Brettern, soll der Einfluss der Sortierung auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrhölzern ermittelt werden. Damit soll erreicht werden die Ergebnisse, die für maschinell sortierte Prüfkörper ermittelt wurden, auch auf Brettsperrhölzer übertragen zu können, die aus visuell sortierten Brettern bestehen, wie z.B. bei Merk-Dickholz®.

**Ziel:** Untersuchung des Einflusses des Sortierverfahrens auf die Biegetragfähigkeit.

- Breite

Durch die kreuzweise Verklebung einzelner Bretter entstehen flächige Bauteile, in denen mehrere Bretter nebeneinander liegen, die durch Querlagen kontinuierlich miteinander verbunden sind. Nach DIN 1052 [N1] (Abschnitt 8.1, Absatz (8)) darf für derartige Systeme die Festigkeit um einen Systembeiwert  $k_t$  erhöht in Rechnung gestellt werden. Als Größenordnung gibt die DIN 1052 im Absatz (9) folgendes an:

*Wenn das kontinuierliche Lastverteilungssystem so bemessen ist, dass es die Lasten von einem Bauteil auf das benachbarte Bauteil übertragen kann, dann darf der Systembeiwert zu  $k_t = 1,1$  angenommen werden.*

Anhand von Prüfkörpern mit unterschiedlichen Breiten bzw. unterschiedlicher Anzahl nebeneinander liegender Bretter, soll die Größe des Systembeiwertes in Abhängigkeit der Breite bzw. der Anzahl nebeneinander liegender Bretter quer zur Spannrichtung, ermittelt werden.

**Ziel:** Untersuchung des Einflusses der Bauteilbreite auf die Biegetragfähigkeit (Systembeiwert).

- Querschnitt

In manchen Zulassungen für Brettspertholzelemente dürfen bei mehrlagigen Bauteilen je zwei (z.B. Z-9.1-482 [Z1]) oder bis zu drei (z.B. Z-9.1-501 [Z2]) übereinander liegende Lagen faserparallel miteinander verklebt werden. Sie sind dann vom Aufbau her dem Brettschichtholz sehr ähnlich. Durch die Verklebung einzelner Bretter zu einem Brettschichtholzträger, werden für den Brettschichtholzträger höhere Festigkeiten erzielt, als sich im Vergleich für die Festigkeiten der einzelnen Bretter ergeben würde. Dieser Effekt wird als Laminierungseffekt bezeichnet. Untersuchungen zu dem Laminierungseffekt bei Brettschichtholzträgern gibt es z.B. von FALK/COLLING [25].

Versuche an Prüfkörpern mit einer unterschiedlichen Anzahl an benachbarten Lagen, die faserparallel miteinander verklebt sind, sollen Aufschluss über die erhöhte Biegetragfähigkeit bei derartigen Brettspertholzquerschnitten geben.

**Ziel:** Untersuchung des Einflusses des Querschnittsaufbaus auf die Biegetragfähigkeit (Laminierungseffekt).

- Keilzinkung

Die Firma Finnforest Merk, von der sämtliche Prüfkörper stammten, verwenden für ihre Keilzinkenverbindungen ausschließlich liegende Keilzinkungen anstelle der bei Brettschichtholzträgern üblichen stehenden Keilzinkung (siehe Bild 3-8). Aufgrund der unterschiedlichen Anordnung der Keilzinkungen ergeben sich bei sonst gleichen Bedingungen (Holzqualität, Zinkenprofil, Herstellungsqualität usw.) verschiedene Biegefestigkeiten für die Keilzinkungen.

Da die Brettschichtholz-Biegefestigkeit im Wesentlichen von der Keilzinkenbiegefestigkeit / Keilzinkenzugfestigkeit abhängt (siehe hierzu z.B. COLLING [11] und COLLING [15]), sollen vergleichende Biegeprüfungen an Brettspertholzelementen mit liegenden und stehenden Keilzinkungen zeigen, ob sich diese Abhängigkeit auch für die Biegefestigkeit von Brettspertholzelementen ergibt.

**Ziel:** Untersuchung des Einflusses der Keilzinkenfestigkeit auf die Biegetragfähigkeit.

Für die Herstellung von Brettsperthölzern werden die Bretter für die einzelnen Lagen aus einer Endloslamelle herausgeschnitten, wodurch in den hoch beanspruchten Biegebereichen Bereiche mit und ohne Keilzinkungen vorhanden sind. Da sich die oben aufgeführten Einflüsse evtl. unterschiedlich bei Bauteilen mit und ohne Keilzinkungen auswirken können, wurden die verschiedenen Einflüsse sowohl an Bauteilen mit als auch ohne Keilzinkenverbindungen durchgeführt.

Die obigen Ausführungen zeigen, dass die Biegetragfähigkeit von einer Vielzahl unterschiedlicher Parametern abhängt. Um die Biegefestigkeit von Brettspertholzträgern jedoch allgemeingültig in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen angeben zu können, müssten noch deutlich mehr Biegeversuche durchgeführt werden. Dies scheidet jedoch aus Material und Kostengründen aus. Um die Tragfähigkeit dennoch ermitteln zu können, wurden hierzu zahlreiche Simulationsrechnungen zur Ermittlung der Biegefestigkeit nach der Monte Carlo Simulation durchgeführt.

Für die Simulationsrechnungen wurde ein Rechenprogramm verwendet, mit dem es möglich war, unterschiedlich aufbaute Brettspertholzträger mit verschiedenen Eigenschaften zu simulieren und zu berechnen. Als mechanisches Modell zur Berechnung der Verformungen und Schnittgrößen/Spannungen wurde auf das von KNEIDL [39] entwickelte Stabwerksmodell zur Berechnung von Brettschichtholzträgern zurückgegriffen. Zur Simulation der verschiedenen Holzeigenschaften und Keilzinkeneigenschaften wurden die Regressionsgleichungen nach COLLING [11] verwendet. Damit jedoch die Tragfähigkeit der simulierten Träger ermittelt werden konnten, mussten zutreffende Bruchkriterien definiert werden. Hierzu wurden Versuchsträger mit ihren bekannten Eigenschaften simuliert und die zugehörigen Tragfähigkeiten berechnet. Die so ermittelten Festigkeiten wurden mit den Festigkeiten aus den Versuchen verglichen. Damit sollten die Bruchkriterien definiert und angepasst werden, um die berechneten Festigkeiten mit den in Versuchen ermittelten Festigkeiten vergleichen zu können. Damit soll sichergestellt sein, dass die Tragfähigkeit der Träger mit den Simulationsrechnungen zutreffend simuliert werden können.

## 3 Durchgeführte Versuche

### 3.1 Begriffe und Bezeichnungen

#### Begriffe

- Lage: Bezeichnet ein Brett innerhalb eines Brettsperrholzbauteils über die Höhe des Querschnitts  
 Lamelle: Bezeichnet ein Brett innerhalb eines Brettsperrholzbauteils über die Breite des Querschnitts  
 Längslage: Bezeichnet eine Lage innerhalb eines Brettsperrholzbauteils, deren Faserlauf parallel zur Spannrichtung des Trägers verläuft  
 Querlage: Bezeichnet eine Lage innerhalb eines Brettsperrholzbauteils, deren Faserlauf senkrecht zur Spannrichtung des Trägers verläuft  
 S10+ Bretter die mindestens zur Sortierklasse S10 und besser nach DIN 4074-1 [N2] gehören

#### Allgemeine Bezeichnungen

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
$\rho_u$	Feucht-Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_0$	Darr-Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>
KZV	Keilzinkenverbindung	—
$f_{m,j}$	Einzelwert der Keilzinkenbiegefestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,mean,j}$	Mittelwert der Keilzinkenbiegefestigkeit einer Stichprobe	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,k,j}$	5%-Quantilwert der Keilzinkenbiegefestigkeit einer Stichprobe	N/mm <sup>2</sup>
$f_{t,0,j}$	Einzelwert der Keilzinkenzugfestigkeit parallel zur Faser	N/mm <sup>2</sup>
$f_{t,0,mean,j}$	Mittelwert der Keilzinkenzugfestigkeit parallel zur Faser	N/mm <sup>2</sup>
$f_{t,0,k,j}$	5%-Quantilwert der Keilzinkenzugfestigkeit parallel zur Faser	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,c}$	Einzelwert der Bauteilbiegefestigkeit für Bauteil ohne Keilzinkenverbindung	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,mean,c}$	Mittelwert der Bauteilbiegefestigkeit für Bauteil ohne Keilzinkenverbindung	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,k,c}$	5%-Quantilwert der Bauteilbiegefestigkeit für Bauteil ohne Keilzinkenverbindung	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,c,j}$	Einzelwert der Bauteilbiegefestigkeit für Bauteil mit Keilzinkenverbindung	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,mean,c,j}$	Mittelwert der Bauteilbiegefestigkeit für Bauteil mit Keilzinkenverbindung	N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,k,c,j}$	5%-Quantilwert der Bauteilbiegefestigkeit für Bauteil mit Keilzinkenverbindung	N/mm <sup>2</sup>
QL	Querlage	—
LL	Längslage	—
FE	Finite-Element	
i	Index für die Nummerierung einer Lage innerhalb des Brettsperrholzträgers	—
j	Index für die Nummerierung einer Lamellenschicht inner halb des Brettsperrholzträgers	—
Opt.	Bezeichnung der Optimierung nach welchen veränderlichen optimiert wurde	—
BM	Bezeichnung des Berechnungsmodells	—
BSP	Brettsperrholz	—
BSH	Brettschichtholz	—
D	Gesamtdicke des Brettsperrholzträgers	mm
d	Dicke einer einzelnen Lage des Brettsperrholzträgers	mm
G	Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>
$G_R$	Rollschubmodul	N/mm <sup>2</sup>
b	Breite einer Lamellenschicht	mm
B	Gesamtbreite des Brettsperrholzträgers	mm

**Statistische Bezeichnungen**

Abkürzung	Bezeichnung
R	Korrelationskoeffizient
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$s_R$	Standardabweichung des Residuums
$x_{\text{mean}}$	Mittelwert der Stichprobe
$x_k$	5%-Quantilwert der Stichprobe
min	Minimaler Wert der Stichprobe
max	Maximaler Wert der Stichprobe
v	Variationskoeffizient der Stichprobe
$s_x$	Standardabweichung der Stichprobe
$k_n$	Beiwert zur Berücksichtigung des Stichprobenumfangs für Ermittlung des 5%-Quantilwertes

**3.2 Ausgangsmaterial für die Versuche**

Für die Versuche wurden Bretter mit den Querschnitten  $b/t = 150/27$  mm und  $b/t = 150/17$  mm nach DIN 4074-1 [N2] entsprechend den Anforderungen für die Sortierkriterien der Sortierklasse S10 visuell sortiert, wobei auch Bretter mit kleineren Ästen berücksichtigt wurden, die eigentlich der Sortierklasse S13 angehören. Für diese visuell sortierten Bretter wird im Rahmen dieser Arbeit die so genannte Sortierklasse S10+ eingeführt.

Die Zuordnung zur zugehörigen Festigkeitsklasse C24 erfolgte entsprechend DIN EN 1912 [N9]. Für die Versuche zur Ermittlung der Biegefestigkeit wurden außerdem Bretter verwendet, die maschinell nach DIN 4074-1 [N2] sortiert wurden und ebenfalls in die Festigkeitsklasse C24 nach DIN EN 1912 fielen. Sie hatten die gleichen Querschnitte wie die visuell sortierten Bretter.

Nach der Auswahl des Grundmaterials erfolgte die Fertigung der Prüfkörper nach speziellen Gesichtspunkten für die einzelnen Versuche. Der Aufbau der Versuchskörper ist in den jeweils zugehörigen Versuchen beschrieben.

**3.3 Vorgehen zur Ermittlung der Steifigkeits<sup>1</sup>- und Festigkeitskennwerte**

Mit den gemessenen Kräften und Durchbiegungen wurden für alle Bauteilbiegeprüfkörper der Abschnitte 3.5 und 3.6 die Steifigkeitskennwerte (Elastizitäts- und Schubmodul) und Festigkeiten nach den beiden mechanischen Modellen der Tabelle 3-1 berechnet:

**Tabelle 3-1 Beschreibung der mechanischen Berechnungsmodelle für die Auswertung**

Berechnungsmodell	Beschreibung
Balken	Berechnung nach Balkentheorie unter Berücksichtigung der Schubverformung [42]
Schub	Berechnung mit dem Schubanalogieverfahren [49]

Die für beide Berechnungsmodelle notwendige Biege- und Schubsteifigkeit wurde nach den Formeln D.2 und D.8 der DIN 1052 [N1] berechnet. In diese Formeln geht der Elastizitätsmodul  $E_0$  und der Schubmodul  $G$  bzw. Rollschubmodul  $G_R$  der einzelnen Lagen ein. Da diese Werte jedoch nicht bekannt waren, mussten sie nach jedem Versuch über eine Optimierung iterativ ermittelt werden. Für den Optimierungsprozess wurde die Methode der kleinsten Abstandsquadrate gewählt und sah dabei wie folgt aus:

<sup>1</sup> Elastizitäts- und Schubmodul

1. Ermittlung der Differenz zwischen gemessenen und berechneten Durchbiegungswerten
2. Quadrieren und addieren der Differenzen
3. Variation von  $E_0$  bzw.  $E_0$  und  $G_R$  bis sich für die Summe der Differenzen ein Minimum ergibt

Welche Werte bei den beiden Optimierungen variiert und welche fixiert waren ist in der Tabelle 3-2 angegeben.

**Tabelle 3-2      Angabe der variierten und fixierten Werte für die verschiedenen Optimierungen**

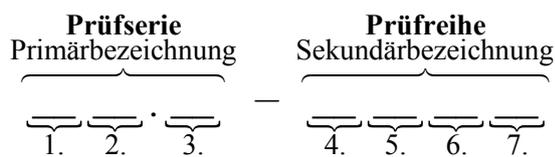
Bezeichnung der Optimierung	Variierte Werte		Fixierte Werte		
			$E_{90}$	G	$G_R$
„ $E_0$ “	$E_0$	—	0	690	69
„ $E_0, G_R$ “	$E_0$	$G_R$	0	690	—

Für die Optimierung „ $E_0, G_R$ “ wurde vorgegeben, dass der Rollschubmodul  $G_R$  innerhalb festgelegter Grenzen liegen muss ( $1 \leq G_R \leq 300$ ). Ohne diese Vorgabe, wären sonst teilweise negative oder extreme hohe Rollschubmodule ermittelt worden, die in Wirklichkeit nicht existieren.

Mit den durch die Optimierung ermittelten Steifigkeitswerten wurden dann die maximalen Biege- (Abschnitt 3.5 und 3.6) ermittelt. Die Formeln zur Berechnung der Spannungen für das Berechnungsmodell „Balken“ sind z.B. in der DIN 1052 [N1] zu finden. Um die Spannungen für das Modell „Schub“ zu ermitteln, wird auf SCHOLZ [49] hingewiesen.

### 3.4      Bezeichnungen für die einzelnen Versuchsreihen

Die nachfolgenden Ausführungen erläutern, welche Bedeutung die einzelnen Abkürzungen für die Bezeichnung der Versuchsreihen haben. Ziel der Bezeichnung für die einzelnen Versuchsreihen war es, den untersuchten Einfluss möglichst direkt und unverkennbar anhand der Abkürzung erkennen zu können. Die Bezeichnung eines Prüfkörpers gliedert sich zunächst in eine Primärbezeichnung gefolgt von einer Sekundärbezeichnung, die durch einen Bindestrich „-“, voneinander getrennt sind. Die Primärbezeichnung gibt die Prüfserie an und die Sekundärbezeichnung die Prüfreihe. Die Nomenklatur hierfür sieht wie folgt aus:



Die Bezeichnung der Prüfserie besteht aus insgesamt 3 Abkürzungen, die die jeweilige Art der Prüfung angeben. Die Abkürzungen hierfür sind in der Tabelle 3-3 angegeben.

Was in der einzelnen Prüfserie untersucht wurde, wird mittels der Bezeichnung für die Prüfreihe angegeben, die sich aus insgesamt 4 Abkürzungen ergibt, deren einzelnen Bedeutungen in der Tabelle 3-4 angegeben sind.

**Tabelle 3-3 Erklärung der Abkürzungen für die Primärbezeichnung der Versuchsreihen**

Bezeichnung Prüfserie	Stelle	Bedeutung
	1.	Überblick über geprüfte Festigkeit 1 = Bauteilbiegefestigkeit ohne Keilzinkungen 2 = Bauteilbiegefestigkeit mit Keilzinkungen 3 = Keilzinkenfestigkeit
	2.	Art des Prüfkörpers B = Bauteilprüfkörper bzw. Keilzinkenprüfkörper zugehörig zum Bauteil K = Keilzinkenprüfkörper
	3.	Ermittelte Festigkeit B = Biegefestigkeit Z = Zugfestigkeit

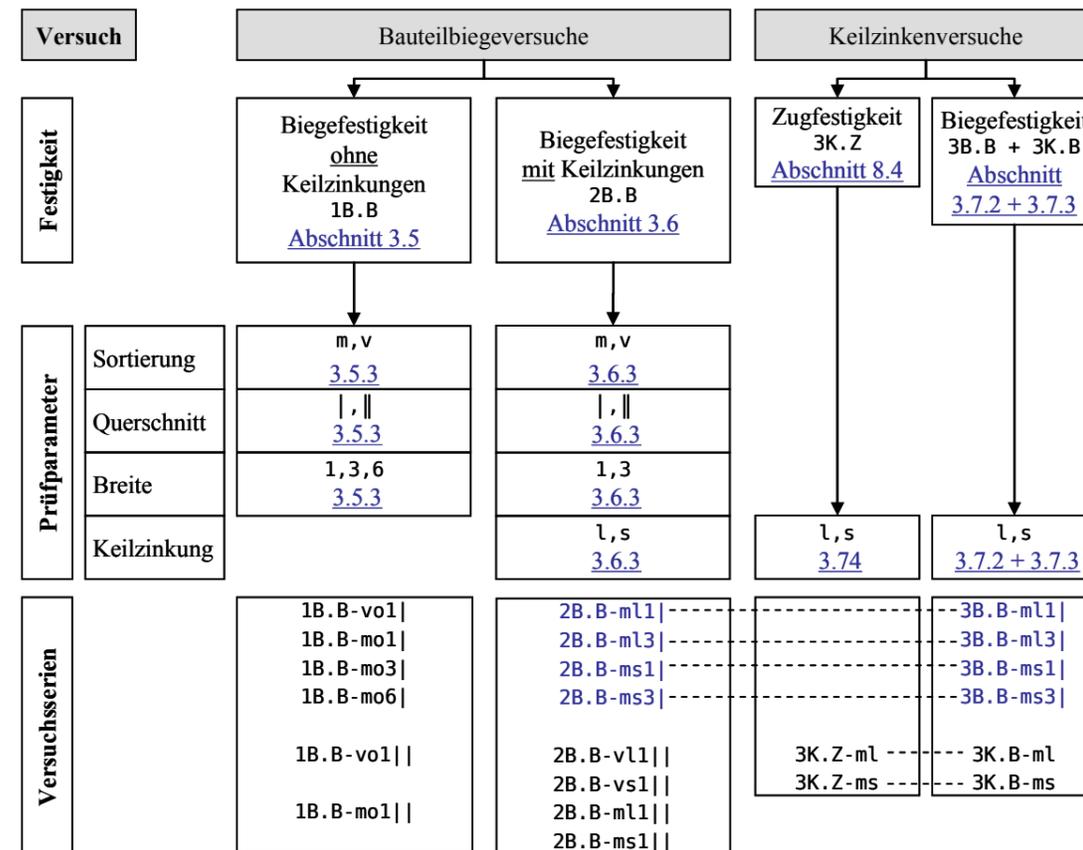
**Tabelle 3-4 Erklärung der Abkürzungen für die Sekundärbezeichnung der Versuchsreihen**

		für <b>Prüfserien</b> mit Anfangszahl 1 = Bauteilbiegefestigkeit ohne KZV 2 = Bauteilbiegefestigkeit mit KZV 3 = Keilzinkenfestigkeit	
4.	Sortierung	v = visuelle Sortierung m = maschinelle Sortierung	
5.	Keilzinkung	o = ohne Keilzinkung l = liegende Keilzinkung s = stehende Keilzinkung	
6.	Breite	1 = 1 nn <sup>2</sup> liegende Lamelle = B = 150 mm 3 = 3 nn <sup>2</sup> liegende Lamellen = B = 450 mm 6 = 6 nn <sup>2</sup> liegende Lamellen = B = 900 mm	
7.	Querschnitt	= 1 ün <sup>3</sup> liegende Lamelle = 1 = QS 125    = 2 ün <sup>3</sup> liegende Lamellen = 2 = QS 129	
Nur für <b>Keilzinkenprüfkörper</b> der Serie <b>3B.B<sup>4</sup></b> relevant			
6.	Breite	1 = 1 nn <sup>2</sup> liegende Lamelle = B = 150 mm 3 = 3 nn <sup>2</sup> liegende Lamellen = B = 450 mm	Zugehörigkeit Keilzinkenproben gehören zu Bauteilprüfkörpern mit der gleichen entsprechenden Bedeutung (Bedeutung siehe links)
7.	Querschnitt	= 1 ün <sup>3</sup> liegende Lamelle = 1 = QS 125	

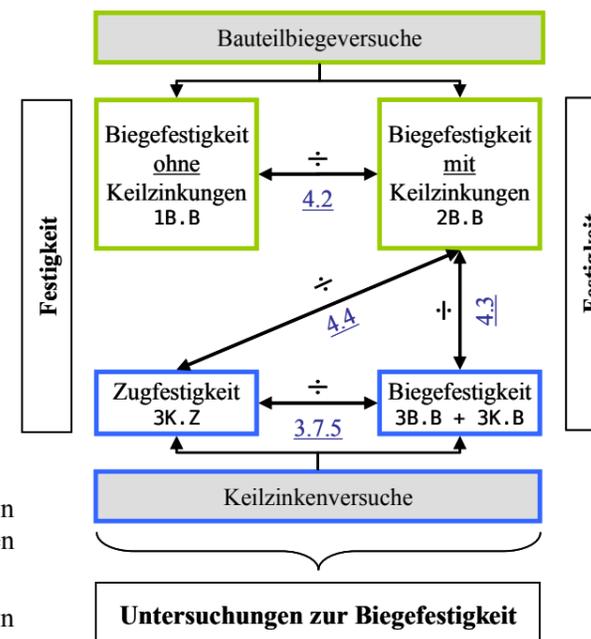
<sup>1</sup> KZV = Keilzinkenverbindung    <sup>2</sup> nn = nebeneinander    <sup>3</sup> ün = übereinander + parallel  
<sup>4</sup> Keilzinkenprüfkörper zugehörig zur Prüfserie 2B.B (Bauteilbiegefestigkeit mit Keilzinkungen)

Eine Zusammenstellung der untersuchten Einflüsse ist in Bild 3-1 angegeben. Bei den in diesem Bild angegebenen Abkürzungen handelt es sich um Teile der Prüfkörperbezeichnungen die zur Identifikation der verschiedenen untersuchten Einflüsse dienen.

Welche Versuchsergebnisse untereinander verglichen wurden, um die zuvor beschriebenen Einflüssen zu ermitteln ist in Bild 3-2 dargestellt.



**Bild 3-1 Übersicht der untersuchten Prüfparameter auf die Tragfähigkeit von Brettsperthölzern**  
----- bedeutet zugehörig zueinander



**Bild 3-2 Zusammenstellung der zu vergleichenden Versuchsreihen zur Ermittlung der verschiedenen Einflussparameter auf die Tragfähigkeit von Brettsperthölzern**

Leerseite

Um die einzelnen Abkürzungen besser verstehen zu können, werden nachfolgend ein paar Beispiele für Prüfkörper Bezeichnungen und deren Bedeutung angegeben.

• Beispiel 1: **1B.B-vo1**||

Bezeichnung Prüfserie	1. Stelle – Überblick geprüfte Festigkeit: 1 = Bauteilbiegefestigkeit ohne Keilzinkung
	2. Stelle – Art des Prüfkörpers: B = Bauteilprüfkörper
	3. Stelle – Ermittelte Festigkeit: B = Biegefestigkeit
Bezeichnung Prüfreihe	4. Stelle – Sortierung: v = visuelle Sortierung
	5. Stelle – Keilzinkung: o = ohne Keilzinkung
	6. Stelle – Breite: 1 = 1 nn <sup>1</sup> liegende Lamelle (B = 150 mm)
	7. Stelle – Querschnitt:    = 2 ün <sup>2</sup> liegende Lamellen (QS 129)

• Beispiel 2: **3B.B-ms3** |

Bezeichnung Prüfserie	1. Stelle – Überblick geprüfte Festigkeit: 3 = Keilzinkenfestigkeit
	2. Stelle – Art des Prüfkörpers: B = Keilzinkenprüfkörper zugehörig zum Bauteil
	3. Stelle – Ermittelte Festigkeit: B = Biegefestigkeit
Bezeichnung Prüfreihe	4. Stelle – Sortierung: m = maschinelle Sortierung
	5. Stelle – Keilzinkung: s = stehend Keilzinkung
	6. Stelle – Breite: 3 = 3 nn <sup>1</sup> liegende Lamellen (B = 450 mm)
	7. Stelle – Querschnitt:   = 1 ün <sup>2</sup> liegende Lamelle (QS 125)

• Beispiel 3: **3K.Z-ms**

Bezeichnung Prüfserie	1. Stelle – Überblick geprüfte Festigkeit: 3 = Keilzinkenfestigkeit
	2. Stelle – Art des Prüfkörpers: K = Keilzinkenprüfkörper
	3. Stelle – Ermittelte Festigkeit: Z = Zugfestigkeit
Bezeichnung Prüfreihe	4. Stelle – Sortierung: m = maschinelle Sortierung
	5. Stelle – Keilzinkung: s = stehende Keilzinkung

<sup>1</sup> nn = nebeneinander

<sup>2</sup> ün = übereinander + parallel

## 3.5 Versuche zur Biegefestigkeit von Bauteilen ohne Keilzinkenverbindungen (1B.B)

### 3.5.1 Prüfprogramm, Prüfaufbau

Das Versuchsprogramm umfasst insgesamt 6 Versuchsreihen mit jeweils verschieden aufgebauten Prüfkörpern. Eine Übersicht des Prüfprogramms ist in Tabelle 3-5 wiedergegeben.

**Tabelle 3-5 Zusammenfassung des Prüfprogramms**

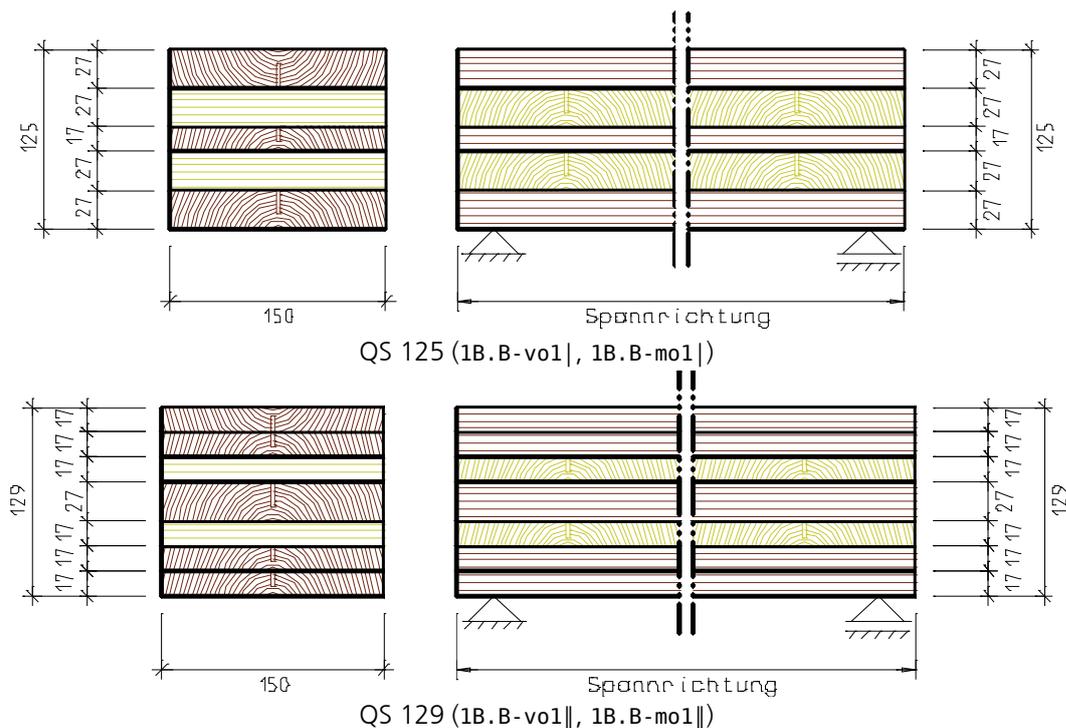
Bezeichnung	Sortierung	Keilzinkung	Breite B [mm]	Querschnitt	Anzahl Prüfkörper
1B.B-vo1	visuell	ohne	150 <sup>1</sup>	QS 125 <sup>4</sup>	25
1B.B-mo1	maschinell	ohne	150 <sup>1</sup>	QS 125 <sup>4</sup>	25
1B.B-mo3	maschinell	ohne	450 <sup>2</sup>	QS 125 <sup>4</sup>	10
1B.B-mo6	maschinell	ohne	900 <sup>3</sup>	QS 125 <sup>4</sup>	10
1B.B-vo1	visuell	ohne	150 <sup>1</sup>	QS 129 <sup>5</sup>	25
1B.B-mo1	maschinell	ohne	150 <sup>1</sup>	QS 129 <sup>5</sup>	25

<sup>1</sup> 150 = 1 nebeneinander liegendes Brett quer zur Spannrichtung des Prüfkörpers  
<sup>2</sup> 450 = 3 nebeneinander liegende Bretter quer zur Spannrichtung des Prüfkörpers  
<sup>3</sup> 900 = 6 nebeneinander liegende Bretter quer zur Spannrichtung des Prüfkörpers  
<sup>4</sup> QS 125 = 1 faserparallele Lage  
<sup>5</sup> QS 129 = 2 faserparallele Lagen

- Geprüfte Querschnitte

Untersucht wurden zwei Arten von Querschnitten – QS 125 und QS129.

Der Unterschied der beiden Querschnitte liegt in der Anzahl der parallel verlaufenden Decklagen (QS 125 eine, QS 129 zwei). Für beide Querschnitte wurden Prüfkörper hergestellt, die sowohl aus visuell als auch maschinell sortierten Brettern bestanden. Die Breiten der Prüfkörper betragen jeweils 150 mm.



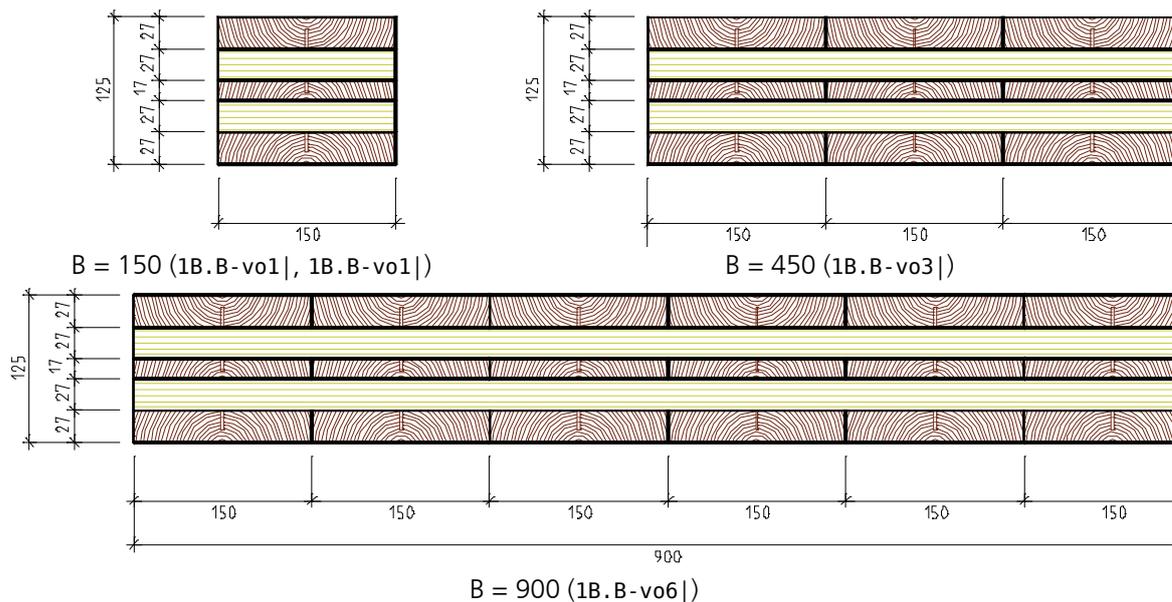
**Bild 3-3 Aufbau der verschiedenen Querschnitte**

• Geprüfte Breiten

Die Breiten der einzelnen Prüfkörper lagen bei 150 mm, 450 mm und 900 mm. Da die Breite eines einzelnen Brettes 150 mm betrug, ergibt sich für die unterschiedlichen Bauteilbreiten folgende Anzahl nebeneinander liegender Bretter:

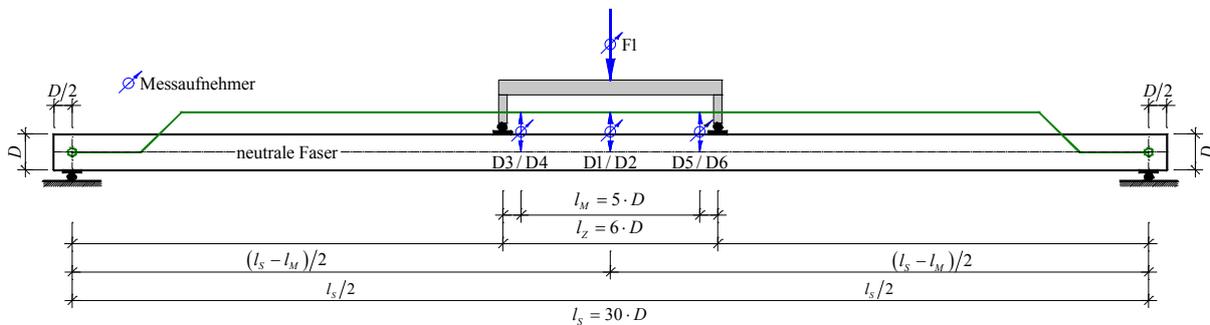
Breite B [mm]	Anzahl nebeneinander liegender Bretter quer zur Spannrichtung
150	1
450	3
900	6

Zum besseren Verständnis sind die Prüfkörper mit den unterschiedlichen Breiten in Bild 3-4 dargestellt. Als Ausgangsmaterial für die Prüfkörper, wurde maschinell sortiertes Holz verwendet. Die 150 mm breiten Prüfkörper wurden einmal aus maschinell und einmal aus visuell sortierten Brettern gefertigt.



**Bild 3-4 Breiten der untersuchten Prüfkörper**

Die Biegeprüfungen der Brettsperrholzelemente wurden in Anlehnung an DIN EN 408 [N7] durchgeführt (siehe Bild 3-5). Der Elastizitätsmodul wurde mittels der Durchbiegungen ungefähr in den „Drittelpunkten“ (querkraftfreier Bereich) sowie in der Mitte berechnet.



**Bild 3-5 Prüfaufbau der Biegeprüfungen für Brettsperrholzelemente ohne Keilzinkenverbindungen**

### 3.5.2 Versuchsergebnisse

#### Anmerkungen zu den Berechnungsmethoden und zu den verwendeten Versuchswerten

Ein Vergleich der berechneten Einzelwerte der Biegespannungen und den daraus ermittelten statistischen Werten für die verschiedenen Berechnungsmethoden zeigt, dass die Art der Berechnung keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die Abweichungen für die verschiedenen Berechnungsmethoden liegen unter 1%. Wegen diesen sehr geringen Unterschieden in der Art der Ergebnisermittlung werden für die weiteren Betrachtungen nur noch die Ergebnisse nach dem Modell „Balken –  $E_0$ ,  $G_R$ “<sup>1</sup> herangezogen. Die Einzelwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden sind in Diagramm F-33 bis Diagramm F-38 im Anhang F.1 angegeben. Die maximalen Prüfkkräfte für die einzelnen Prüfkörper enthält der Anhang E.1.

Bei den Prüfkörpern konnten folgende drei Versagensarten festgestellt werden:

- Biegezugversagen  
Überschreitung der „Biege-Zugfestigkeit“ der äußersten Lamelle im Zugbereich
- Rollschubversagen  
Überschreitung der Rollschubfestigkeit in einer Querlage
- Biegedruckversagen  
Überschreitung der „Biege-Druckfestigkeit“ der äußersten Lamelle im Druckbereich mit anschließendem „Fließen“ und geringer Laststeigerung bis zum Biegezug- oder Rollschubversagen

Manche Zuglamellen der Prüfkörper hatten Faserabweichungen, die zu einem vorzeitigen Versagen führten. Prüfkörper die eine Faserabweichung hatten sowie Prüfkörper mit Rollschub- oder Biegedruckversagen werden im Folgenden als „Ausreißer“ bezeichnet. Die berechneten Festigkeiten wurden mittels einer Log-Normalverteilung statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse mit Berücksichtigung dieser Ausreißer sind in der Tabelle F-33 und Diagramm F-39 im Anhang F.1 angegeben.

Die Auswertungen der ermittelten Festigkeitswerte ohne Berücksichtigung der „Ausreißer“<sup>2</sup> sind im Abschnitt 3.5.3 angegeben. Diese Auswertung unter Einbeziehung der „Ausreißer“ (siehe Anhang D) zeigt, dass einzelne Versuchswerte deutlich von den anderen Werten abweichen. Diese Abweichungen müssen vor einer weiteren Bewertung der Ergebnisse einzeln beurteilt und diskutiert werden, warum sie für nachfolgende Betrachtungen außer Acht bleiben. Diese Beurteilungen und Diskussion sind im Anhang D beschrieben. Anhand dieser Erläuterungen ergeben sich dann die eigentlichen Versuchswerte für die weiteren Untersuchungen, die im nachfolgenden Abschnitt angegeben sind. Im Abschnitt 3.5.3 werden die Ergebnisse für die verschiedenen Einflussparameter vorgestellt und hierzu auf die Versuchswerte aus Abschnitt 0 zurückgegriffen.

---

<sup>1</sup> Als mechanisches Modell wurde bei dieser Berechnung ein normales Balkenmodell zugrunde gelegt, wobei der Aufbau des Querschnitts bei der Biegesteifigkeit und Schubsteifigkeit berücksichtigt wurde. Für die Ermittlung der Ergebnisgrößen wurden bei diesem Berechnungsmodell sowohl der Elastizitätsmodul der Längslagen als auch der Rollschubmodul der Querlagen variiert.

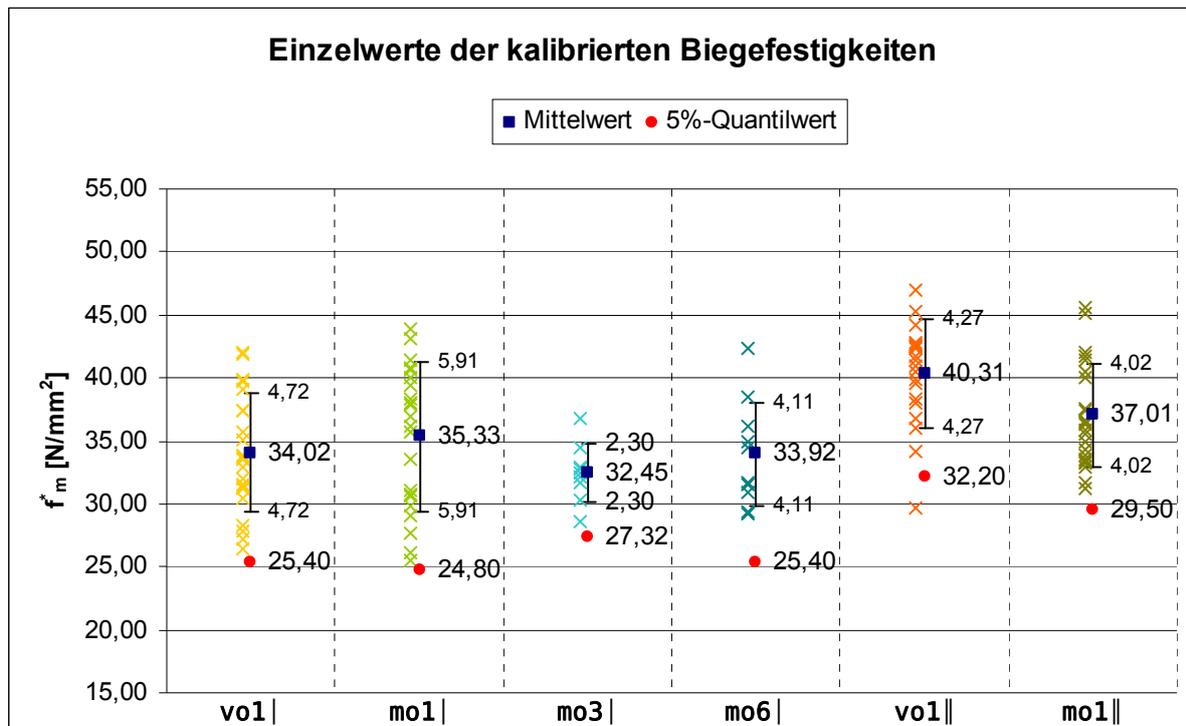
<sup>2</sup> Faserabweichungen, Rollschubversagen oder Biege-Druckversagen

**Verwendete Ergebnisse für die Auswertung der verschiedenen Parameter**

**Tabelle 3-6** Statistische Werte der „Rohdichte angepassten“ Biegefestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte)

Statistischer Wert	1B.B vo1   <sup>1</sup>	1B.B mo1   <sup>2</sup>	1B.B mo3   <sup>3</sup>	1B.B mo6   <sup>4</sup>	1B.B vo1    <sup>5</sup>	1B.B mo1    <sup>6</sup>
Anzahl n	22	22	9	10	20	23
Minimum $x_{min}$	26,50	25,56	28,63	29,23	29,62	31,24
Maximum $x_{max}$	42,00	43,95	36,73	42,32	46,92	45,60
Mittelwert $x_m$	34,02	35,33	32,45	33,92	40,31	37,01
Standardabweichung $s_x$	4,72	5,91	2,30	4,11	4,27	4,02
Variationskoeffizient $v_x$	13,9%	16,7%	7,1%	12,1%	10,6%	10,9%
Beiwert Anzahl $k_n$ <sup>a)</sup>	2,05	2,05	2,40	2,34	2,07	2,04
5%-Quantilwert $x_{05}$ <sup>a)</sup>	25,40	24,80	27,32	25,40	32,20	29,50

<sup>1</sup> 1B.B-vo1| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - visuell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>2</sup> 1B.B-mo1| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>3</sup> 1B.B-mo3| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - drei nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>4</sup> 1B.B-mo6| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - sechs nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>5</sup> 1B.B-vo1|| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - visuell sortierte Bretter zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>6</sup> 1B.B-mo1|| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>a)</sup> Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)



**Diagramm 3-1** Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte) 1B.B-vo1|, 1B.B-mo1|, 1B.B-mo3|, 1B.B-mo6|, 1B.B-vo1||, 1B.B-mo1||

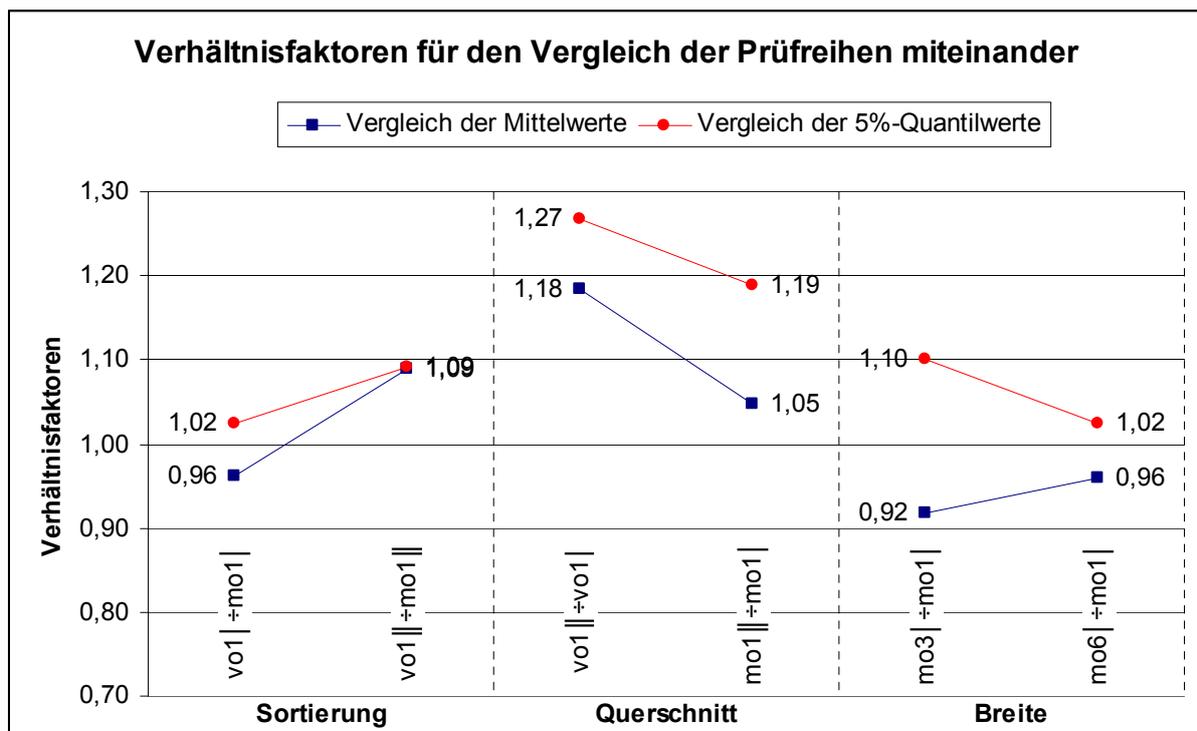
Mit den aus diesen Einzelwerten gewonnenen Mittelwerten und 5%-Quantilwerten werden nun die einzelnen Versuchsreihen miteinander verglichen. Dieser Vergleich soll Aufschluss über die verschiedenen Einflüsse (siehe Abschnitt 2.4) und deren Größenordnung geben. Nach welchen Gesichtspunkten die verschiedenen Versuchsreihen miteinander verglichen werden ist in der Tabelle 3-7 angegeben. Die Ergebnisse (Verhältnissfaktoren) der einzelnen Untersuchungen sind im Diagramm 3-2 dargestellt.

**Tabelle 3-7 Übersicht der untersuchten Einflussgrößen auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperthölzern ohne Keilzinkenverbindungen**

Untersuchter Einfluss	Vergleich			Beschreibung
	von		mit	
Sortierverfahren	vo1	÷	mo1	Mit dem untersuchten Einfluss „Sortierverfahren“ soll untersucht werden, ob die Art, wie die Lamellen sortiert wurden (visuell, maschinell) Einfluss auf die Biegetragfähigkeit von Brettspertholz ohne Keilzinkenverbindungen hat.
	vo1	÷	mo1	
Querschnittsaufbau	vo1	÷	vo1	Mit dem untersuchten Einfluss „Querschnittsaufbau“ soll untersucht werden, ob die Biegetragfähigkeit von Brettspertholz ohne Keilzinkenverbindungen von der Anzahl der Decklamellen (eine oder zwei) abhängt.
	mo1	÷	mo1	
Bauteilbreite	mo3	÷	mo1	Mit dem untersuchten Einfluss „Bauteilbreite“ soll untersucht werden, ob die Biegetragfähigkeit von Brettspertholz ohne Keilzinkenverbindungen von der Anzahl der nebeneinander liegenden Lamellen (eine, drei oder sechs) abhängt.
	mo6	÷	mo1	

### 3.5.3 Ergebnisse für die verschiedenen Parameter

#### Verhältnissfaktoren für die verschiedenen Parameter



**Diagramm 3-2 Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Prüfreihen miteinander der Prüferserie 1B.B**

Die Verhältnissfaktoren aus dem Diagramm 3-2 ergeben sich aus den Mittel- und 5%-Quantilwerten der Tabelle 3-6 bzw. aus dem Diagramm 3-1.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Verhältnissfaktoren diskutiert und bewertet.

**Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Sortierung“**

Vergleich der visuellen mit maschineller Sortierung  
 (1B.B-vo1| ÷ 1B.B-mo1| , 1B.B-vo1|| ÷ 1B.B-mo1||)

Die Verhältnisfaktoren für den Mittelwert und den 5%-Quantilwert sind in der Tabelle 3-8 angegeben.

**Tabelle 3-8 Verhältnisfaktoren für den Vergleich visuelle/maschinelle Sortierung der Prüferie 1B.B**

Vergleich		Verhältnis für	
von	mit	Mittelwert	5%-Quantilwert
vo1	÷ mo1	0,96	1,02
vo1	÷ mo1	1,09	1,09

Folgende Erkenntnisse liefert der Vergleich der Reihen vo1| ÷ mo1| und vo1|| ÷ mo1|| (siehe Tabelle 3-6, Diagramm 3-2 und Tabelle 3-8):

Vergleich von	Ergebnisse der Verhältnisfaktoren	Punkt
vo1  ÷ mo1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	1
	Beide Verhältnisfaktoren kleiner als beim Vergleich vo1   ÷ mo1	2
vo1   ÷ mo1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert gleich groß	3

*Erläuterung zu Punkt 1:*

Der Grund für die unterschiedlichen Größen der Verhältnisfaktoren liegt in den verschiedenen Standardabweichung bzw. Variationskoeffizienten der beiden Versuchsreihen (vo1|:  $V_x = 13,9\%$ , mo1|:  $V_x = 16,7\%$ ). Mit zunehmender Anzahl an Versuchskörpern würden sich die Verhältniswerte für Mittel- und 5%-Quantilwert angleichen.

*Erläuterung zu Punkt 2:*

Wie im Anhang B.3.1 erwähnt, mussten die ermittelten Festigkeiten aufgrund der unterschiedlichen mittleren Rohdichten der einzelnen Versuchsreihen auf ein einheitliches Niveau der Rohdichten umgerechnet werden. In diesem Abschnitt wurde auch erläutert, warum für die Umrechnung die Biegefestigkeiten und Rohdichten der einzelnen Festigkeitsklassen der DIN EN 338 [N4] verwendet wurden. Die damit ermittelte Korrektur Gleichung kann lediglich als eine Näherung angesehen werden, um überhaupt eine Möglichkeit zu schaffen, die Festigkeitswerte der einzelnen Versuchsreihen auf ein einheitliches Niveau der Rohdichten umzurechnen.

Die Abweichungen der mittleren Rohdichten von der Bezugsrohddichte ( $420 \text{ kg/m}^3$ ) fallen für die einzelnen Versuchsreihen unterschiedlich groß aus (siehe Diagramm B-2). Die größte Abweichung ist bei der Versuchsreihe vo1|| (+9,4%) festzustellen.

Aufgrund der verwendeten Näherungsformel und der großen Abweichung der Rohdichte der Versuchsreihe vo1||, fällt der Fehler bei der Umrechnung der Festigkeitswerte dieser Versuchsreihe auch deutlich größer aus, als bei den anderen Versuchsreihen. Somit sind auch die Unterschiede bei den Verhältnisfaktoren zu erklären.

*Erläuterung zu Punkt 3:*

Da die Variationskoeffizienten der Versuchsreihen mit dem Querschnitt QS 129 nahezu identisch sind (vo1||:  $V_x = 10,6\%$ , mo1||:  $V_x = 10,9\%$ ) fallen damit auch die Verhältnisfaktoren für Mittel- und 5%-Quantilwert gleich groß aus.

**Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Querschnitt“**

Vergleich der Querschnittsaufbauten ( $1B.B-vo1 \parallel \div 1B.B-vo1 \mid$ ,  $1B.B-mo1 \parallel \div 1B.B-mo1 \mid$ )

Tabelle 3-9 enthält die Verhältnisfaktoren für den Vergleich der verschiedenen Querschnitte.

**Tabelle 3-9 Verhältnisfaktoren für den Vergleich der Querschnittsaufbauten der Prüferserie 1**

Vergleich		Verhältnis für	
von	mit	Mittelwert	5%-Quantilwert
vo1	÷ vo1	1,18	1,27
mo1	÷ mo1	1,05	1,19

Beim Vergleich der beiden Querschnittstypen miteinander ( $vo1 \parallel \div vo1 \mid$  und  $vo1 \parallel \div vo1 \mid$ ) lässt sich folgendes feststellen (siehe Tabelle 3-6, Diagramm 3-2 und Tabelle 3-9):

Vergleich von	Ergebnisse der Verhältnisfaktoren	Punkt
vo1  ÷vo1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	1
	Beide Verhältnisfaktoren größer als beim Vergleich mo1  ÷mo1	2
mo1  ÷mo1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	3

*Erläuterung zu Punkt 1 und 3:*

Der Grund für die unterschiedlichen Größen der Verhältnisfaktoren liegt in den verschiedenen Standardabweichung bzw. Variationskoeffizienten der Versuchsreihen ( $vo1 \parallel$ :  $V_x = 10,6\%$ ,  $vo1 \mid$ :  $V_x = 13,9\%$ ,  $mo1 \parallel$ :  $V_x = 10,9\%$ ,  $mo1 \mid$ :  $V_x = 16,7\%$ ). Mit zunehmender Anzahl an Versuchskörpern würden sich die Verhältniswerte für Mittel- und 5%-Quantilwert angleichen.

*Erläuterung zu Punkt 2:*

Der deutliche Unterschied zwischen  $vo1 \parallel \div vo1 \mid$  und  $mo1 \parallel \div mo1 \mid$  bei den Verhältnisfaktoren hängt mit der verwendeten Näherungsformel zur Umrechnung der Festigkeiten sowie der großen Abweichung der Rohdichte der Versuchsreihe  $vo1 \parallel$  von der Bezugsrohddichte ( $420 \text{ kg/m}^3$ ) zusammen. Hierzu sei auch auf Anhang B.3.1 hingewiesen.

**Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Breiten“**

Vergleich der Bauteilbreiten ( $1B.B-mo3 \mid \div 1B.B-mo1 \mid$ ,  $1B.B-mo6 \mid \div 1B.B-mo1 \mid$ )

Eine Zusammenfassung der Verhältnisfaktoren für die Prüfkörper mit unterschiedlichen Breiten enthält Tabelle 3-10.

**Tabelle 3-10 Verhältnisfaktoren für den Vergleich der Bauteilbreiten der Prüferserie 1B.B**

Vergleich		Verhältnis für	
von	mit	Mittelwert	5%-Quantilwert
mo3	÷ mo1	0,92	1,10
mo6	÷ mo1	0,96	1,02

Beim Vergleich der Verhältnisfaktoren für die Bauteile mit unterschiedlichen Breiten ( $mo3 \mid \div mo1 \mid$  und  $mo6 \mid \div mo1 \mid$ ) ist folgendes festzustellen (siehe Tabelle 3-6, Diagramm 3-2 und Tabelle 3-10):

Vergleich von	Ergebnisse der Verhältnisfaktoren	Punkt
mo3 ÷mo1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	1
mo6 ÷mo1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	2
	Mittelwert ist größer als beim Vergleich mo3 ÷mo1	3
	5%-Quantilwert ist kleiner als beim Vergleich mo3 ÷mo1	4

*Erläuterung zu Punkt 1 und 2:*

Die Unterschiede bei den Verhältnisfaktoren für die Mittel- und 5%-Quantilwerte ergeben sich aufgrund der verschiedenen Variationskoeffizienten ( $mo1 \mid$ :  $16,7\%$ ,  $mo3 \mid$ :  $7,1\%$  und  $mo6 \mid$ :  $12,1\%$ ). Mit zunehmender Anzahl an Versuchskörpern würden sich die Verhältniswerte für Mittel- und 5%-Quantilwert angleichen.

Erläuterung zu Punkt 3 und 4:

Dass bei dem Vergleich  $mo6| \mp mo1|$  der Mittelwert zwar größer, der 5%-Quantilwert jedoch kleiner ausfällt als bei  $mo3| \mp mo1|$ , hängt mit der wesentlich geringeren Streuung der Versuchswerte der Versuchsreihe  $mo3|$  zusammen.

### 3.5.4 Zusammenfassung

Nachfolgend sind die Größenordnungen der ermittelten Ergebnisse für die einzelnen Versuchsreihen angegeben.

**Tabelle 3-11 Zusammenfassung der Ergebnisse für die verschiedenen Einflüsse für die Prüferserie 1B.B**

Querschnitt	QS 125				QS 129	
	vo1	mo1	mo3	mo6	vo1	mo1
Mittelwert E-Modul $E_{0,M}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ca. 13000	ca. 11000			ca. 14000	ca. 11000
Mittelwert Biegefestigkeit $f_{m,c,M}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ca. 34		ca. 32		ca. 37	
5%-Quantilwert $f_{m,c,05}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ca. 24		ca. 26		ca. 30	

#### Einfluss der Sortierung

- E-Modul der visuell sortierten Bretter ist deutlich größer als der E-Modul der maschinell sortierten Bretter
- Sortierung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Biegefestigkeit
- Mittelwerte der Biegefestigkeit sind etwa gleich groß
- 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit sind etwa gleich groß

**Ergebnis:** Sortierverfahren hat **keinen** großen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit

#### Einfluss des Querschnitts

- Querschnitt hat keinen Einfluss auf den E-Modul bzw. Steifigkeit
- Querschnitt hat großen Einfluss auf die Biegefestigkeit
- Mittelwerte der Biegefestigkeiten des Querschnitts QS 129 sind um ca. 9% größer als die des Querschnitts QS 125
- 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der Querschnitts QS 129 sind um ca. 25% größer als die des Querschnitts QS 125

**Ergebnis:** Querschnitt hat **einen** großen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit

#### Laminierungseffekt vorhanden

Die faserparallelen Lagen des Querschnitts QS129 können zusätzliche Belastungen infolge des Ausfalls eines einzelnen Elementes kompensieren (siehe Abschnitt 2.4).

#### Einfluss der Breite

- Breite hat keinen Einfluss auf den E-Modul bzw. Steifigkeit
- Breite hat einen Einfluss auf die Biegefestigkeit
- Bauteilbreite hat keinen Einfluss auf die Mittelwerte der Biegefestigkeiten
- 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für Bauteile mit mehreren nebeneinander liegenden Lamelle sind um ca. 8% größer als die Biegefestigkeiten der Bauteile mit nur einer Lamellenbreite (gültig ab 3 nebeneinander liegenden Lamellen)

**Ergebnis:** Breite hat **einen** geringen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit

#### Systemfaktor vorhanden

## 3.6 Versuche zur Biegefestigkeit von Bauteilen mit Keilzinkenverbindungen (2B.B)

### 3.6.1 Prüfprogramm, Prüfaufbau

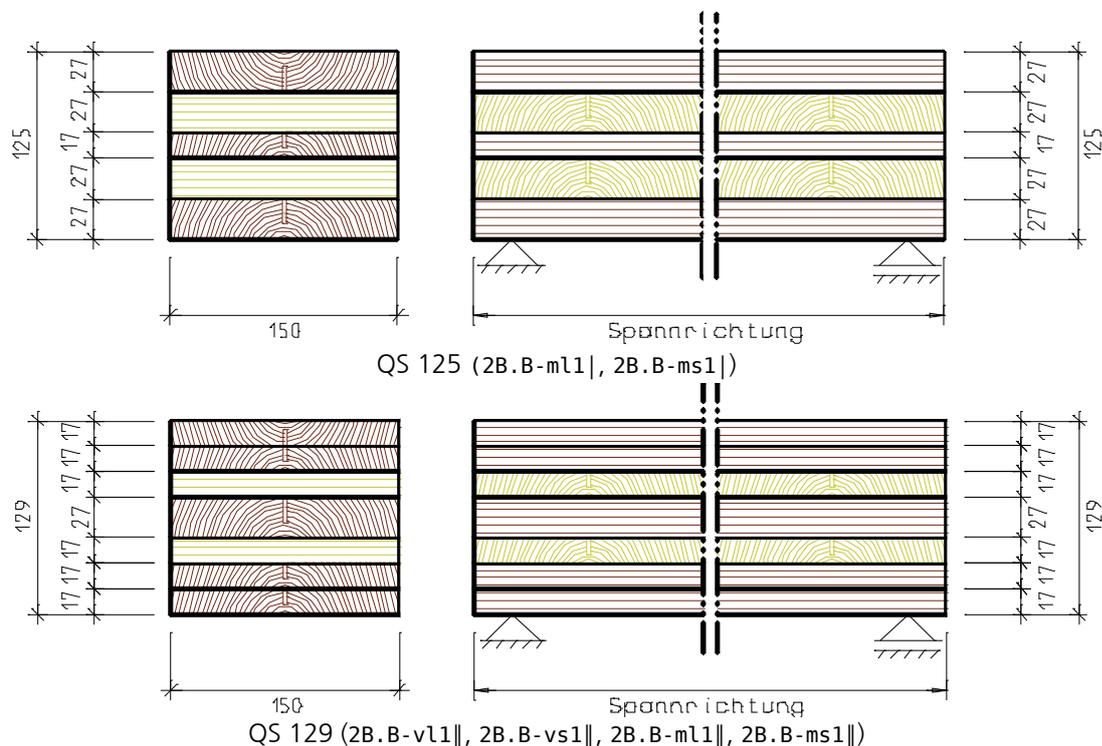
Die Versuche zur Biegefestigkeit von Bauteilen mit Keilzinkenverbindungen gliedern sich in drei Teile. Der erste Teil umfasst Prüfungen an Brettspertholzelementen mit Keilzinkenverbindungen zur Ermittlung der Bauteilbiegefestigkeit. Teil zwei beschäftigt sich mit der Ermittlung der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen, die mit den Festigkeiten der Bauteilversuche verglichen werden. Im letzten Teil werden an Keilzinkenverbindungen die Biege- und die Zugfestigkeit bestimmt, um einen Zusammenhang zwischen den beiden Festigkeiten zu ermitteln.

#### Teil 1 – Bauteilversuche (2B.B)

In Tabelle 3-12 ist das Prüfprogramm zu den Bauteilversuchen (Teil 1) zusammengefasst.

- Geprüfte Querschnitte

Untersucht wurden zwei Arten von Querschnitten (siehe Bild 3-6) – QS 125 und QS 129. Der Unterschied der beiden Querschnitte liegt in der Anzahl der parallel verlaufenden Decklagen (QS 125 eine, QS 129 zwei). Für den Querschnitt QS 129 wurden Prüfkörper hergestellt, die sowohl aus visuell als auch maschinell sortierten Brettern der Sortierklasse S10 bestanden. Die Breiten der Prüfkörper betragen jeweils 150 mm.



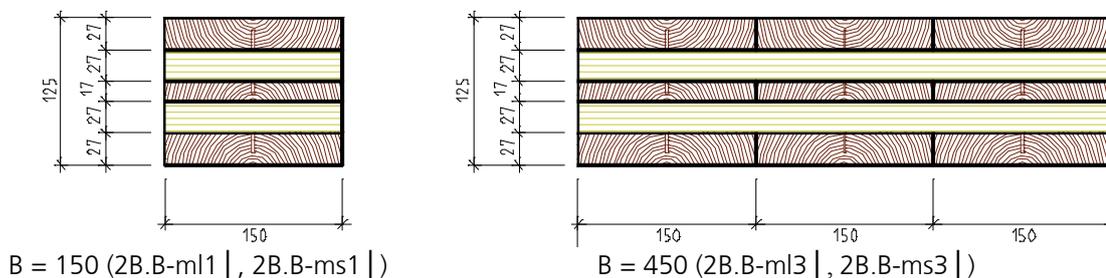
**Bild 3-6** Aufbau der verschiedenen Querschnitte

• Geprüfte Breiten

Die Breiten der einzelnen Prüfkörper betragen 150 mm und 450 mm. Da die Breite eines einzelnen Brettes 150 mm betrug, ergibt sich für die unterschiedlichen Bauteilbreiten folgende Anzahl nebeneinander liegender Bretter:

Breite B [mm]	Anzahl nebeneinander liegender Bretter
150	1
450	3

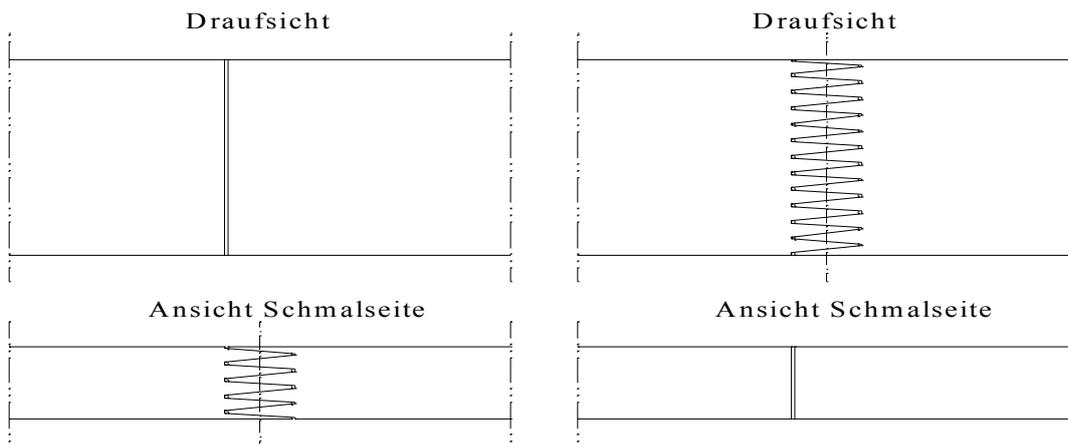
Die Prüfkörper mit den unterschiedlichen Breiten sind in Bild 3-7 dargestellt. Als Ausgangsmaterial für die Prüfkörper, wurde maschinell sortiertes Holz der Sortierklasse S10 verwendet.



**Bild 3-7 Breiten der untersuchten Prüfkörper**

• Geprüfte Keilzinken

Die oben vorgestellten Prüfkörper wurden außerdem noch mit jeweils zwei unterschiedlichen Keilzinkungen (liegende und stehende) in den Zuglamellen untersucht. Der prinzipielle Unterschied dieser beiden Keilzinkenarten ist in Bild 3-8 dargestellt. Die Keilzinkungen für die Bauteile wurden auf eine spezielle Art gefertigt, die im nächsten Absatz näher beschrieben wird.



**Bild 3-8 Unterschied zwischen liegender (links) und stehender (rechts) Keilzinkung**

Bei Bauteilprüfkörpern mit Keilzinkenverbindungen befanden sich die Keilzinkungen jeweils im mittleren Bereich des Prüfkörpers. Bei den Prüfkörpern mit mehr als einer Keilzinkenverbindung<sup>1</sup> befanden sie die einzelnen Keilzinkungen ebenfalls im mittleren Bereich des Prüfkörpers, wobei der Abstand der einzelnen Keilzinkungen maximal 300 mm betrug.

<sup>1</sup> 2B.B-ml3|, 2B.B-ms3|, 2B.B-vl1||, 2B.B-vs1||, 2B.B-ml1||, 2B.B-ms1|| (Erläuterung der Abkürzungen siehe Fußnoten der Tabelle 3-12)

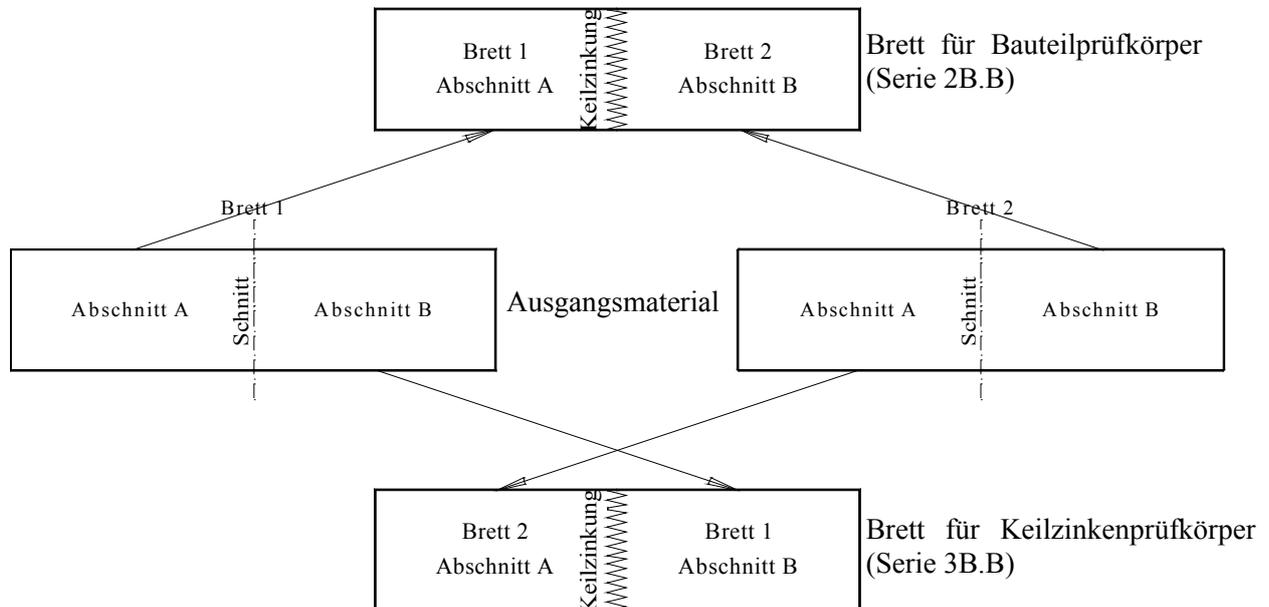
**Tabelle 3-12 Zusammenfassung des Prüfprogramms für die Bauteilversuche**

Bezeichnung für die Bauteilprüfung	Sortierung	Breite B [mm]	Querschnitt	Keilzinkung	Anzahl Bauteilprüfkörper	Zugehörige Bezeichnung für die Keilzinkenprüfung
2B.B-m11   <sup>1</sup>	maschinell	150	QS 125	liegend	10	3B.B-m11   <sup>2</sup>
2B.B-ms1   <sup>3</sup>	maschinell	150	QS 125	stehend	10	3B.B-ms1   <sup>4</sup>
2B.B-m13   <sup>5</sup>	maschinell	450	QS 125	liegend	10	3B.B-m13   <sup>6</sup>
2B.B-ms3   <sup>7</sup>	maschinell	450	QS 125	stehend	10	3B.B-ms3   <sup>8</sup>
2B.B-v11    <sup>9</sup>	visuell	150	QS 129	liegend	10	—
2B.B-vs1    <sup>10</sup>	visuell	150	QS 129	stehend	10	—
2B.B-m11    <sup>11</sup>	maschinell	150	QS 129	liegend	10	—
2B.B-ms1    <sup>12</sup>	maschinell	150	QS 129	stehend	10	—

<sup>1</sup> 2B.B-m11 = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserverparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>2</sup> 3B.B-m11 = Keilzinkenbiegeversuch mit liegender KZV - zu Bauteilbiegeversuch 2B.B-m11 zugehörig  
<sup>3</sup> 2B.B-ms1 = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserverparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>4</sup> 3B.B-ms1 = Keilzinkenbiegeversuch mit stehender KZV - zu Bauteilbiegeversuch 2B.B-ms1 zugehörig  
<sup>5</sup> 2B.B-m13 = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserverparallele Decklage - 3 nebeneinander liegende Lamellenschichten  
<sup>6</sup> 3B.B-m13 = Keilzinkenbiegeversuch mit liegender KZV - zu Bauteilbiegeversuch 2B.B-m13 zugehörig  
<sup>7</sup> 2B.B-ms3 = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserverparallele Decklage - 3 nebeneinander liegende Lamellenschichten  
<sup>8</sup> 3B.B-ms3 = Keilzinkenbiegeversuch mit stehender KZV - zu Bauteilbiegeversuch 2B.B-ms3 zugehörig  
<sup>9</sup> 2B.B-v11 = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - visuell sortierte Bretter zwei faserverparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>10</sup> 2B.B-vs1 = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - visuell sortierte Bretter zwei faserverparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>11</sup> 2B.B-m11 = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - maschinell sortierte Bretter zwei faserverparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
<sup>12</sup> 2B.B-ms1 = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - maschinell sortierte Bretter zwei faserverparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht

**Teil 2 – Keilzinkenbiegeprüfungen an den zu den Bauteilversuchen zugehörigen Lamellen (3B.B)**

Für die Herstellung der Bretter mit den Keilzinkungen wurden zunächst zwei Bretter in der Mitte aufgetrennt. Diese vier Bretter wurden dann kreuzweise miteinander zu zwei neuen Brettern mittels Keilzinkungen verbunden (Bild 3-9). Das eine Brett wurde in der Zuglamelle des Bauteils verwendet, an dem anderen Brett wurde die Keilzinkenbiegefestigkeit bestimmt. Die Bretter wurden sowohl mit liegenden, als auch stehenden Keilzinkenverbindungen hergestellt. Alle auf diese Weise gefertigten Bretter waren maschinell sortiert (Sortierklasse S10) und hatten den Querschnitt  $b/t = 150/27$  mm.



**Bild 3-9 Vorgehen bei der Herstellung der keilgezinkten Bretter für die Bauteilversuche und Keilzinkenprüfungen**

Die so gefertigten Bretter wurden verwendet in:

- den Brettsperrholzelementen zu den Bauteilprüfungen der Prüfreihe 2B.B-m11 |, 2B.B-ms1 |, 2B.B-m13 | und 2B.B-ms3 |
- den Keilzinkenbiegeprüfungen der Prüfreihe 3B.B-m11 |, 3B.B-ms1 |, 3B.B-m13 | und 3B.B-ms3 |

Das Prüfprogramm zu Teil 2 – Keilzinkenbiegeprüfungen (3B.B) in der Tabelle 3-13 zusammengefasst.

**Tabelle 3-13 Zusammenfassung des Prüfprogramms für die Ermittlung der Korrelation zwischen Bauteilbiegefestigkeit und Keilzinkenbiegefestigkeit**

Bezeichnung für die Keilzinkenprüfung	Zugehörige Bezeichnung für die Bauteilprüfung	Keilzinkung	Anzahl Keilzinkenproben
3B.B-m11	2B.B-m11	liegend	10
3B.B-ms1	2B.B-ms1	stehend	10
3B.B-m13	2B.B-m13	liegend	30 (10x3)
3B.B-ms3	2B.B-ms3	stehend	30 (10x3)

**Teil 3 – Biege- und Zugprüfungen an Brettern mit Keilzinkungen (3K.B, 3K.Z)**

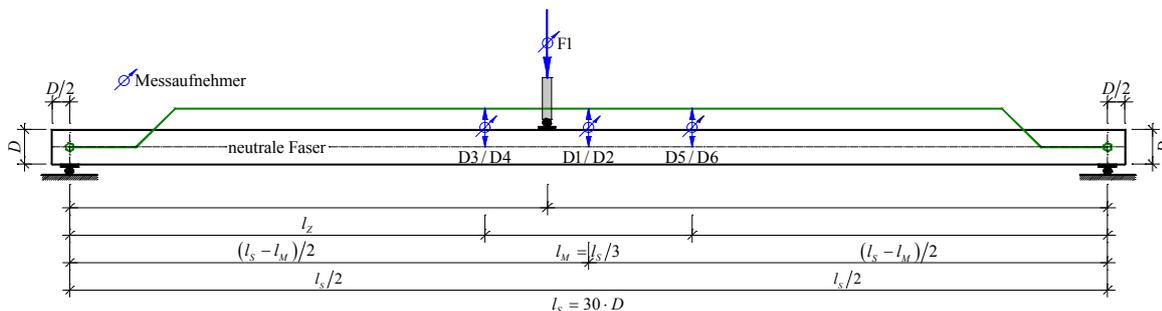
Die Bretter für die Keilzinkenbiege- und Keilzinkenzugprüfungen waren maschinell sortiert und entsprachen ebenfalls der Sortierklasse S10. Der Querschnitt der verwendeten Hölzer betrug  $b/t = 150/27$  mm. Untersucht wurden wiederum beide Arten von Keilzinkungen – liegend und stehend. Die

Herstellung der Bretter erfolgte nach dem gleichen Schema wie beim Teil 2 (zwei Bretter auftrennen, kreuzweise verkleben). Das Prüfprogramm zu Teil 3 – Keilzinkenbiege- und zugprüfungen (3K.B, 3K.Z) ist in Tabelle 3-14 wiedergegeben.

**Tabelle 3-14 Zusammenfassung des Prüfprogramms zur Ermittlung der Biege- und Zugfestigkeiten der Keilzinkungen**

Bezeichnung	Keilzinkung	Prüfung	Anzahl Keilzinkenproben
3K.B-mL	liegend	Biegung	18
3K.B-ms	stehend	Biegung	20
3K.Z-mL	liegend	Zug	18
3K.Z-ms	stehend	Zug	20

Die Prüfung der Bauteile erfolgte im 3-Punkt-Biegeversuch, um ein Versagen in der Keilzinkenverbindung zu „erzwingen“, wobei die Prüfkraft an der Stelle der Keilzinkung aufgebracht wurde. Zur Ermittlung der Elastizitätskennzahlen wurden an drei Stellen in Längsrichtung jeweils auf beiden Seiten des Trägers die Durchbiegungen gemessen (Bild 3-10).



**Bild 3-10 Prüfaufbau für die Biegeprüfungen der Brettsperrholzelemente mit Keilzinkenverbindungen**

### 3.6.2 Versuchsergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen für die Bauteilbiegeversuche mit Keilzinkenverbindungen vorgestellt. Neben den Festigkeitswerten wurden auch die Rohdichten der einzelnen Prüfkörper sowie die Steifigkeiten ermittelt.

Die Ergebnisse der Rohdichtebestimmung inklusive der Diskussion der einzelnen Ergebnisse sind im Anhang C.1 angegeben.

Die Ausführungen zu den Ergebnissen der Steifigkeitsbetrachtungen ist in Anhang C.2 zu finden.

#### Allgemeines

Wie bereits bei den Bauteilbiegeversuchen ohne Keilzinkenverbindungen (siehe Abschnitt 3.5) wurden die Festigkeiten der Bauteile mit Keilzinkungen ebenfalls nach den beiden Berechnungsmodellen „Balken“ und „Schub“ nach Abschnitt 3.3 ermittelt. Für die endgültige Bewertung der Festigkeiten wurden ausschließlich die Ergebnisse des Modells „Balken“ herangezogen. Die Unterschiede, die sich infolge der beiden Berechnungsmodelle und deren Auswirkungen ergeben, enthält Anhang C.3.

#### Anmerkungen zu einzelnen Versuchswerten

Um die verschiedenen Einflüsse und deren Größenordnungen zu ermitteln, werden analog zu der Prüferie 1B.B (siehe Abschnitt 3.5) die Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der einzelnen Versuchsreihen miteinander verglichen. Da nicht alle Prüfkörper ein Keilzinkenversagen aufwiesen oder Aufgrund anderer Unregelmäßigkeiten die Ergebnisse verfälschen, werden für die weiteren

Betrachtungen nur die Versuchswerte berücksichtigt, bei denen ein Keilzinkenversagen in der äußersten Zuglamelle eintrat. Bauteile bei denen ein

- Holzversagen in der äußersten Zuglamelle
- Ast innerhalb des Keilzinkenbereichs (siehe Bild 3-11)
- Unsauber ausgeführte Keilzinkenverbindung (siehe Bild 3-12)
- Faserabweichung im Keilzinkenbereich (siehe Bild 3-13)
- Faserabweichung im Holz (siehe Bild 3-14 und Bild 3-15)

festgestellt werden konnte, werden für die weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt. Diese werden im Folgenden als „Ausreißer“ bezeichnet. In der Tabelle 3-15 sind die Prüfkörper angegeben, inklusive der Begründung, warum sie für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

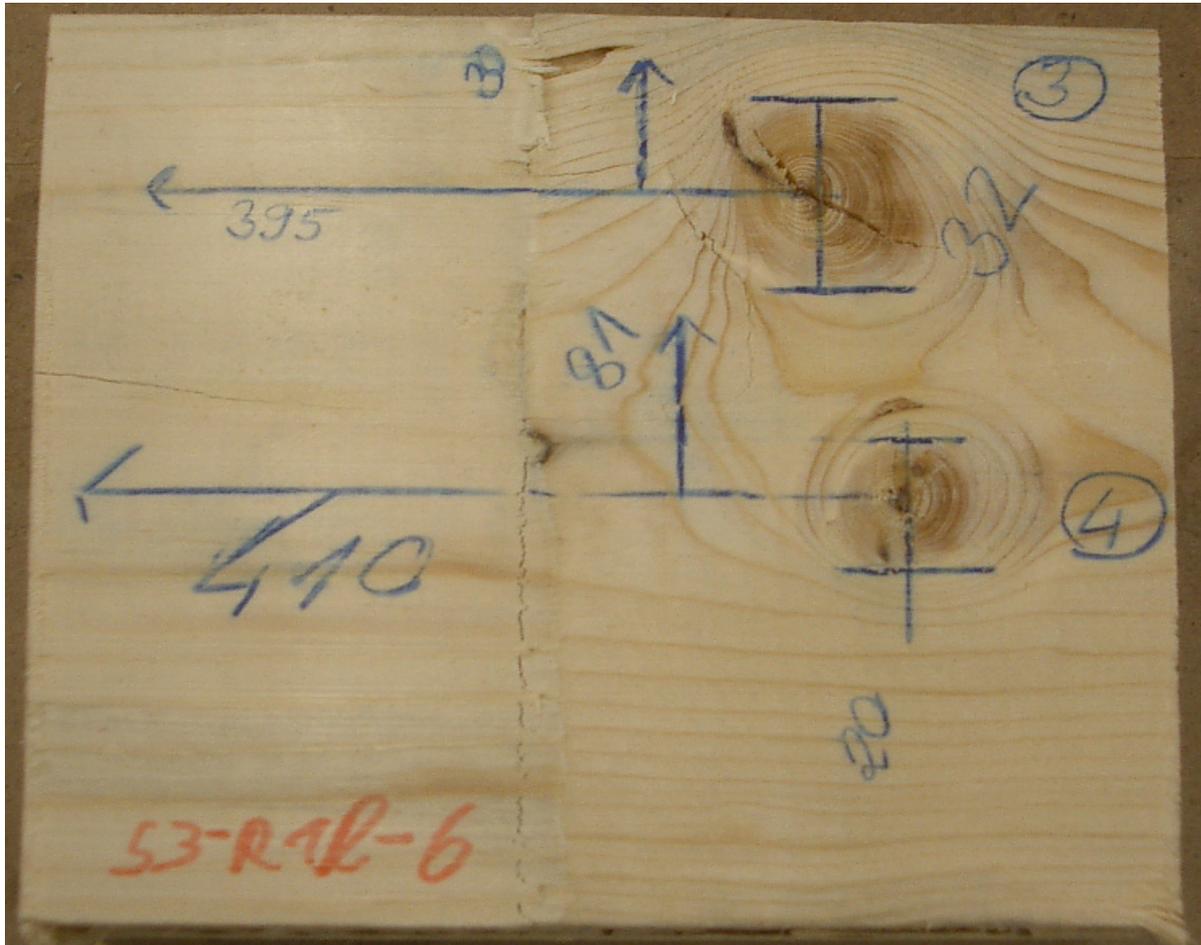
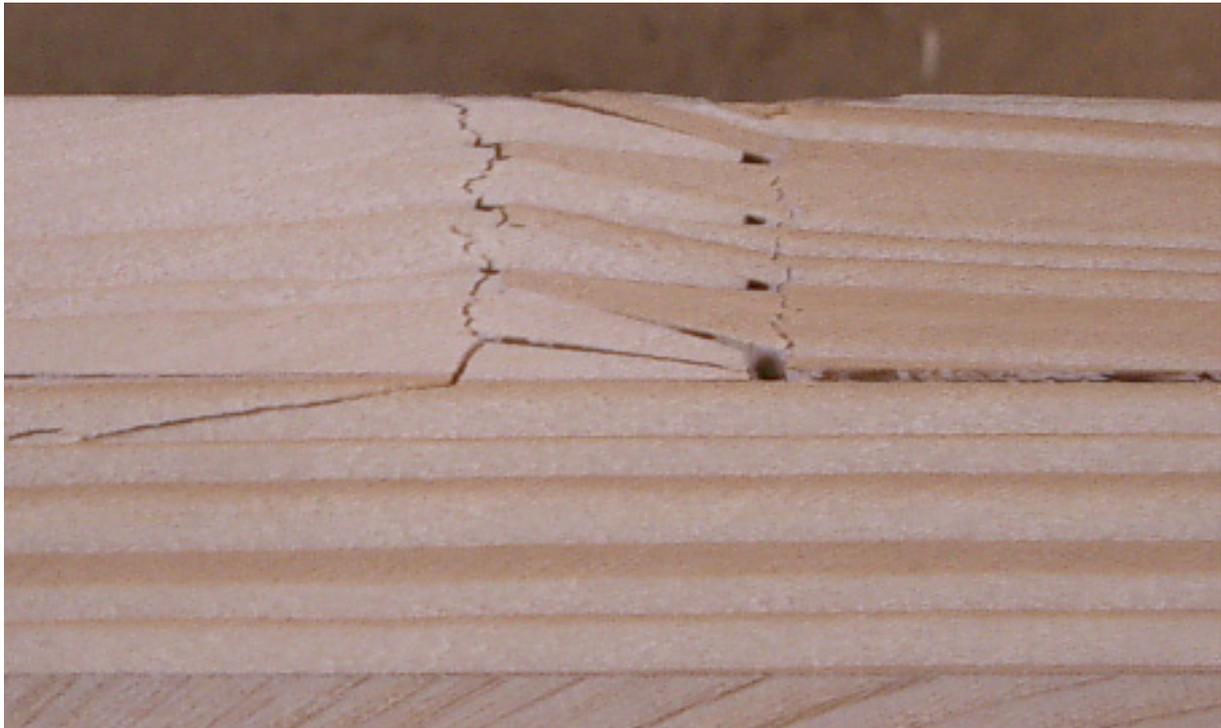
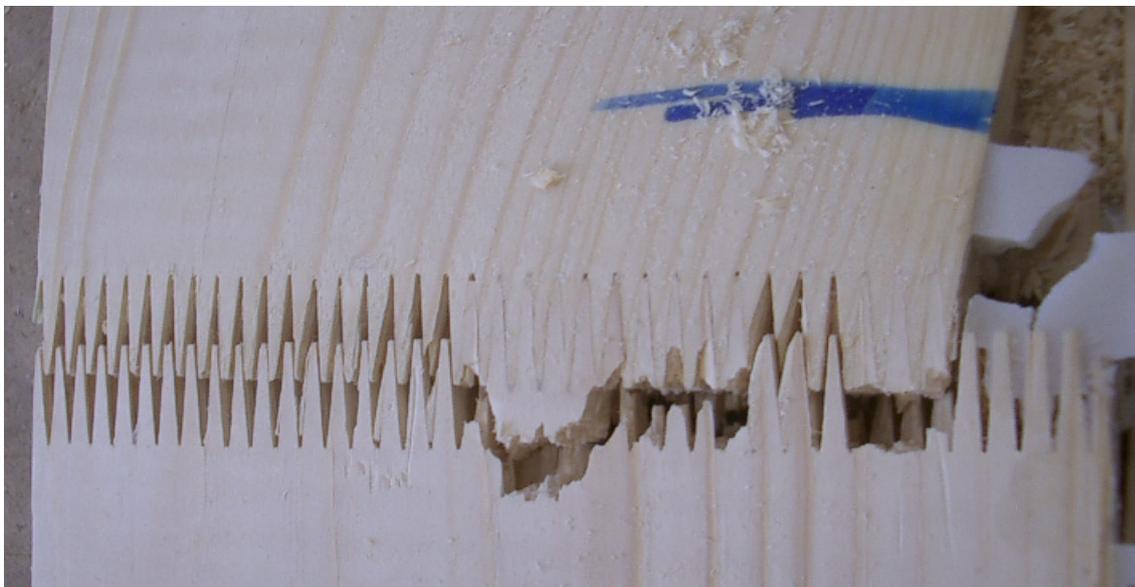


Bild 3-11 Äste im Bereich der Keilzinkenverbindung



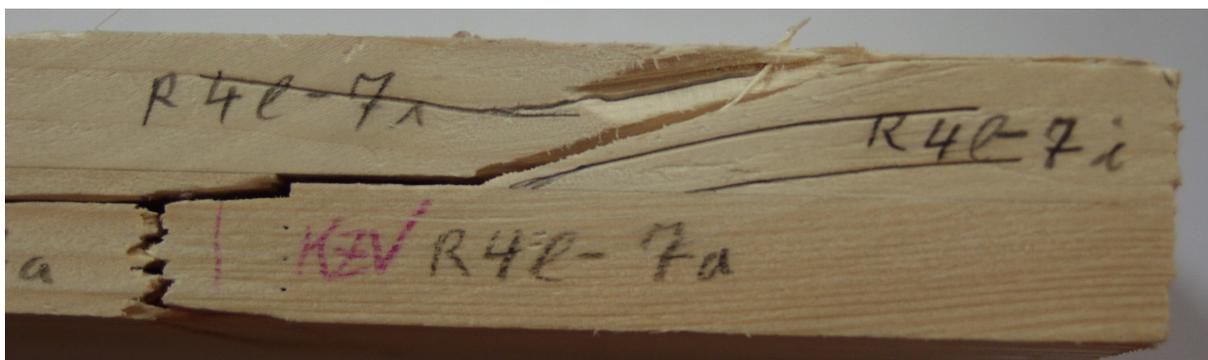
**Bild 3-12** Unsauber ausgeführte Keilzinkenverbindung



**Bild 3-13** Faserabweichung im Bereich der Keilzinkenverbindung



**Bild 3-14** Faserabweichung im Holz (PK-Nr.: 2B.B-v11||-05)



**Bild 3-15** Faserabweichung im Holz (PK-Nr.: 2B.B-v11||-07)

**Tabelle 3-15** Auflistung der nicht berücksichtigten Prüfkörper(nummer) der Prüferserie 2B.B

Begründung für die nicht Berücksichtigung	2B.B m11	2B.B m13	2B.B v11	2B.B m11	2B.B ms1	2B.B ms3	2B.B vs1	2B.B ms1
Holzversagen	09	—	02	—	01, 06, 07, 08, 09	08, 09	01, 07	01, 02
Ast im Keilzinkenbereich	06	—	—	05	04	06	02, 05	—
Unsauber ausgeführten Keilzinkenverbindung	—	—	04	02	—	—	—	—
Faserabweichung im Keilzinkenbereich	—	—	—	—	—	—	04	—
Faserabweichung im Holz	—	—	05, 07	—	—	—	—	—

Die statistische Auswertung der Versuchswerte wurde mittels einer Log-Normalverteilung durchgeführt. Die Ergebnisse unter Berücksichtigung aller Versuchswerte (inkl. „Ausreißer“) sind in der Tabelle F-34 und im Diagramm F-76 im Anhang F.2 angegeben. Die Prüfkörper, die für die weiteren Betrachtungen unberücksichtigt bleiben sind in dem Diagramm F-76 eingekreist und mit ihren Prüfkörpernummern in der Tabelle 3-15 versehen. Die Ergebnisse ohne diese „Ausreißer“ sind im Anhang C.3.2 angegeben.

Darüber hinaus gibt es einzelne Versuchswerte, die deutlich von den übrigen Werten abweichen. Da diese Einzelwerte einen großen Einfluss auf die Mittel- und 5%-Quantilwerte haben, was wiederum bei den weiteren Auswertungen zu starken nicht nachvollziehbaren Unterschieden führen kann, bleiben für die nachfolgenden Auswertungen diese „Extremwerte“ ebenfalls unberücksichtigt. Die Erläuterungen warum die einzelnen „Extremwerte“ unberücksichtigt blieben ist ebenfalls im Anhang C.3.2 ausgeführt.

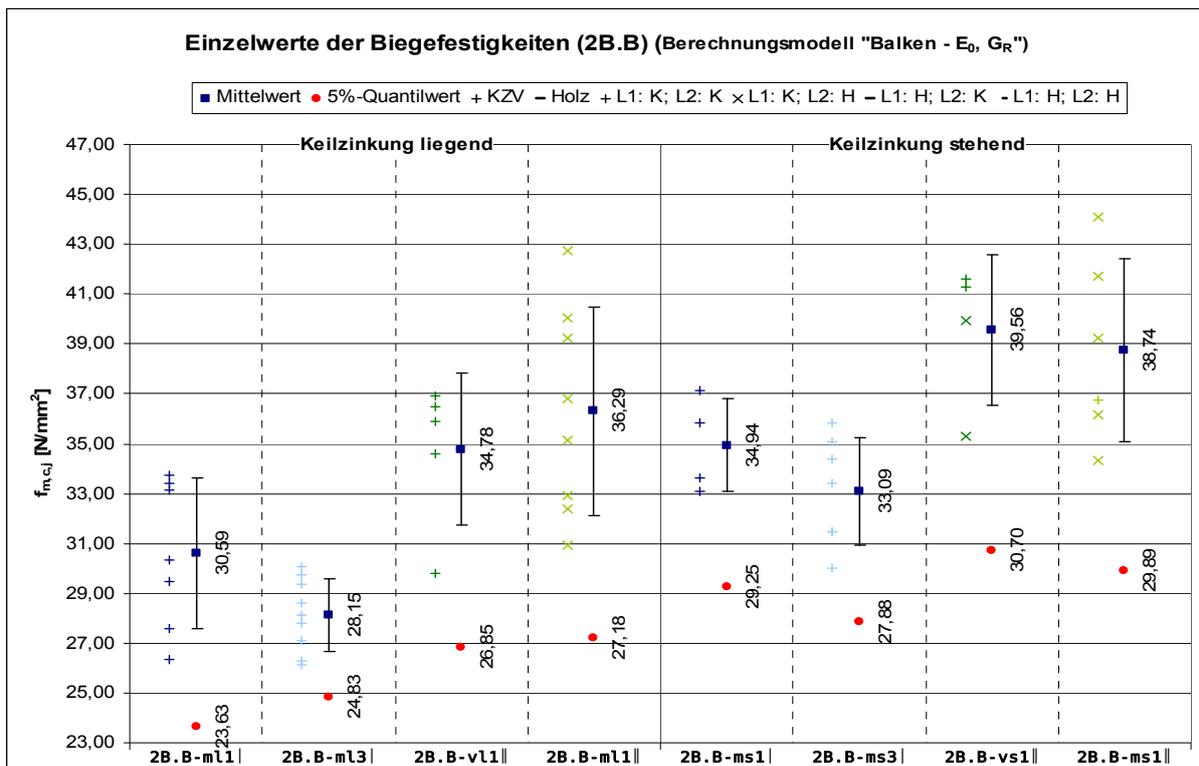
Der nachfolgende Abschnitt enthält lediglich die Werte, die für die nachfolgende Untersuchung der verschiedenen Einflussparameter auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrhölzern mit Keilzinkenverbindungen verwendet werden.

**Verwendete Ergebnisse für die Auswertung der verschiedenen Parameter**

**Tabelle 3-16 Statistische Werte der Biegefestigkeiten der Bauteile in N/mm<sup>2</sup> der Prüferserie 2B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne Maximalwerte)**

Statistischer Wert	2B.B ml1   <sup>1</sup>	2B.B ml3   <sup>2</sup>	2B.B vl1   <sup>3</sup>	2B.B ml1    <sup>4</sup>	2B.B ms1   <sup>5</sup>	2B.B ms3   <sup>6</sup>	2B.B vs1    <sup>7</sup>	2B.B ms1    <sup>8</sup>
Anzahl n	7	9	5	8	4	7	5	6
Minimum x <sub>min</sub>	26,32	26,15	29,81	30,94	33,10	29,98	35,28	34,34
Maximum x <sub>max</sub>	33,73	30,08	36,90	42,75	37,13	35,81	46,03	44,11
Mittelwert x <sub>M</sub>	30,59	28,15	34,78	36,29	34,94	33,09	40,87	38,74
Standardabweichung s <sub>x</sub>	3,02	1,46	3,05	4,16	1,88	2,18	3,92	3,66
Variationskoeffizient v <sub>x</sub>	9,9%	5,2%	8,8%	11,5%	5,4%	6,6%	9,6%	9,4%
Beiwert Anzahl k <sub>n</sub> <sup>a)</sup>	2,569	2,397	2,915	2,471	3,281	2,569	2,915	2,706
5%-Quantilwert x <sub>05</sub> <sup>a)</sup>	23,63	24,83	26,85	27,18	29,25	27,88	30,78	29,89

- <sup>1</sup> 2B.B-ml1 = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht
  - <sup>2</sup> 2B.B-ml3 = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - 3 nebeneinander liegende Lamellenschichten
  - <sup>3</sup> 2B.B-vl1 = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - visuell sortierte Bretter zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht
  - <sup>4</sup> 2B.B-ml1 || = Bauteilbiegeversuch mit liegender KZV - maschinell sortierte Bretter zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht
  - <sup>5</sup> 2B.B-ms1 = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht
  - <sup>6</sup> 2B.B-ms3 = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - maschinell sortierte Bretter eine faserparallele Decklage - 3 nebeneinander liegende Lamellenschichten
  - <sup>7</sup> 2B.B-vs1 || = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - visuell sortierte Bretter zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht
  - <sup>8</sup> 2B.B-ms1 || = Bauteilbiegeversuch mit stehender KZV - maschinell sortierte Bretter zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht
- a) Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)



**Diagramm 3-3 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten ohne Keilzinkungen Prüferserie 2B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne Maximalwerte)**

Mit den aus diesen Einzelwerten ermittelten Mittelwerten und 5%-Quantilwerten werden nun die einzelnen Versuchsreihen miteinander verglichen. Dieser Vergleich soll Aufschluss über die verschiedenen Einflüsse (siehe Abschnitt 2.4) und deren Größenordnung geben. Nach welchen Gesichtspunkten die verschiedenen Versuchsreihen miteinander verglichen werden, ist in der Tabelle 3-17 angegeben. Die Ergebnisse (Verhältnissfaktoren) der einzelnen Untersuchungen sind im Diagramm 3-4 dargestellt.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass im nachfolgenden Abschnitt auf die Verhältnissfaktoren zurückgegriffen wird, die sich aus den Mittel- und 5%-Quantilwerten ergeben, wenn die Maximalwerte unberücksichtigt bleiben. Die Verhältnissfaktoren, die sich unter Berücksichtigung der Maximalwerte ergeben sind im Diagramm F-77 im Anhang F.2 zu finden.

**Tabelle 3-17 Übersicht der untersuchten Einflussgrößen auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrhölzern mit Keilzinkenverbindungen**

Untersuchter Einfluss	Vergleich			Beschreibung
	von	÷	mit	
Sortierverfahren	v11	÷	m11	Mit dem untersuchten Einfluss „Sortierverfahren“ soll untersucht werden, ob die Art, wie die Lamellen sortiert wurden (visuell, maschinell) mit der Biegetragfähigkeit von Brettsperrholz mit Keilzinkenverbindungen zusammenhängt.
	vs1	÷	ms1	
Querschnittsaufbau	m11	÷	m11	Mit dem untersuchten Einfluss „Querschnittsaufbau“ soll untersucht werden, ob die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholz mit Keilzinkenverbindungen von der Anzahl der Decklamellen (eine oder zwei) abhängt.
	ms1	÷	m11	
Bauteilbreite	m13	÷	m11	Mit dem untersuchten Einfluss „Bauteilbreite“ soll untersucht werden, ob die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholz mit Keilzinkenverbindungen von der Anzahl der nebeneinander liegenden Lamellen (eine oder drei) abhängt.
	ms3	÷	ms1	
Keilzinkenverbindung	ms1	÷	m11	Mit dem untersuchten Einfluss „Keilzinkung“ soll untersucht werden, ob die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholz mit Keilzinkenverbindungen von der Art der Keilzinkung (liegend oder stehend) abhängt.
	ms3	÷	m13	
	vs1	÷	v11	
	ms1	÷	m11	

### 3.6.3 Ergebnisse für die verschiedenen Parameter

#### Verhältnissfaktoren für die verschiedenen Parameter

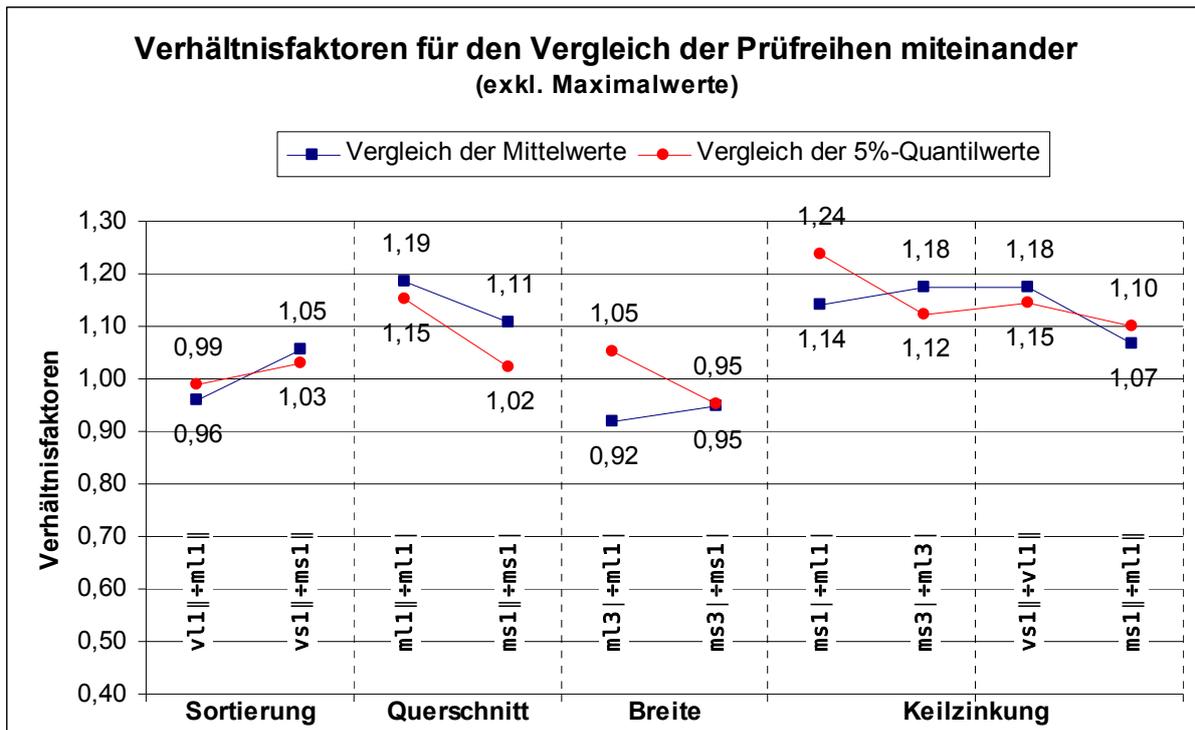


Diagramm 3-4 Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Prüfreiheiten miteinander der Prüferserie 2B.B (exkl. Maximalwerte)

Die Verhältnissfaktoren aus dem Diagramm 3-4 ergeben sich aus den Mittel- und 5%-Quantilwerten der Tabelle 3-16 bzw. aus dem Diagramm 3-3.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Verhältnissfaktoren diskutiert und bewertet.

#### Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Sortierung“

Vergleich der visuellen mit maschineller Sortierung

$$(2B.B-v11|| \div 2B.B-m11||, 2B.B-vs1|| \div 2B.B-ms1||)$$

In der Tabelle 3-18 sind die Verhältnissfaktoren für den Mittelwert und den 5%-Quantilwert angegeben.

Tabelle 3-18 Verhältnissfaktoren für den Vergleich visuelle/maschinelle Sortierung der Prüferserie 2B.B

Vergleich		Verhältnis für	
von	mit	Mittelwert	5%-Quantilwert
v11	÷ m11	0,96	0,99
vs1	÷ ms1	1,05	1,03

Der Vergleich der Reihen v11|| ÷ m11|| und vs1|| ÷ ms1|| lässt folgendes erkennen (siehe Tabelle 3-16, Diagramm 3-4 und Tabelle 3-18):

Vergleich von	Ergebnisse der Verhältnissfaktoren	Punkt
v11   ÷ m11	für Mittelwert und 5%-Quantilwert ungefähr gleich groß	1
	Beide Verhältnissfaktoren kleiner als beim Vergleich vs1   ÷ ms1	2
vs1   ÷ ms1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert ungefähr gleich groß	3

*Erläuterungen zu den Punkten 1 bis 3:*

Bei den Verhältnisfaktoren sind zwar kleine Unterschiede festzustellen, die Verhältnisfaktoren für die Mittel- und 5%-Quantilwerte liegen jedoch allesamt bei ungefähr 1,0.

*Erkenntnisse*

Der Vergleich der „Sortierung“ zeigt, dass die Art, wie die Lamellen sortiert werden, visuell oder maschinell, keinen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperthölzern mit Keilzinkenverbindungen hat. Mit beiden Sortierverfahren werden die gleichen Festigkeiten erreicht.

**Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Querschnitt“**

Vergleich der Querschnittsaufbauten (2B.B-m11 || ÷ 2B.B-m11 | , 2B.B-ms1 || ÷ 2B.B-ms1 | )

Die Verhältnisfaktoren für den Vergleich der Querschnittsaufbauten sind für die Mittel- und 5%-Quantilwerte in der Tabelle 3-19 aufgeführt.

**Tabelle 3-19 Verhältnisfaktoren für den Vergleich der Querschnittsaufbauten der Prüferserie 2B.B**

Vergleich		Verhältnis für	
von	mit	Mittelwert	5%-Quantilwert
m11	÷ m11	1,19	1,15
ms1	÷ ms1	1,11	1,02

Die Gegenüberstellung der Reihen m11 || ÷ m11 | und ms1 || ÷ ms1 | liefert folgende Erkenntnisse (siehe Tabelle 3-16, Diagramm 3-4 und Tabelle 3-19):

Vergleich von	Ergebnisse der Verhältnisfaktoren	Punkt
m11    ÷ m11	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	1
	Beide Verhältnisfaktoren größer als beim Vergleich ms1    ÷ ms1	2
ms1    ÷ ms1	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	3

*Erläuterung zu Punkt 1 und 3:*

Wegen der geringen Anzahl an Versuchswerten fallen die Standardabweichungen der einzelnen Versuchsreihen unterschiedlich aus, was sich wiederum auf die 5%-Quantilwerte auswirkt. Daher ist die Aussagekraft der aus den 5%-Quantilwerten ermittelten Faktoren als gering einzuschätzen. Da der Variationskoeffizient der Reihe ms1 | jedoch nur etwa halb so groß ist, wie der Reihe ms1 ||, fällt damit auch der 5%-Quantilwert dieser Reihe deutlich höher aus. Dieser hohe 5%-Quantilwert führt wiederum dazu, dass der Verhältnisfaktor kleiner ausfällt.

*Erläuterung zu Punkt 2:*

Aufgrund der insgesamt sehr geringen Anzahl an verwertbaren Versuchsergebnissen, insbesondere bei der Versuchsreihe ms1 | (4 Versuchswerte), kann keine verlässliche und endgültige Aussage gemacht werden, ob der Vergleich von m11 || ÷ m11 | höhere Verhältnisfaktoren liefert als der Vergleich von ms1 || ÷ ms1 |.

*Erkenntnisse*

Unabhängig von der Art der Keilzinkung (liegend oder stehend) ergeben sich für die Festigkeiten der beiden untersuchten Querschnitte bei den Mittelwerten deutliche Unterschiede. Die Mittelwerte für den Querschnitt QS 129 (m11 || und ms1 ||) liegen im Mittel mit 15% (±4%) über denen des Querschnitts QS 125 (m11 | und ms1 |). Dies zeigt, dass die Biegefestigkeit der Bauteile mit Keilzinkungen entscheidend von dem Querschnittsaufbau abhängt.

**Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Breiten“**

Vergleich der Bauteilbreiten ( $2B.B-m_{l3} \mid \div 2B.B-m_{l1} \mid$ ,  $2B.B-m_{s3} \mid \div 2B.B-m_{s1} \mid$ )

Für den Vergleich der unterschiedlichen Bauteilbreiten sind die Verhältnisfaktoren für die Mittel- und 5%-Quantilwerte in der Tabelle 3-20 angegeben.

**Tabelle 3-20 Verhältnisfaktoren für den Vergleich der Bauteilbreiten der Prüferserie 2B.B**

Vergleich		Verhältnis für	
von	mit	Mittelwert	5%-Quantilwert
$m_{l3} \mid$	$\div m_{l1} \mid$	0,92	1,05
$m_{s3} \mid$	$\div m_{s1} \mid$	0,95	0,95

Der Vergleich der Reihen  $m_{l3} \mid \div m_{l1} \mid$  und  $m_{s3} \mid \div m_{s1} \mid$  lässt folgendes erkennen (siehe Tabelle 3-16, Diagramm 3-4 und Tabelle 3-20)

Vergleich von	Ergebnisse der Verhältnisfaktoren	Punkt
$m_{l3} \mid \div m_{l1} \mid$	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	1
$m_{s3} \mid \div m_{s1} \mid$	für Mittelwert und 5%-Quantilwert gleich groß	2
	5%-Quantilwert kleiner als beim Vergleich $m_{l3} \mid \div m_{l1} \mid$	3

*Erläuterung zu Punkt 1:*

Bei der Reihe  $m_{l1} \mid$  fällt der Variationskoeffizient mit ca. 10% fast doppelt so hoch aus wie bei der Reihe  $m_{l3} \mid$ . Dies ist der Grund, warum sich für den Verhältnisfaktor des 5%-Quantilwerts unterschiedliche Werte ergeben.

*Erläuterung zu Punkt 2:*

Da bei dem Vergleich  $m_{s3} \mid \div m_{s1} \mid$  die Variationskoeffizienten der beiden Versuchsreihen ungefähr in der gleichen Größenordnung liegen, erklärt dies auch die identischen Verhältnisfaktoren für den Mittel- und 5%-Quantilwert. Dabei ist jedoch zu beachten, dass in der Versuchsreihe  $m_{s1} \mid$  nur 4 Versuchswerte vorhanden sind, was keine zuverlässige Bestimmung des 5%-Quantilwertes ermöglicht. Darum ist die Aussagekraft des Verhältnisfaktors für den 5%-Quantilwert für den Vergleich  $m_{s3} \mid \div m_{s1} \mid$  als eher gering einzustufen.

*Erläuterung zu Punkt 3:*

Der deutliche Unterschied des Verhältnisfaktors für den 5%-Quantilwert gegenüber dem Vergleich der Reihen  $m_{l3} \mid \div m_{l1} \mid$  hängt mit den unterschiedlichen Variationskoeffizienten zusammen. Bei der Reihe  $m_{l1} \mid$  fällt der Variationskoeffizient fast doppelt so hoch aus wie bei der Reihe  $m_{s1} \mid$ . Dadurch ergibt sich für die Reihe  $m_{s1} \mid$  auch ein deutlich höherer 5%-Quantilwert. Bei den beiden Reihen mit drei nebeneinander liegenden Lamellen ( $m_{l3} \mid$  und  $m_{s3} \mid$ ) verhält es sich umgekehrt, d.h. die Reihe  $m_{l3} \mid$  hat einen geringeren Variationskoeffizienten wodurch sich ein höherer 5%-Quantilwert im Vergleich zur Reihe  $m_{s3} \mid$  einstellt. Dies ist der Grund warum der Verhältnisfaktor für den 5%-Quantilwert bei dem Vergleich  $m_{s3} \mid \div m_{s1} \mid$  geringer ausfällt als beim Vergleich  $m_{l3} \mid \div m_{l1} \mid$ . Wegen der geringen Anzahl an verwertbaren Versuchsergebnissen sollten deshalb die Aussagen über die Verhältnisfaktoren der 5%-Quantilwerte nicht herangezogen werden.

*Erkenntnisse*

Der Vergleich der Prüfkörper mit unterschiedlichen Breiten zeigt, dass die Verhältniswerte der Mittelwerte mit 0,92 und 0,95 ungefähr in der gleichen Größenordnung liegen, jedoch unter 1. Dies lässt sich mit dem sog. Volumeneffekt erklären. Durch die höhere Anzahl nebeneinander liegender Lamellen (größeres Zugbeanspruchtes Volumen) existiert eine höhere Wahrscheinlichkeit des Versagens, wodurch sich geringere mittlere Festigkeiten ergeben.

Bei den Bauteilen mit Keilzinkenverbindungen können sich die benachbarten Lamellenlagen, anders als bei den Bauteilen ohne Keilzinkenverbindungen, nicht gegenseitig entlasten, da die Keilzinkenverbindung den gleichen E-Modul aufweist wie ein ungestörter Brettabschnitt und damit gleich viel Last „anzieht“ jedoch eine geringere Festigkeit besitzt und somit das schwächere Glied darstellt und infolge dessen versagt. Bei einem Ast hingegen zieht der benachbarte ungestörte

Brettabschnitt mehr Last an. Dieser ungestörte Brettabschnitt weist neben einem höheren E-Modul auch eine höhere Festigkeit auf und übernimmt somit einen Teil der Last des Astabschnittes, wodurch dieser entlastet wird.

Mit Hilfe der in COLLING [16] angegeben Beziehungen, kann der Einfluss des Volumens auf die Festigkeit eines Trägers ermittelt werden. Mit den Mittelwerten und Variationskoeffizienten der Tabelle 3-16 ergeben sich damit folgende Verhältniswerte:

Vergleich	Verhältnissfaktor für Mittelwert nach Diagramm 3-4	Verhältnissfaktor für Mittelwert mittels Volumeneffekt
$m_{l3} \mid \div m_{l1} \mid$	0,92	0,97
$m_{s3} \mid \div m_{s1} \mid$	0,95	0,93

Die obigen Werte zeigen eindeutig, dass die mittlere Tragfähigkeit mit zunehmender Breite abnimmt.

### Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Keilzinken“

Vergleich der Keilzinkenverbindung ( $2B.B-m_{s1} \mid \div 2B.B-m_{l1} \mid$ ,  $2B.B-m_{s3} \mid \div 2B.B-m_{l3} \mid$ ,  $2B.B-v_{s1} \parallel \div 2B.B-v_{l1} \parallel$ ,  $2B.B-m_{s1} \parallel \div 2B.B-m_{l1} \parallel$ )

Die Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Keilzinkung (stehend/liegend) sind in der Tabelle 3-21 zusammengefasst.

**Tabelle 3-21 Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Keilzinkenverbindung der Prüferie 2**

Vergleich von	mit	Verhältnis für	
		Mittelwert	5%-Quantilwert
$m_{s1} \mid$	$\div m_{l1} \mid$	1,14	1,24
$m_{s3} \mid$	$\div m_{l3} \mid$	1,18	1,12
$v_{s1} \parallel$	$\div v_{l1} \parallel$	1,18	1,15
$m_{s1} \parallel$	$\div m_{l1} \parallel$	1,07	1,10

Der Vergleich der Reihen  $m_{s1} \mid \div m_{l1} \mid$ ,  $m_{s3} \mid \div m_{l3} \mid$ ,  $v_{s1} \parallel \div v_{l1} \parallel$  und  $m_{s1} \parallel \div m_{l1} \parallel$  lässt folgendes erkennen (siehe Tabelle 3-16, Diagramm 3-4 und Tabelle 3-21)

Vergleich von	Ergebnisse der Verhältnissfaktoren	Punkt
$m_{s1} \mid \div m_{l1} \mid$	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	1
	für 5%-Quantilwert größer als für Mittelwert	2
$m_{s3} \mid \div m_{l3} \mid$	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	3
$v_{s1} \parallel \div v_{l1} \parallel$	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	4
$m_{s1} \parallel \div m_{l1} \parallel$	für Mittelwert und 5%-Quantilwert unterschiedlich groß	5
	für 5%-Quantilwert größer als für Mittelwert	6

*Erläuterungen zu den Punkten 1, 3, 4 und 5:*

Die Unterschiede in den Verhältnissfaktoren für die Mittel- und 5%-Quantilwerte ergeben sich aus den verschiedenen Variationskoeffizienten der einzelnen Versuchsreihen.

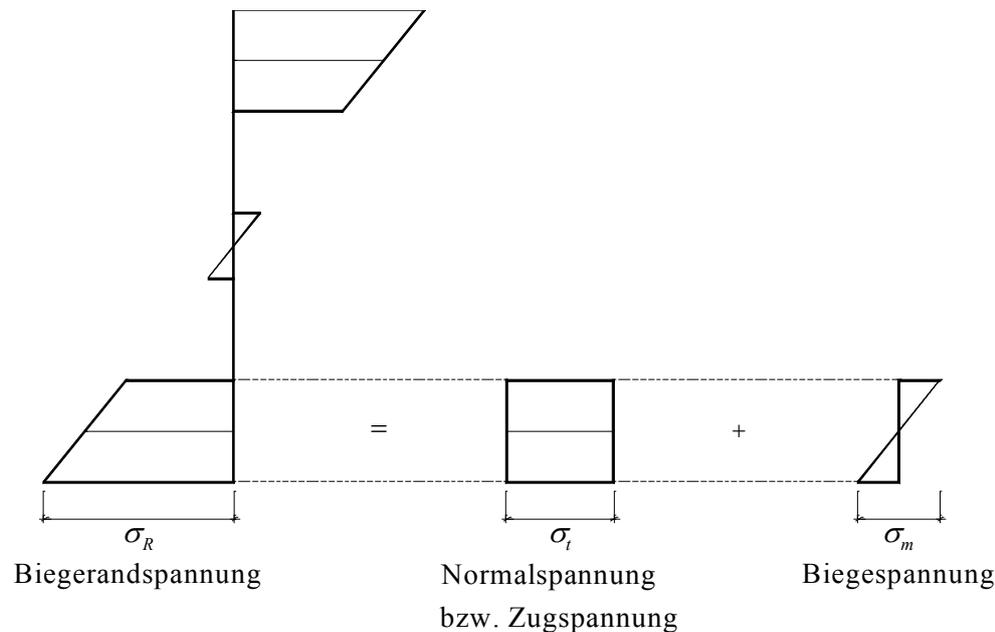
*Erläuterung zu Punkt 2 und 6:*

Bei den beiden Vergleichen  $m_{s1} \mid \div m_{l1} \mid$  und  $m_{s1} \parallel \div m_{l1} \parallel$  fallen im Gegensatz zu den anderen die Verhältnissfaktoren der 5%-Quantilwerte jeweils höher aus, als die für die Mittelwerte. Dies hängt mit den höheren Variationskoeffizienten der Reihen  $m_{l1} \mid$  und  $m_{l1} \parallel$  zusammen.

Durch die höheren Variationskoeffizienten ergeben sich geringere 5%-Quantilwerte. Diese geringeren 5%-Quantilwerte bewirken wiederum, dass bei dem Vergleich mit der anderen Prüfreihe die Verhältnissfaktoren größer ausfallen.

Der Vergleich der Biegefestigkeiten für Bauteile mit stehenden vs. liegenden Keilzinkenverbindungen zeigt, dass die Tragfähigkeiten der Bauteile mit stehenden Keilzinkungen deutlich höher ausfallen als für die Prüfkörper mit liegenden Keilzinkungen. Dies gilt sowohl für die Mittel- als auch 5%-Quantilwerte.

Die Keilzinkenbiegeversuche mit liegenden und stehenden Zinkungen haben gezeigt, dass die liegenden Keilzinkungen geringere Biegefestigkeiten aufweisen als Keilzinkungen mit stehenden Zinken (siehe Abschnitt 3.7.2 und 3.7.3). Bei den gegebenen Querschnittshöhen für die Bauteile ist der Biegeanteil vergleichsweise hoch. In Bild 3-16 ist der Anteil der Biegespannung an der Biegerandspannung exemplarisch für den Querschnitt QS 125 dargestellt.



**Bild 3-16** Exemplarische Darstellung des Anteils Normal-/Zugspannung und Biegespannung an der Biegerandspannung für den Querschnitt QS 125 (für die äußerste Zuglamelle,  $z = 125/2 - 13,5$ )

Für den Querschnitt QS 125 liegt der Anteil der Biegespannung in der untersten Zuglamelle bezogen auf die Biegerandspannung bei ca. 22% und für den Querschnitt QS 129 bei ca. 13%. Aufgrund dieses relativ hohen Biegespannungsanteils und der geringeren Keilzinkenbiegefestigkeit für die liegenden Keilzinkungen lässt sich somit auch erklären, warum die Bauteilfestigkeiten für die Bauteile mit liegenden Keilzinkungen geringer ausfallen, als für die Bauteile mit stehenden Keilzinkungen.

### 3.6.4 Zusammenfassung

Nachfolgend sind die Größenordnungen der Ergebnisse für die einzelnen Versuchsreihen angegeben.

**Tabelle 3-22** Zusammenfassung der Ergebnisse für die Prüferie 2B.B (Werte in  $N/mm^2$ )

Versuchsreihe		liegende Keilzinkung				stehende Keilzinkung			
		2B.B m11	2B.B m13	2B.B v11	2B.B m11	2B.B ms1	2B.B ms3	2B.B vs1	2B.B ms1
E-Modul	Mittelwert $E_{0,M}$	12000	12000	13000	12000	12000	12000	11000	12000
Biegefestigkeit	Mittelwert $f_{m,M}$	ca. 31	ca. 28	ca. 35	ca. 36	ca. 35	ca. 33	ca. 40	ca. 39
	5%-Quantilwert $f_{m,05}$	ca. 24	ca. 25	ca. 27	ca. 27	ca. 29	ca. 28	ca. 31	ca. 30

#### Einfluss der Sortierung

- E-Modul der visuell sortierten Bretter ist bei der Reihe v11|| größer, bei der Reihe vs1|| jedoch kleiner als der der maschinell sortierten Bretter
- Mittelwerte der Biegefestigkeit sind gleich groß
- 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit sind gleich groß

**Ergebnis:** Sortierverfahren hat **keinen** Einfluss auf die Biegetragfähigkeit

#### **Einfluss des Querschnitts**

- Querschnitt hat keinen Einfluss auf den E-Modul bzw. Steifigkeit
- Querschnitt hat großen Einfluss auf die Biegefestigkeit
- Mittelwerte der Biegefestigkeiten des Querschnitts QS 129 sind um ca. 15% größer

**Ergebnis:** Querschnitt hat **einen** Einfluss auf die Biegetragfähigkeit  
**Laminierungseffekt vorhanden**

#### **Einfluss der Breite**

- Breite hat keinen Einfluss auf den E-Modul bzw. Steifigkeit
- Breite hat einen Einfluss auf die Biegefestigkeit
- Bauteilbreite hat Einfluss auf die Mittelwerte der Biegefestigkeiten
- Ein Einfluss der Bauteilbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten kann aufgrund der geringen Anzahl an Versuchswerten nicht eindeutig festgestellt werden.

**Ergebnis:** Breite hat einen negativen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit  
negativer Systemfaktor vorhanden

#### **Einfluss der Keilzinkungen**

- Keilzinkung hat keinen Einfluss auf den E-Modul bzw. Steifigkeit
- Mittelwerte der Biegefestigkeiten der Bauteile mit stehenden Keilzinkungen sind um ca. 15% höher, als die der Bauteile mit liegenden Keilzinkungen
- 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der Bauteile mit stehenden Keilzinkungen sind um ca. 10% höher als die der Bauteile mit liegenden Keilzinkungen

**Ergebnis:** Art der Keilzinkung hat **einen starken** Einfluss auf die Biegetragfähigkeit

### **3.7 Versuche zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen (3B.B, 3K.B, 3K.Z)**

Aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Versuche werden nachfolgend die Bedeutungen der Abkürzung der drei Versuchsreihen erläutert, was mit den einzelnen Versuchen untersucht wurde.

3B.B = Ermittlung der Keilzinkenbiegefestigkeit von Brettern zugehörig zu den Bauteilprüfkörpern der Reihe 2B.B

3K.B = Ermittlung der Keilzinkenbiegefestigkeit an separaten Brettern

3K.Z = Ermittlung der Keilzinkenzugfestigkeit an separaten Brettern

#### **3.7.1 Prüfaufbauten**

##### **Biegeprüfung der Keilzinkungen (3B.B, 3K.B)**

Entsprechend den Vorgaben der DIN EN 408 [N6] wurden an den keilgezinkten Brettern die Biegefestigkeit ermittelt (Bild 3-17).

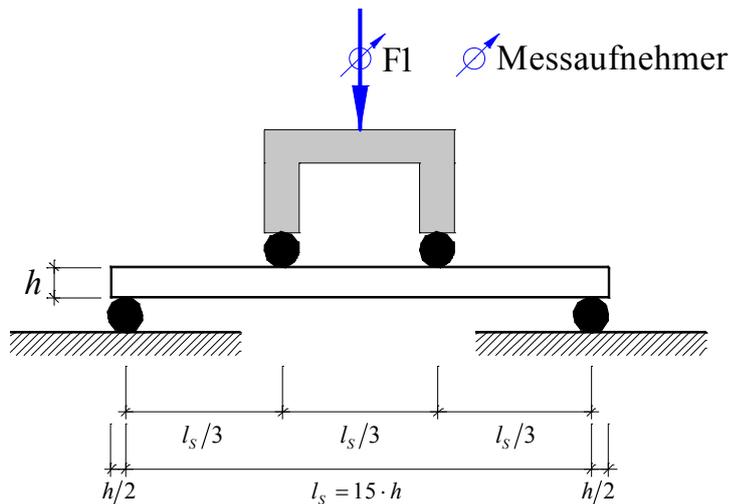


Bild 3-17 Prüfaufbau für die Biegeprüfungen der Keilzinkenverbindungen

### Zugprüfung der Keilzinkungen (3K.Z)

Die Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen wurden in Anlehnung an die DIN EN 408 [N6] bestimmt (Bild 3-18). Abweichend von der DIN EN 408 betrug die freie Prüflänge 150 mm, anstatt den geforderten 1350 mm (mindestens das 9fache des größeren Querschnittsmaßes von  $b = 150$  mm). Die Reduzierung der freien Prüflänge war möglich, da mit den Versuchen die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung untersucht werden sollte. Bei der vorgeschriebenen freien Prüflänge wären innerhalb des Zugbereichs Äste vorhanden gewesen, an denen dann evtl. der Bruch erfolgt wäre. Diese Prüfkörper hätte man dann bei der Auswertung herausnehmen müssen, da an ihnen die Zugfestigkeit des Holzes und nicht die Keilzinkenzugfestigkeit ermittelt worden wäre. Um in möglichst vielen Prüfkörpern ein Versagen der Keilzinkung zu erzwingen, wurden aus diesem Grund die Prüfungen mit einer reduzierten freien Prüflänge durchgeführt. Die Versuche wurden bei der Holzforschung München der technischen Universität München durchgeführt.

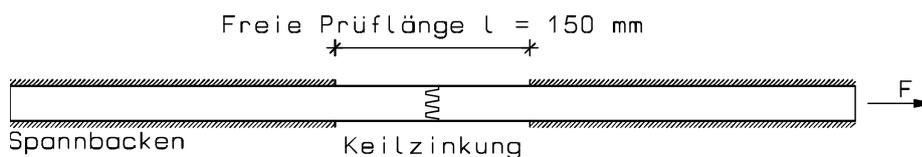


Bild 3-18 Prüfaufbau für die Zugprüfungen der Keilzinkenverbindungen

## 3.7.2 Ergebnisse der Keilzinkenbiegeprüfungen an den zu den Bauteilversuchen zugehörigen Lamellen (3B.B)

### Anmerkungen zu einzelnen Versuchswerten

Bei den Prüfungen konnten drei Versagensarten festgestellt werden:

- Vollständiges Versagen innerhalb des Keilzinkenbereichs (im weiteren als KZV bezeichnet) (siehe Bild 3-19)
- Gleichzeitiges Versagen im Keilzinken- und Ast- bzw. Holzbereich (im weiteren als KZV+Ast/Holz bezeichnet) (siehe Bild 3-20)
- Vollständiges Versagen außerhalb des Keilzinkenbereichs im Holz oder infolge eines Astes (im weiteren als Ast/Holz bezeichnet) (siehe Bild 3-21)

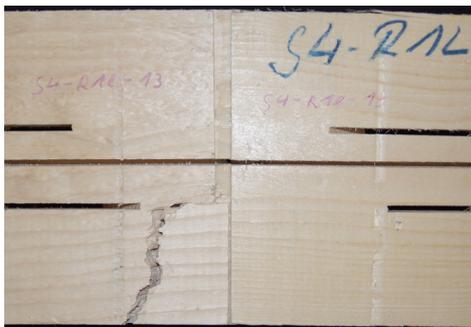


Liegende Keilzinkung



Stehende Keilzinkung

**Bild 3-19 Vollständiges Versagen innerhalb des Keilzinkenbereichs**  
(links: liegende Keilzinkung, rechts: stehende Keilzinkung)



Liegende Keilzinkung



Stehende Keilzinkung

**Bild 3-20 Gleichzeitiges Versagen im Keilzinken- und Ast- bzw. Holzbereich**  
(links: liegende Keilzinkung, rechts: stehende Keilzinkung)



Liegende Keilzinkung



Stehende Keilzinkung

**Bild 3-21 Vollständiges Versagen außerhalb des Keilzinkenbereichs**  
(links: liegende Keilzinkung, rechts: stehende Keilzinkung)

Manche Prüfkörper hatten im Bereich der Keilzinkungen Äste oder Faserabweichungen, die nach DIN EN 385 [N6] (Abschnitt 5.2.2) jedoch unzulässig sind. In der Tabelle 3-23 sind die Prüfkörper aufgeführt, bei denen derartige „Unregelmäßigkeiten“ im Bereich der Keilzinkung festgestellt wurden.

**Tabelle 3-23 Festgestellte Unregelmäßigkeiten an vereinzelten Prüfkörpern im Bereich der Keilzinkung der Prüfsérie 3B.B**

Reihe	PK-Nr.	Bemerkung zur KZV	Reihe	PK-Nr.	Bemerkung zur KZV
3B.B- ml1	02	Ast im Keilzinkenbereich	3B.B- ms1	07	Ast im Keilzinkenbereich
	06	Ast im Keilzinkenbereich		08	Ast im Keilzinkenbereich
3B.B- ml3	02-2	Ast im Keilzinkenbereich	3B.B- ms3	07-2	Ast im Keilzinkenbereich
	03-3	Ast im Keilzinkenbereich		08-1	Ast im Keilzinkenbereich
	05-1	Faserabweichung im Keilzinkenbereich		10-1	Ast im Keilzinkenbereich

Keilzinkenproben mit vollständigem Versagen außerhalb des Keilzinkenbereichs sowie mit einem Ast oder einer Faserabweichung im Keilzinkenbereich werden als „Ausreißer“ betrachtet und werden bei den weiteren Untersuchungen nicht mit herangezogen. Die Keilzinkenbiegefestigkeiten wurden mit

einer Log-Normalverteilung statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse mit Berücksichtigung der „Ausreißer“ sind in der Tabelle F-35 und im Diagramm F-84 im Anhang F.3 angegeben. Die maximalen Prüfkraft für die einzelnen Prüfkörper enthält der Anhang E.3. Die Ergebnisse ohne Berücksichtigung der „Ausreißer“ sind im Anhang D.1.2 zu finden.

In den Versuchsreihen 3B.B-ms1| und 3B.B-ms3| gibt es jeweils einen Versuchswert, der oberhalb der übrigen Versuchswerte liegt. Diese Werte verfälschen sowohl den Mittelwert als auch die Streuung, weshalb sie für die weiteren Betrachtungen unberücksichtigt bleiben.

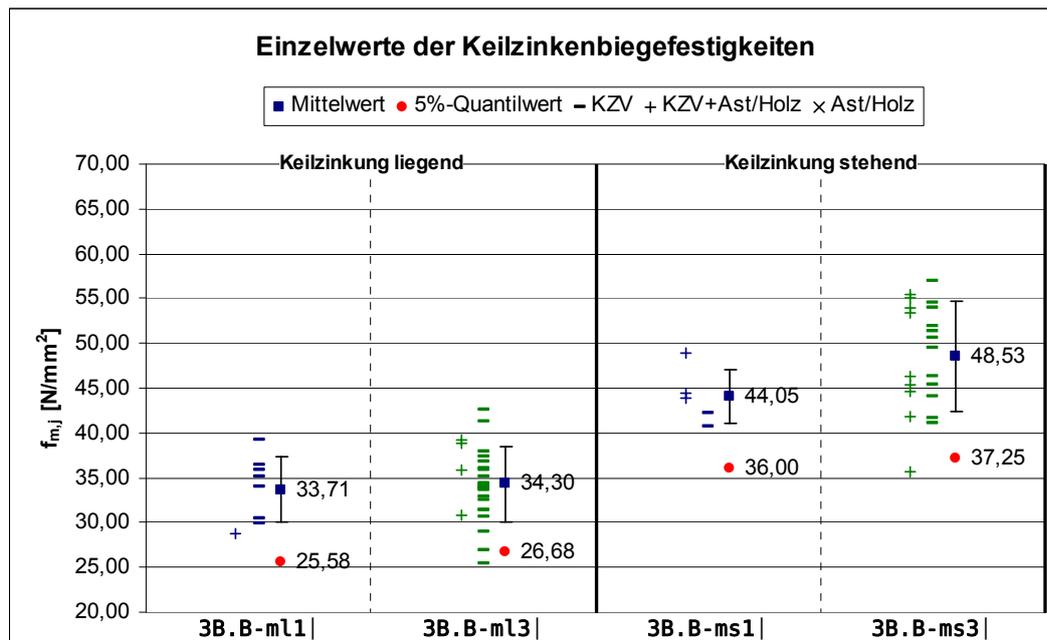
Im nachfolgenden Abschnitt sind die Ergebnisse angegeben, die sich ohne Berücksichtigung dieser beiden Werte ergeben. Dieser Abschnitt enthält lediglich die Ergebnisse, die für die späteren Vergleiche im Abschnitt 4 verwendet werden.

### Verwendete Ergebnisse für die Auswertung

**Tabelle 3-24 Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> der Prüferserie 3B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte)**

Statistischer Wert	3B.B m11	3B.B m13	3B.B ms1	3B.B ms3
Anzahl n	8	26	5	21
Minimum $x_{min}$	28,86	25,39	40,74	35,68
Maximum $x_{max}$	39,15	42,56	48,87	56,96
Mittelwert $x_m$	33,71	34,30	44,05	48,53
Standardabweichung $s_x$	3,69	4,18	3,02	6,07
Variationskoeffizient $v_x$	11,0%	12,2%	6,9%	12,5%
Beiwert Anzahl $k_n^{a)}$	2,471	2,009	2,915	2,061
5%-Quantilwert $x_{05}^{a)}$	25,58	26,68	36,00	37,25

a) Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)



**Diagramm 3-5 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte)**

Die in der Tabelle 3-24 bzw. dem Diagramm 3-5 angegebenen Mittel- und 5%-Quantilwerte werden im Abschnitt 3.7.5 verwendet, um den Einfluss der Keilzinkung (stehend oder liegend) auf die Keilzinkenbiegefestigkeit zu ermitteln.

### 3.7.3 Ergebnisse der Biegeprüfungen an separaten Brettern mit Keilzinkungen (3K.B)

#### Anmerkungen zu einzelnen Versuchswerten

Bei Versuchen zur Ermittlung der Keilzinkenbiegefestigkeit an separaten Brettern waren bei den liegenden und den stehenden Keilzinkungen jeweils 3 Prüfkörper dabei, bei denen innerhalb des Keilzinkenbereiches ein Ast vorhanden war. In der Tabelle 3-25 sind die Nummern der betroffenen Prüfkörper angegeben. Diese Prüfkörper werden bei den weiteren Betrachtungen zu der Keilzinkenbiegefestigkeit nicht berücksichtigt. Die maximalen Prüfkraft für die einzelnen Prüfkörper enthält der Anhang E.4. Die Ermittelten Biegefestigkeiten aller geprüften Proben sind im Anhang F.4 zu finden.

Wie bereits bei den Keilzinkenbiegeversuchen an den zu den Bauteilen zugehörigen Brettern (siehe Abschnitt 3.7.2) konnten auch bei diesen Versuchen die gleichen drei Versagensarten festgestellt werden. Prüfkörper die ein reines Ast/Holz Versagen hatten bleiben bei den nachfolgenden Betrachtungen ebenfalls unberücksichtigt.

Prüfkörper die Unregelmäßigkeiten bzw. unzulässige Keilzinkenverbindungen hatten (beispielsweise Äste innerhalb der Keilzinkenverbindung) sind in der Tabelle 3-25 angegeben.

**Tabelle 3-25 Festgestellte Unregelmäßigkeiten an vereinzelt Prüfkörpern im Bereich der Keilzinkung der Prüferserie 3K.B**

Reihe	PK-Nr.	Bemerkung zur KZV	Reihe	PK-Nr.	Bemerkung zur KZV
3K.B-mL	01	Ast im Keilzinkenbereich	3K.B-ms	06	Ast im Keilzinkenbereich
	02	Ast im Keilzinkenbereich		11	Ast im Keilzinkenbereich
	03	Ast im Keilzinkenbereich		14	Ast im Keilzinkenbereich

#### Verwendete Ergebnisse für die Auswertung

Mit den Ergebnissen der Tabelle D-17 bzw. den Werten aus dem Diagramm D-24 werden im Abschnitt 3.7.5 die Biegefestigkeiten der stehenden Keilzinkungen mit denen der liegenden Keilzinkungen verglichen. Die verwendeten Ergebnisse sind nachfolgend nochmals aufgeführt.

**Tabelle 3-26 Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> der Prüferserie 3K.B (ohne „Ausreißer“)**

Statistischer Wert	3K.B mL	3K.B ms
Anzahl n	14	15
Minimum $x_{\min}$	28,92	34,80
Maximum $x_{\max}$	45,45	61,39
Mittelwert $x_m$	35,04	46,53
Standardabweichung $s_x$	3,72	7,39
Variationskoeffizient $v_x$	10,6%	15,9%
Beiwert Anzahl $k_n^{a)}$	2,189	2,164
5%-Quantilwert $x_{05}^{a)}$	27,64	32,66
<sup>a)</sup> Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)		

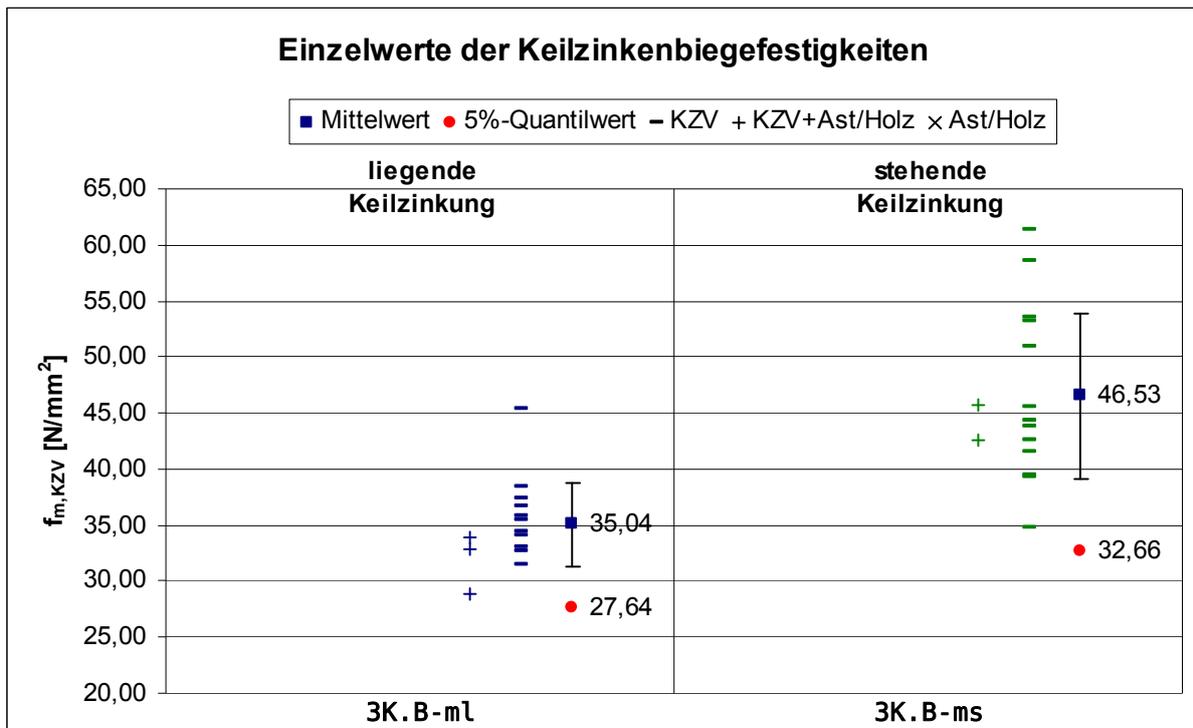


Diagramm 3-6 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüfsrie 3K.B (ohne „Ausreißer“)

### 3.7.4 Ergebnisse der Zugprüfungen an Brettern mit Keilzinkungen (3K.Z)

#### Anmerkungen zu einzelnen Versuchswerten

Bei Versuchen zur Ermittlung der Keilzinkenzugfestigkeit waren sowohl bei den liegenden als auch den stehenden Keilzinkungen Prüfkörper dabei, bei denen innerhalb des Keilzinkenbereiches Unregelmäßigkeiten vorhanden waren. In der Tabelle 3-27 sind die Nummern der betroffenen Prüfkörper angegeben. Diese Prüfkörper werden bei den weiteren Betrachtungen zu der Keilzinkenzugfestigkeit nicht berücksichtigt. Die maximalen Prüfkraft für die einzelnen Prüfkörper enthält der Anhang E.5. Die Ermittelten Biegefestigkeiten aller geprüften Proben sind im Anhang F.5 zu finden.

Wie bereits bei den Keilzinkenbiegeversuchen an den zu den Bauteilen zugehörigen Brettern (siehe Abschnitt 3.7.2) konnten auch bei diesen Versuchen die gleichen drei Versagensarten festgestellt werden. Prüfkörper die ein reines Ast/Holz Versagen hatten bleiben bei den nachfolgenden Betrachtungen ebenfalls unberücksichtigt.

Tabelle 3-27 Festgestellte Unregelmäßigkeiten an vereinzelt Prüfkörpern im Bereich der Keilzinkung der Prüfsrie 3K.Z

Reihe	PK-Nr.	Bemerkung zur KZV	Reihe	PK-Nr.	Bemerkung zur KZV
3K.Z-mL	05	Ast im Keilzinkenbereich	3K.B-ms	02	Ast im Keilzinkenbereich
	06	Blitzschaden im Keilzinkenbereich		06	Ast im Keilzinkenbereich
	07	Riss im Zinkengrund (Vorschädigung)		08	Ast im Keilzinkenbereich
	09	Ast im Keilzinkenbereich		13	Zinken schlecht verklebt
	11	Äste im Einspannbereich		17	Ast im Keilzinkenbereich
	15	Ast im Keilzinkenbereich			

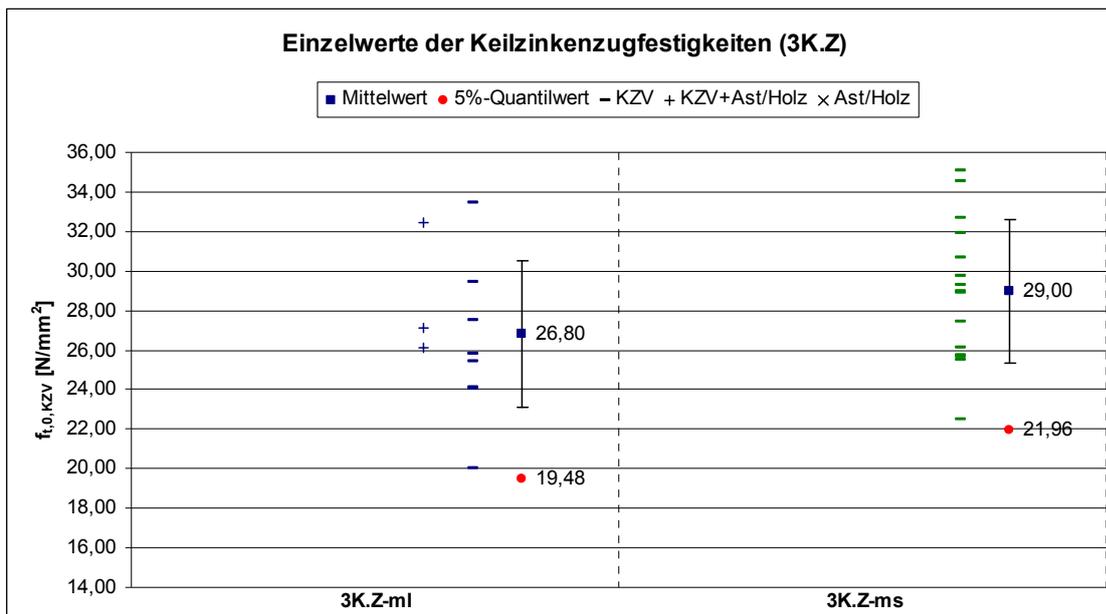
#### Verwendete Ergebnisse für die Auswertung

Die Ergebnisse der Tabelle 3-28 bzw. die Werte aus dem Diagramm 3-7 sind die Grundlage für den Vergleich der Keilzinkenfestigkeiten. Der Abschnitt 3.7.5 enthält die Ergebnisse für den Vergleich der Keilzinkenfestigkeiten.

**Tabelle 3-28 Statistische Werte der Keilzinkenzugfestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> für die Prüferserie 3K.Z**

Statistischer Wert	3K.Z ml	3K.Z ms
Anzahl n	12	15
Minimum $x_{\min}$	20,02	22,46
Maximum $x_{\max}$	33,45	35,10
Mittelwert $x_M$	26,80	29,00
Standardabweichung $s_x$	3,71	3,63
Variationskoeffizient $v_x$	13,8%	12,5%
Beiwert Anzahl $k_n^{a)}$	2,251	2,164
5%-Quantilwert $x_{05}^{a)}$	19,48	21,96

<sup>a)</sup> Berechnet nach DIN EN 14358 [N10]  
(Log-Normalverteilung)



**Diagramm 3-7 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenzugfestigkeiten der Prüferserie 3K.Z**

### 3.7.5 Vergleich der Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen

#### Verwendete Ergebnisse für die Auswertung der verschiedenen Parameter

Für die nachfolgenden Vergleiche werden die Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen der vorherigen Abschnitte verwendet. In der Tabelle 3-29 ist nochmals zusammengestellt, aus welchem Abschnitt, welcher Tabelle und welchem Diagramm die Werte für die nachfolgenden Vergleiche stammen. Die verwendeten Werte sind in der Tabelle 3-30 und dem Diagramm 3-8 zusammengefasst.

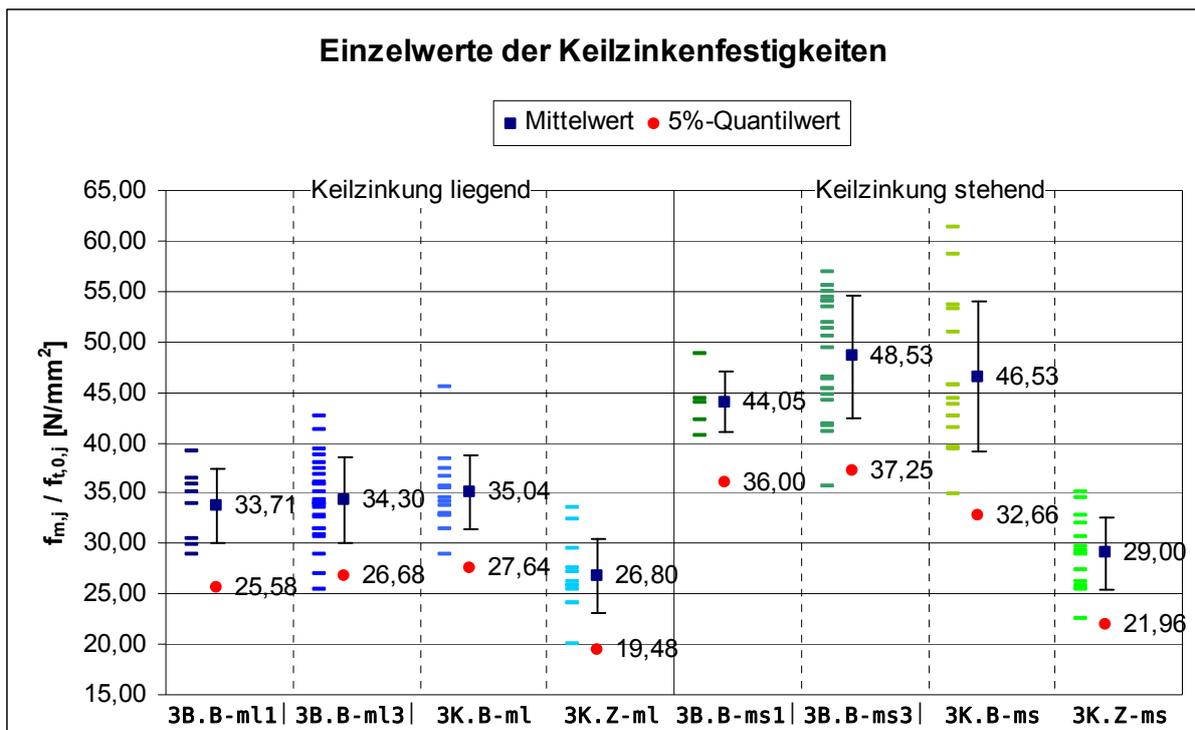
**Tabelle 3-29 Zusammenstellung der Quellen für die Werte für den Vergleich der Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen**

Prüferserie	Abschnitt	Tabelle	Diagramm
3B.B	Abschnitt 3.7.2	Tabelle 3-24	Diagramm 3-5
3K.B	Abschnitt 3.7.3	Tabelle 3-26	Diagramm 3-6
3K.Z	Abschnitt 3.7.4	Tabelle 3-28	Diagramm 3-7

**Tabelle 3-30 Zusammenfassung der verwendeten statistischen Werte der Keilzinkenfestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> für den Vergleich der Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen der Prüfserien 3B.B (Tabelle 3-24), 3K.B (Tabelle 3-26) und 3K.Z (Tabelle 3-28)**

Statistischer Wert	3B.B ml1	3B.B ml3	3K.B ml	3K.Z ml	3B.B ms1	3B.B ms3	3K.B ms	3K.Z ms
Anzahl n	8	26	14	12	5	21	15	15
Minimum $x_{min}$	28,86	25,39	28,92	20,02	40,74	35,68	34,80	22,46
Maximum $x_{max}$	39,15	42,56	45,45	33,45	48,87	56,96	61,39	35,10
Mittelwert $x_m$	33,71	34,30	35,04	26,80	44,05	48,53	46,53	29,00
Standardabweichung $s_x$	3,69	4,18	3,72	3,71	3,02	6,07	7,39	3,63
Variationskoeffizient $v_x$	11,0%	12,2%	10,6%	13,8%	6,9%	12,5%	15,9%	12,5%
Beiwert Anzahl $k_n^{a)}$	2,471	2,009	2,189	2,251	2,915	2,061	2,164	2,164
5%-Quantilwert $x_{05}^{a)}$	25,58	26,68	27,64	19,48	36,00	37,25	32,66	21,96

<sup>a)</sup> Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)



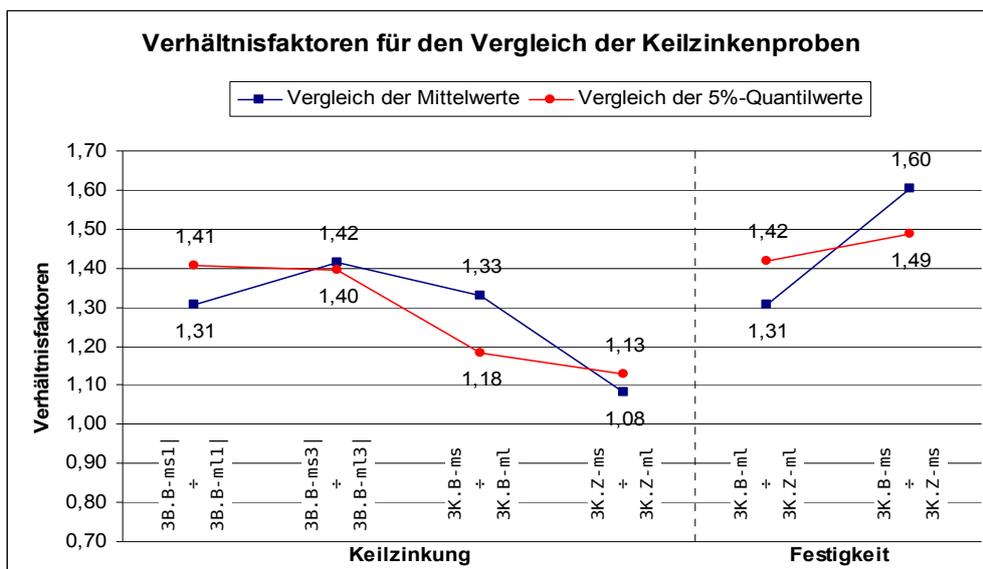
**Diagramm 3-8 Zusammenfassung der Diagramme für den Vergleich der Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen der Prüfserien 3B.B (Diagramm 3-5), 3K.B (Diagramm 3-6) und 3K.Z (Diagramm 3-7)**

Mit den aus diesen Einzelwerten gewonnenen Mittelwerten und 5%-Quantilwerten werden nun die einzelnen Versuchsreihen miteinander verglichen. Dieser Vergleich soll Aufschluss über die verschiedenen Einflüsse (siehe Abschnitt 2.4) und deren Größenordnung geben. Nach welchen Gesichtspunkten die verschiedenen Versuchsreihen miteinander verglichen werden ist in der Tabelle 3-31 angegeben. Die Ergebnisse (Verhältnissfaktoren) der einzelnen Untersuchungen sind im Diagramm 3-9 dargestellt.

**Tabelle 3-31 Übersicht der untersuchten Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen**

Untersuchter Einfluss	Vergleich			Beschreibung
	von	÷	mit	
Keilzinken- verbindung	3B.B-ms1	÷	3B.B-m11	Mit dem untersuchten Einfluss „Keilzinkung“ soll untersucht werden, ob die Tragfähigkeiten der Keilzinkenverbindungen von der Art der Keilzinkung (liegend oder stehend) abhängt.
	3B.B-ms3	÷	3B.B-m13	
	3K.B-ms	÷	3K.B-m1	
	3K.Z-ms	÷	3K.Z-m1	
Keilzinken- festigkeit	3K.B-m1	÷	3K.Z-m1	Mit dem untersuchten Einfluss „Festigkeit“ soll untersucht werden, wie groß die Verhältnisse der Keilzinkenbiegefestigkeit zur Keilzinkenzugfestigkeit für die beiden Arten der Keilzinkungen (liegend / stehend) sind
	3K.B-ms	÷	3K.Z-ms	

**Verhältnissfaktoren für die verschiedenen Parameter**



**Diagramm 3-9 Verhältnissfaktoren für Vergleich der Keilzinkenprüfungen der Prüfserien 3B.B, 3K.B, 3K.Z**

**Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Keilzinkung“**

Vergleich der stehenden mit der liegenden Keilzinkung

(3B.B-ms1|+3B.B-m11|, 3B.B-ms3|+3B.B-m13|, 3K.B-ms+3K.B-m1, 3K.Z-ms+3K.Z-m1)

Für den Vergleich der Keilzinkungen sind die relevanten Verhältnissfaktoren für den Mittelwert und 5%-Quantilwert nochmals in der Tabelle 3-32 angegeben.

**Tabelle 3-32 Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Keilzinkungen der Prüfserien 3B.B, 3K.B und 3K.Z**

von	Vergleich	mit	Verhältnis für	
			Mittelwert	5%-Quantilwert
3B.B-ms1	÷	3B.B-m11	1,31	1,41
3B.B-ms3	÷	3B.B-m13	1,42	1,40
3K.B-ms	÷	3K.B-m1	1,33	1,18
3K.Z-ms	÷	3K.Z-m1	1,08	1,13

*Erkenntnisse – Biegefestigkeiten der Keilzinkungen*

Der Vergleich mit den Mittel- und den 5%-Quantilwerten zeigt, dass die stehenden Keilzinkenverbindungen eine deutlich höhere Biegefestigkeit aufweisen als die liegenden. Die einzelnen Verhältnissfaktoren variieren jedoch beträchtlich. Dies hängt mit den größeren Streuungen

der Einzelwerte bei den stehenden Keilzinkungen zusammen (siehe Tabelle 3-30). Während bei den liegenden Keilzinkungen die Variationskoeffizienten allesamt bei ungefähr 11% liegen, fallen die Variationskoeffizienten für die stehenden Keilzinkungen mit 7%, 12,5% und 16% sehr unterschiedlich aus. Insgesamt fallen die Variationskoeffizienten für die Keilzinkenbiegefestigkeiten jedoch sowohl für die liegenden als auch stehenden Keilzinkungen sehr gering aus. Aus diesem Grund werden für die Verhältnisse der Keilzinkenbiegefestigkeiten ausschließlich die Ergebnisse der Mittelwerte herangezogen. Die Verhältnisfaktoren der Mittelwerte zeigen deutlich, dass die stehenden Keilzinkungen eine um ca. 30% höhere Biegefestigkeit haben, als die liegenden Keilzinkungen.

*Erkenntnisse – Zugfestigkeiten der Keilzinkungen*

Der Vergleich der stehenden mit den liegenden Keilzinkungen für die Zugfestigkeiten zeigt ebenfalls, dass die stehende Keilzinkung eine höhere Zugfestigkeit hat, als die liegende. Im Gegensatz zu den Biegefestigkeiten, fallen sie jedoch deutlich geringer aus. Der Vergleich zeigt, dass die stehende Keilzinkung eine um ca. 10% höhere Zugfestigkeit hat, als die liegende Keilzinkung.

**Bewertung der Ergebnisse für den Parameter „Festigkeit“**

Vergleich der Festigkeiten der Keilzinkungen (3K.B-m<sub>l</sub>+3K.Z-m<sub>l</sub>, 3K.B-ms+3K.Z-ms)

In der Tabelle 3-33 sind die Verhältnisfaktoren für die Mittel- und 5%-Quantilwerte angegeben, die sich für den Vergleich der Keilzinkenfestigkeiten ergeben.

**Tabelle 3-33 Verhältnisfaktoren für den Vergleich der Keilzinkenfestigkeiten der Prüfserien 3K.B und 3K.Z**

von	Vergleich		Verhältnis für	
		mit	Mittelwert	5%-Quantilwert
3K.B-m <sub>l</sub>	÷	3K.Z-m <sub>l</sub>	1,31	1,42
3K.B-ms	÷	3K.Z-ms	1,60	1,49

*Erkenntnisse*

Anhand der Verhältnisfaktoren der obigen Tabelle ist deutlich zu erkennen, dass die Biegefestigkeit höher ist als die Zugfestigkeit. Die Verhältnisfaktoren der 5%-Quantilwerte fallen für beide Keilzinkungen mit ca. 1,40 ungefähr gleich groß aus. Bei dem Vergleich der Mittelwerte fallen die Verhältnisfaktoren für die liegenden und stehenden Keilzinkungen jedoch unterschiedlich aus. Die Biegefestigkeit der liegenden Keilzinkungen fällt um ca. 30% höher aus als die Zugfestigkeit. Bei den stehenden Keilzinkungen fällt das Verhältnis Biege- zu Zugfestigkeit mit ca. 60% nochmals um das doppelte höher aus, wie bei den liegenden Keilzinkungen.

### 3.7.6 Zusammenfassung

Nachfolgend sind die Größenordnungen der ermittelten Keilzinkenfestigkeiten für die einzelnen Versuchsreihen angegeben.

**Tabelle 3-34 Zusammenfassung der Keilzinkenfestigkeiten für die Prüferie 3B.B, 3K.B und 3K.Z (Werte in N/mm<sup>2</sup>)**

Versuchsreihe	liegende Keilzinkung				stehende Keilzinkung			
	Biegung		Zug		Biegung		Zug	
	3B.B mL1	3B.B mL3	3K.B mL	3K.Z mL	3B.B ms1	3B.B ms3	3K.B ms	3K.Z ms
Mittelwert $f_{m,M}$	ca. 34	ca. 34	ca. 35	ca. 27	ca. 44	ca. 48	ca. 46	ca. 29
5%-Quantilwert $f_{m,j,05}$	ca. 26	ca. 27	ca. 28	ca. 19	ca. 36	ca. 37	ca. 33	ca. 22

#### Einfluss der Keilzinkung

- Keilzinkung hat großen Einfluss auf die Keilzinkenbiegefestigkeit  
stehende Keilzinkung um ca. 30% höhere Biegefestigkeit als liegende Keilzinkung
- Keilzinkung hat nur geringen Einfluss auf die Keilzinkenzugfestigkeit  
stehende Keilzinkung um ca. 10% höhere Zugfestigkeit als liegende Keilzinkung

**Ergebnis:** Keilzinkenbiegefestigkeit hängt stark von der Art der Keilzinkung ab  
Keilzinkenzugfestigkeit hängt weniger von der Art der Keilzinkung ab

#### Vergleich Zug- / Biegefestigkeit

- Bei liegender Keilzinkung mittlere Biegefestigkeit um ca. 30% höher als die Zugfestigkeit
- Bei stehender Keilzinkung mittlere Biegefestigkeit um ca. 60% höher als die Zugfestigkeit
- 5%-Quantilwert der Biegefestigkeit um ca. 40% höher als die Zugfestigkeit für liegende und stehende Keilzinkung

**Ergebnis:** Verhältnis der Keilzinkenbiegefestigkeiten zu Keilzinkenzugfestigkeiten fallen für die liegenden und stehenden Keilzinkungen unterschiedlich aus

## 4 Vergleich der Bauteil-Festigkeiten und Keilzinken-Festigkeiten

In diesem Abschnitt werden die aus den vorherigen Abschnitten 3.5, 3.6 und 3.7 ermittelten Festigkeiten miteinander verglichen. Mit den aus diesen Gegenüberstellungen gewonnenen Ergebnissen und Erkenntnissen werden dann allgemeine Beziehungen zur Bestimmung der Bauteilbiegefestigkeit in Abhängigkeit der in den vorherigen Abschnitten untersuchten Parametern angegeben.

### 4.1 Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse und Erkenntnisse

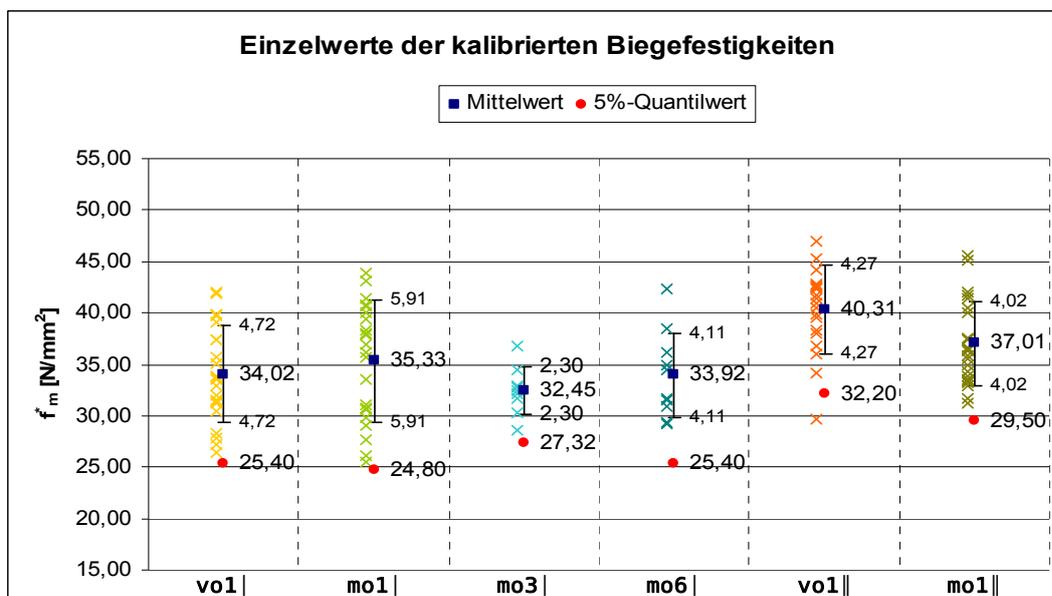
#### 4.1.1 Bauteile ohne Keilzinkenverbindungen (1B.B)

Für die nachfolgenden Vergleiche werden die Ergebnisse der Bauteile ohne Keilzinkenverbindungen aus Abschnitt 3.5 aus der Tabelle 3-6 und Diagramm 3-1 verwendet. Die dort angegebenen Werte sind nachfolgend nochmals aufgeführt.

**Tabelle 4-1** Verwendete Ergebnisse Prüferserie 1B.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

Statistischer Wert	1B.B vo1	1B.B mo1	1B.B mo3	1B.B mo6	1B.B vo1	1B.B mo1
Anzahl n	22	22	9	10	20	23
Minimum $x_{\min}$	26,50	25,56	28,63	29,23	29,62	31,24
Maximum $x_{\max}$	42,00	43,95	36,73	42,32	46,92	45,60
Mittelwert $x_m$	34,02	35,33	32,45	33,92	40,31	37,01
Standardabweichung $s_x$	4,72	5,91	2,30	4,11	4,27	4,02
Variationskoeffizient $v_x$	13,9%	16,7%	7,1%	12,1%	10,6%	10,9%
Beiwert Anzahl $k_n^a)$	2,05	2,05	2,40	2,34	2,07	2,04
5%-Quantilwert $x_{05}^a)$	25,40	24,80	27,32	25,40	32,20	29,50

<sup>a)</sup> Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)



**Diagramm 4-1** Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 1B.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

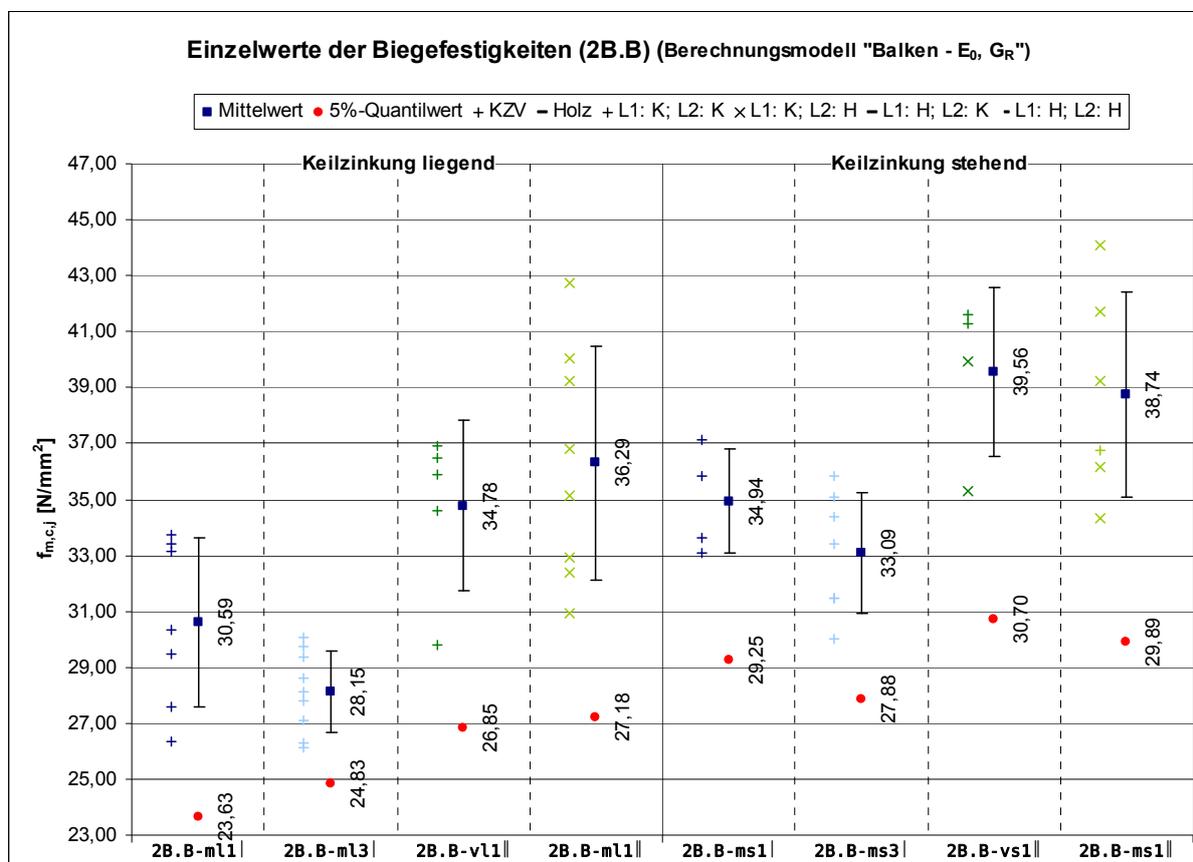
### 4.1.2 Bauteile mit Keilzinkenverbindungen (2B.B)

Für die nachfolgenden Vergleiche werden die Ergebnisse der Bauteile mit Keilzinkenverbindungen aus Abschnitt 3.6 aus der Tabelle 3-16 und Diagramm 3-3 verwendet. Die dort angegebenen Werte sind nachfolgend nochmals aufgeführt.

**Tabelle 4-2** Verwendete Ergebnisse Prüferserie 2B.B für Vergleich mit der Prüferserie 1B.B, 3B.B und 3K.Z

Statistischer Wert	2B.B ml1	2B.B ml3	2B.B vl1	2B.B ml1	2B.B ms1	2B.B ms3	2B.B vs1	2B.B ms1
Anzahl n	7	9	5	8	4	7	5	6
Minimum $x_{min}$	26,32	26,15	29,81	30,94	33,10	29,98	35,28	34,34
Maximum $x_{max}$	33,73	30,08	36,90	42,75	37,13	35,81	46,03	44,11
Mittelwert $x_M$	30,59	28,15	34,78	36,29	34,94	33,09	40,87	38,74
Standardabweichung $s_x$	3,02	1,46	3,05	4,16	1,88	2,18	3,92	3,66
Variationskoeffizient $v_x$	9,9%	5,2%	8,8%	11,5%	5,4%	6,6%	9,6%	9,4%
Beiwert Anzahl $k_n^a)$	2,569	2,397	2,915	2,471	3,281	2,569	2,915	2,706
5%-Quantilwert $x_{05}^a)$	23,63	24,83	26,85	27,18	29,25	27,88	30,78	29,89

a) Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)



**Diagramm 4-2** Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 2B.B für Vergleich mit der Prüferserie 1B.B, 3B.B und 3K.Z

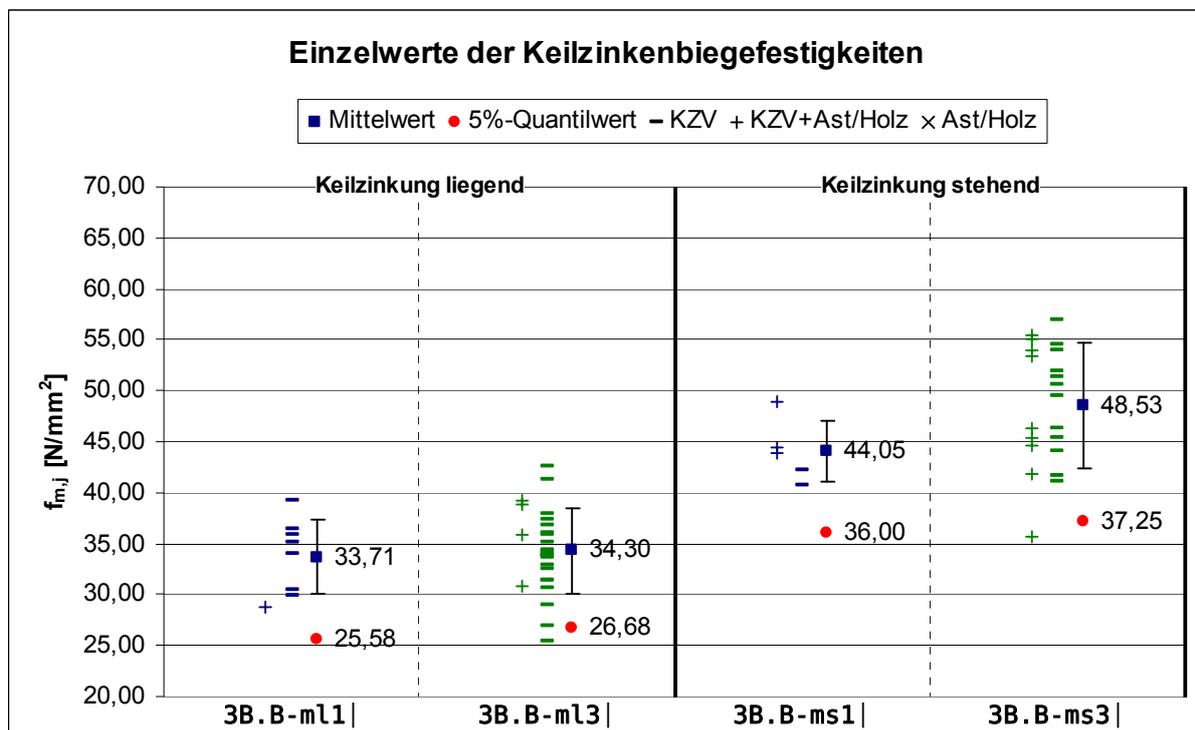
### 4.1.3 Keilzinkungen Biegeprüfungen an den zu den Bauteilversuchen gehörenden Brettern (3B.B)

Für die nachfolgenden Vergleiche werden die Ergebnisse der Keilzinkenverbindungen an separaten Brettern aus Abschnitt 3.7.2 aus der Tabelle 3-24 und Diagramm 3-5 verwendet. Die dort angegebenen Werte sind nachfolgend nochmals aufgeführt.

**Tabelle 4-3** Verwendete Ergebnisse Prüferserie 3B.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

Statistischer Wert	3B.B ml1	3B.B ml3	3B.B ms1	3B.B ms3
Anzahl n	8	26	5	21
Minimum $x_{min}$	28,86	25,39	40,74	35,68
Maximum $x_{max}$	39,15	42,56	48,87	56,96
Mittelwert $x_m$	33,71	34,30	44,05	48,53
Standardabweichung $s_x$	3,69	4,18	3,02	6,07
Variationskoeffizient $v_x$	11,0%	12,2%	6,9%	12,5%
Beiwert Anzahl $k_n^{a)}$	2,471	2,009	2,915	2,061
5%-Quantilwert $x_{05}^{a)}$	25,58	26,68	36,00	37,25

a) Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)



**Diagramm 4-3** Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 3B.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

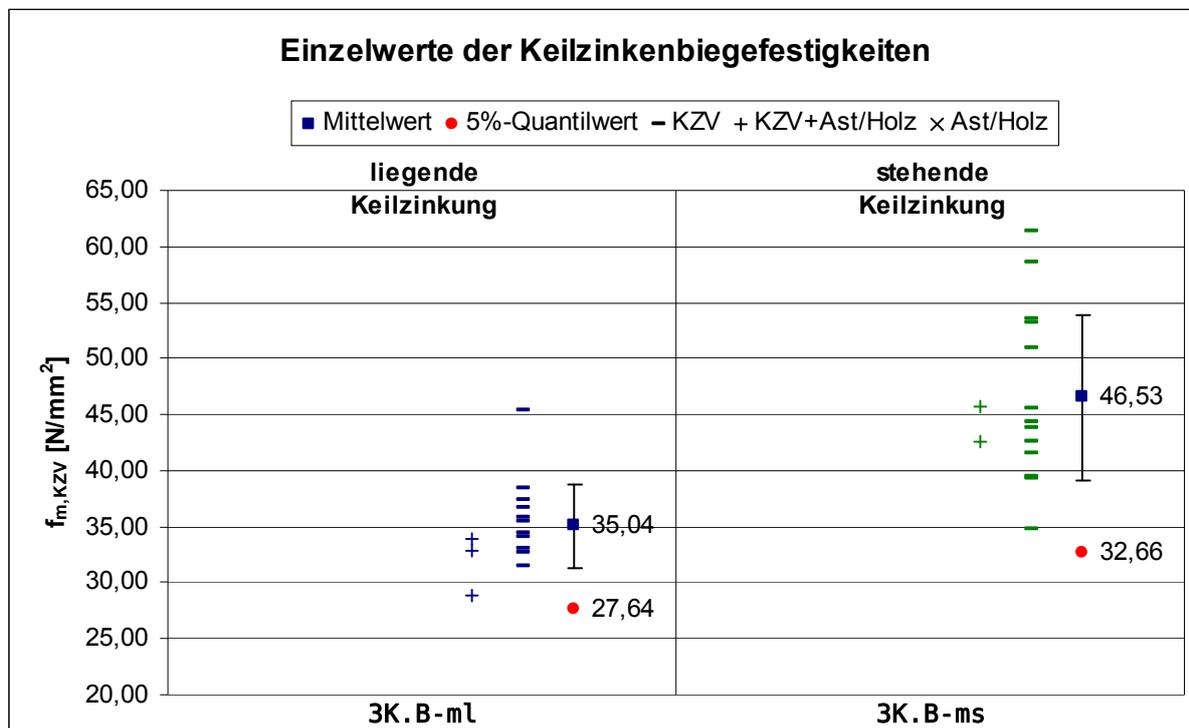
### 4.1.4 Keilzinkungen Zugprüfungen (3K.B)

Für die nachfolgenden Vergleiche werden die Ergebnisse der Keilzinkenverbindungen an separaten Brettern aus Abschnitt 3.7.3 aus der Tabelle 3-26 und Diagramm 3-6 verwendet. Die dort angegebenen Werte sind nachfolgend nochmals aufgeführt.

**Tabelle 4-4** Verwendete Ergebnisse der Prüferserie 3K.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

Statistischer Wert	3K.B m <sub>l</sub>	3K.B m <sub>s</sub>
Anzahl n	14	15
Minimum $x_{min}$	28,92	34,80
Maximum $x_{max}$	45,45	61,39
Mittelwert $x_m$	35,04	46,53
Standardabweichung $s_x$	3,72	7,39
Variationskoeffizient $v_x$	10,6%	15,9%
Beiwert Anzahl $k_n^{a)}$	2,189	2,164
5%-Quantilwert $x_{05}^{a)}$	27,64	32,66

a) Berechnet nach DIN EN 14358 [N10]  
(Log-Normalverteilung)



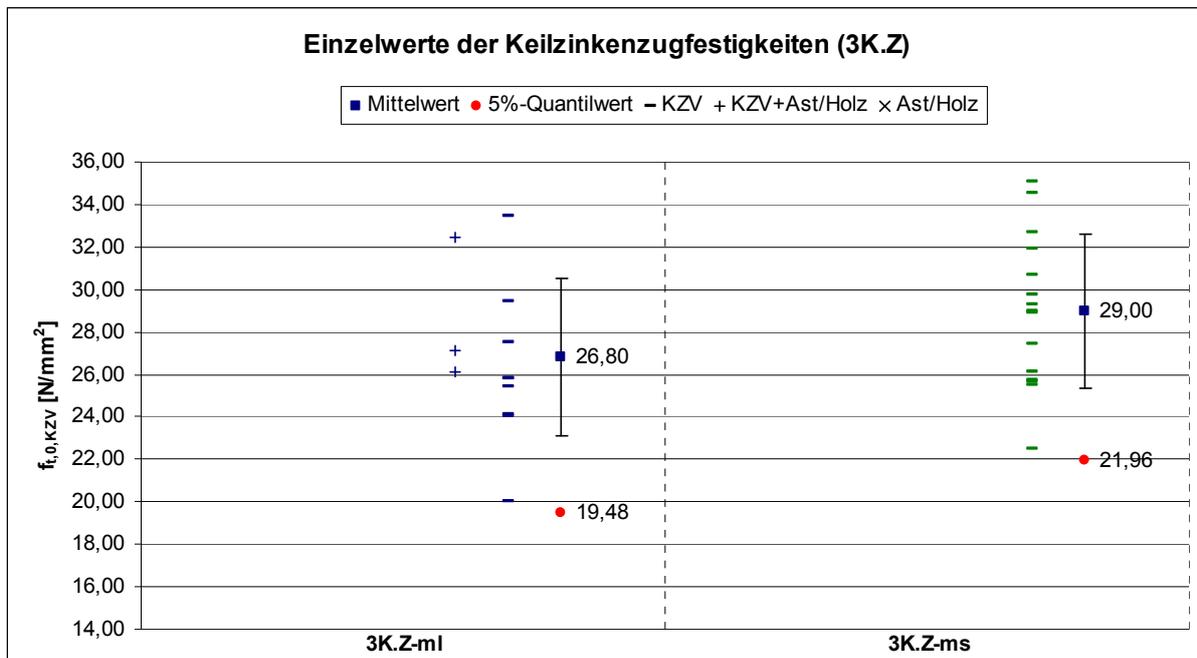
**Diagramm 4-4** Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 3K.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

### 4.1.5 Keilzinkungen Zugprüfungen (3K.Z)

Für die nachfolgenden Vergleiche werden die Ergebnisse der Keilzinkenverbindungen an separaten Brettern aus Abschnitt 3.7.4 aus der Tabelle 3-28 und Diagramm 3-7 verwendet. Die dort angegebenen Werte sind nachfolgend nochmals aufgeführt.

**Tabelle 4-5** Verwendete Ergebnisse der Prüferserie 3K.Z für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

Statistischer Wert	3K.Z ml	3K.Z ms
Anzahl n	12	15
Minimum $x_{min}$	20,02	22,46
Maximum $x_{max}$	33,45	35,10
Mittelwert $x_M$	26,80	29,00
Standardabweichung $s_x$	3,71	3,63
Variationskoeffizient $v_x$	13,8%	12,5%
Beiwert Anzahl $k_n^{a)}$	2,251	2,164
5%-Quantilwert $x_{05}^{a)}$	19,48	21,96
<small>a) Berechnet nach DIN EN 14358 [N10] (Log-Normalverteilung)</small>		



**Diagramm 4-5** Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 3K.Z für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B

## 4.2 Vergleich der Bauteilfestigkeiten ohne und mit Keilzinkungen

### Untersuchte Verhältnissfaktoren

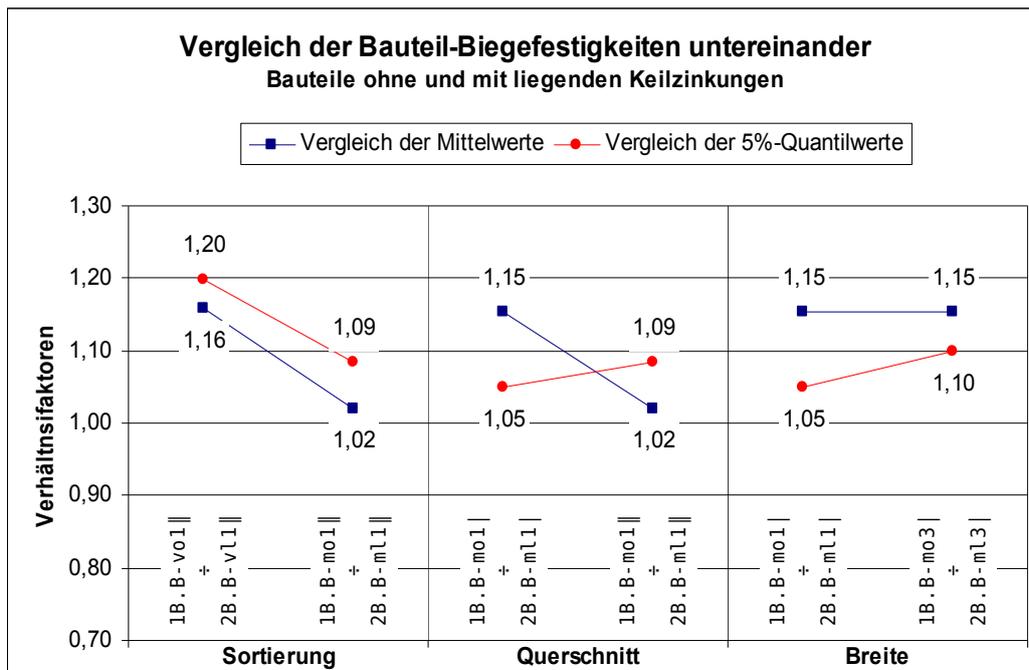
Nachfolgend werden die Ergebnisse der Bauteile ohne Keilzinkenverbindungen mit den Ergebnissen der Bauteile mit Keilzinkenverbindungen verglichen. Nach welchen Gesichtspunkten die verschiedenen Versuche miteinander verglichen werden ist in der Tabelle 4-6 angegeben. In Diagramm 4-6 sind die Verhältnissfaktoren der einzelnen Untersuchungen angegeben.

**Tabelle 4-6 Übersicht der verglichen Prüfreiheiten untereinander**

Untersuchter Einfluss	Vergleich		
	von	÷	mit
Sortierung	1B.B-vo1ll	÷	2B.B-vl1ll 2B.B-vs1ll
	1B.B-mo1ll	÷	2B.B-ml1ll 2B.B-ms1ll
Querschnitt	1B.B-mo1l	÷	2B.B-ml1l 2B.B-ms1l
	1B.B-mo1ll	÷	2B.B-ml1ll 2B.B-ms1ll
Breite	1B.B-mo1l	÷	2B.B-ml1l 2B.B-ms1l
	1B.B-mo3l	÷	2B.B-ml3l 2B.B-ms3l

### Verhältnissfaktoren für den Vergleich von 1B.B mit 2B.B

*liegende Keilzinkungen*



**Diagramm 4-6 Vergleich der Biegefestigkeiten der Bauteile ohne Keilzinkungen mit den Biegefestigkeiten der Bauteile mit liegenden Keilzinkungen<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Für Bedeutung der einzelnen Abkürzungen siehe Tabelle 3-6 (S. 25) und Tabelle 3-16 (S. 38)

Stehende Keilzinkungen

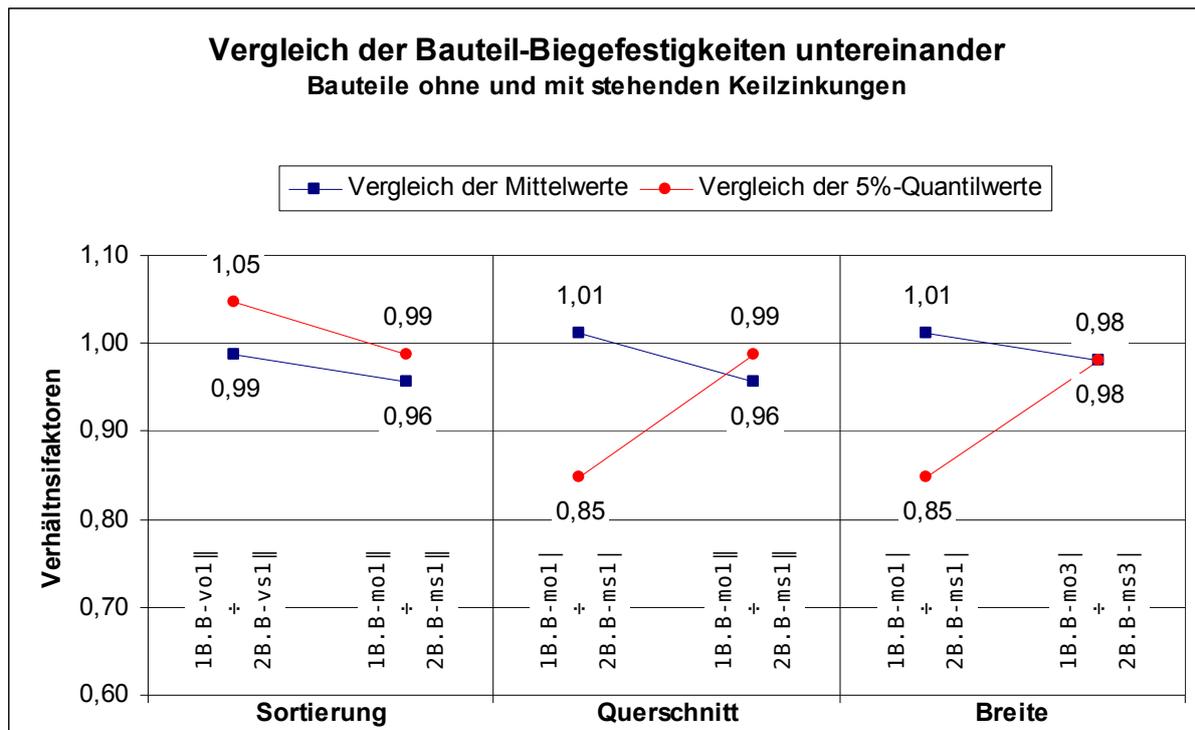


Diagramm 4-7 Vergleich der Biegefestigkeiten der Bauteile ohne Keilzinkungen mit den Biegefestigkeiten der Bauteile mit stehenden Keilzinkungen<sup>1</sup>

**Bewertung der Ergebnisse für den Vergleich von 1B.B mit 2B.B**

**Erkenntnisse – Sortierung**

Der Vergleich der Mittelwerte und 5%-Quantilwerte zeigt, dass die Bauteile mit liegenden Keilzinkungen die größten Verhältniswerte liefern. Die Biegefestigkeiten der liegenden Keilzinkungen fallen geringer aus als die Biegefestigkeiten der stehenden Keilzinkenverbindungen. Da bei den Bauteilprüfkörpern der Anteil der Biegespannung ca. 22% der Biegerandspannung ausmacht hängt somit auch die Bauteilfestigkeit entscheidend von der Keilzinkenbiegefestigkeit ab. Die Versuche zu den Keilzinkenverbindungen haben gezeigt, dass die Biegefestigkeit der liegenden Keilzinkungen wesentlich geringer ausfallen als die Festigkeiten der stehenden Keilzinkungen, wodurch sich die Unterschiede für die beiden Keilzinkenarten bei den Verhältnisfaktoren erklären.

Außerdem zeigt sich, dass die Unterschiede für die Bauteile mit maschinell sortierten Brettern geringer ausfallen, als die für die Bauteile mit visuell sortierten Brettern.

Die Festigkeiten der Bauteile mit maschinell sortierten Brettern und stehenden Keilzinkungen fallen nur geringfügig geringer aus, als die Bauteilfestigkeiten für die Prüfkörper ohne Keilzinkenverbindungen. Die Festigkeiten der Bauteile mit visuell sortierten Brettern und liegenden Keilzinkungen fallen hingegen deutlich geringer aus als für die Bauteile ohne Keilzinkenverbindungen und visuell sortierten Brettern. Der Unterschied beträgt für den Mittelwert ca. 16% und für den 5%-Quantilwert ungefähr 20%.

Ob die Art der Sortierung einen Einfluss auf die Verhältniswerte hat, lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse nicht eindeutig ermitteln.

<sup>1</sup> Für Bedeutung der einzelnen Abkürzungen siehe Tabelle 3-6 (S. 25) und Tabelle 3-16 (S. 38)

**Erkenntnisse – Querschnitt**

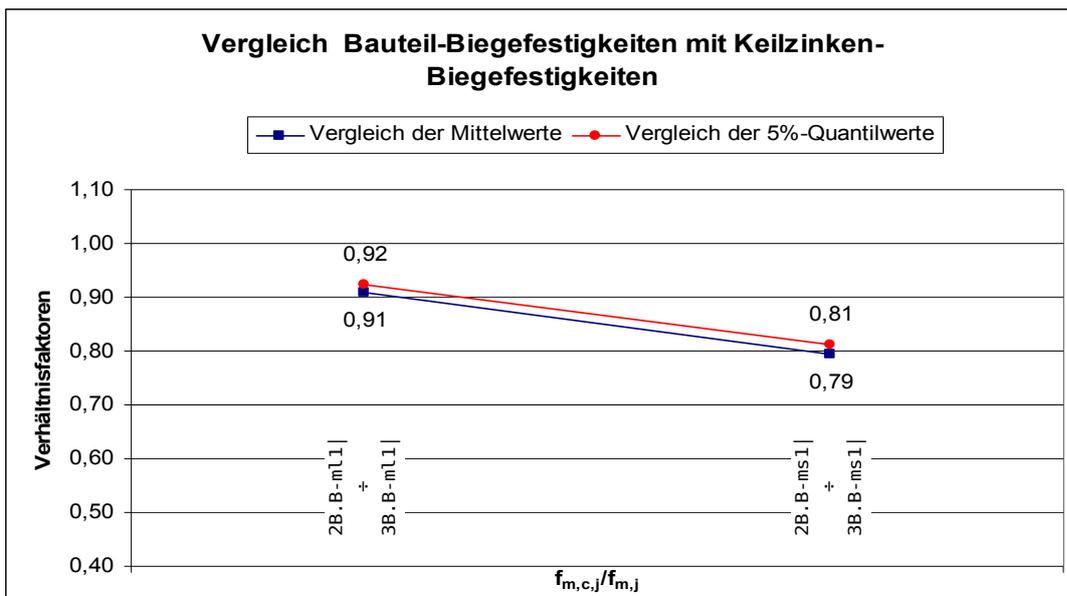
Beim Vergleich der Querschnitte zeigen sich nur relativ geringe Unterschiede. Am größten fällt der Unterschied wiederum für die Bauteile mit liegenden Keilzinkungen aus. Ebenso zeigt sich, dass die Bauteile mit einer faserparallelen Decklage größere Verhältniswerte liefern als die Prüfkörper mit zwei Faserparallelen Decklagen.

**Erkenntnisse – Breite**

Auch bei der Bauteilbreite zeigt sich, dass die Bauteile mit liegenden Keilzinkungen wiederum die größten Verhältniswerte liefert. Bei den Bauteilen mit stehenden Keilzinkungen ist im Vergleich zu den Bauteilen ohne Keilzinkungen kein nennenswerter Unterschied festzustellen.

### 4.3 Vergleich der Festigkeiten der Bauteile mit Keilzinkungen mit den Keilzinken-Biegefestigkeiten

**Verhältnissfaktoren für den Vergleich von 2B.B mit 3B.B**



**Diagramm 4-8 Vergleich der Bauteil-Biegefestigkeiten mit den Keilzinken-Biegefestigkeiten**

**Bewertung der Ergebnisse für den Vergleich von 2B.B mit 3B.B**

Aus diesen Verhältniswerten lässt sich erkennen, dass die Verhältniswerte für die stehenden Keilzinkungen am geringsten ausfallen. Diese Faktoren geben das Verhältnis von Bauteilbiegefestigkeit zu Keilzinkenbiegefestigkeit an. Da die Keilzinkenbiegefestigkeiten insgesamt größer ausfallen als die Bauteilbiegefestigkeiten ergeben sich somit auch Verhältnisfaktoren kleiner eins. Daraus ergibt sich wiederum, dass eine angestrebte Bauteilbiegefestigkeit mit stehenden Keilzinkenverbindungen leichter zu erfüllen ist, als mit liegenden Keilzinkenverbindungen. Dies hängt damit zusammen, dass die stehende Keilzinkung auf Grund der Beanspruchung des Keilzinkenprofils höhere Keilzinkenbiegefestigkeiten aufweisen, als liegende Keilzinkungen

Die Verhältniswerte sind für den Mittelwert und 5%-Quantilwert sowohl für die liegende als auch stehende Keilzinkenverbindung gleich groß. Bei der liegenden Keilzinkung liegt er bei 0,90, für die stehende Keilzinkung liegt der Verhältnisfaktor bei 0,80. Um eine angestrebte Bauteilbiegefestigkeit von  $f_{m,c,j,05} = 24 \text{ N/mm}^2$  zu erreichen müssen die Keilzinkungen mindestens eine charakteristische Biegefestigkeit von

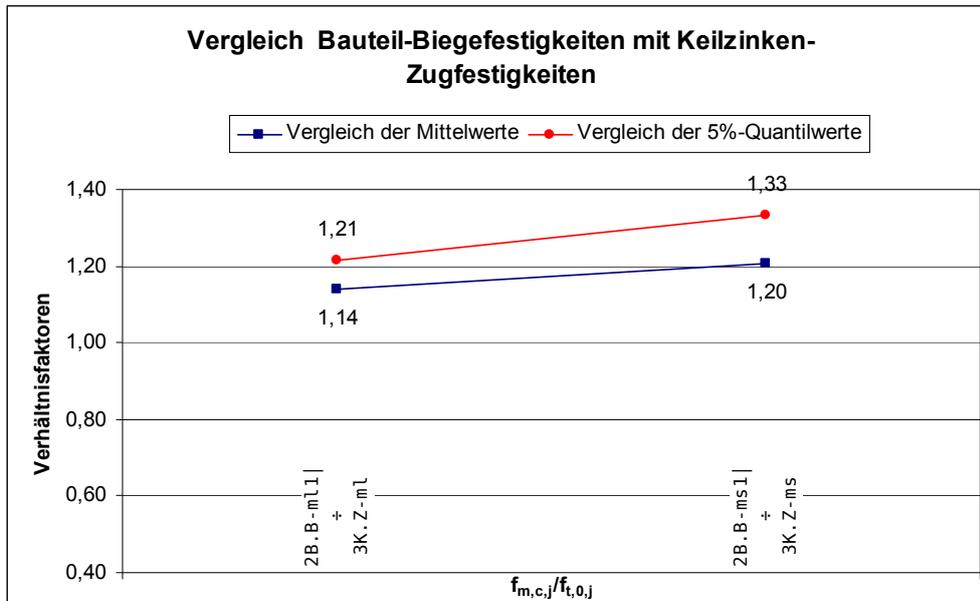
Liegende Keilzinkung:  $f_{m,j,05} = f_{m,c,j,05}/0,9 = 24/0,9 = 26,7 \text{ N/mm}^2$

Stehende Keilzinkung:  $f_{m,j,05} = f_{m,c,j,05}/0,8 = 24/0,8 = 30 \text{ N/mm}^2$

aufweisen.

## 4.4 Vergleich der Festigkeiten der Bauteile mit Keilzinkungen mit den Keilzinken-Zugfestigkeiten

Verhältnissfaktoren für den Vergleich von 2B.B mit 3K.Z



### Bewertung der Ergebnisse für den Vergleich von 2B.B mit 3K.Z

Anders als bei Keilzinkenbiegefestigkeiten fallen bei den Keilzinkenzugfestigkeiten die Verhältniswerte für die liegenden Keilzinkungen geringer aus. Da die Keilzinkenzugfestigkeiten jedoch insgesamt geringer ausfallen als die Bauteilbiegefestigkeiten ergeben sich somit, anders als bei den Keilzinkenbiegefestigkeiten Verhältnisfaktoren die größer eins sind. Soll eine bestimmte Bauteilbiegefestigkeit erreicht werden, ist dies wiederum mit den stehenden Keilzinkungen einfacher zu erzielen (siehe Erläuterung im Abschnitt 4.3).

Für eine geforderte Bauteilbiegefestigkeit von  $f_{m,j,0.05} = 24 \text{ N/mm}^2$  sind mit den obigen Verhältnisfaktoren folgende charakteristische Keilzinkenzugfestigkeiten erforderlich:

$$\text{Liegende Keilzinkung: } f_{m,j,0.05} = f_{m,c,j,0.05} / 1,2 = 24 / 1,2 = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Stehend Keilzinkung: } f_{m,j,0.05} = f_{m,c,j,0.05} / 1,3 = 24 / 1,3 = 18,5 \text{ N/mm}^2$$

## 5 Mechanisches Modell zur Berechnung der Spannungen von Brettsperrholzträgern

In der Arbeit von KNEIDL [39] wird ein Modell vorgestellt, mit dem es möglich ist, schichtartige Balkensysteme sowohl linear als auch nichtlinear zu berechnen. Hierzu wird das System in mehrere Lage unterteilt, die mittels elastischen Kopplungen miteinander verbunden sind. In diesem Modell sind die einzelnen Lagen in Brett längsrichtung und in Dickenrichtung elastisch miteinander gekoppelt. Die Steifigkeiten der beiden Kopplungen ergeben sich dabei aus den Dicken zwei miteinander verbundener Lagen und den jeweils zugehörigen Elastizitätsmoduln senkrecht zur Faserrichtung bzw. der jeweiligen Schubmoduln.

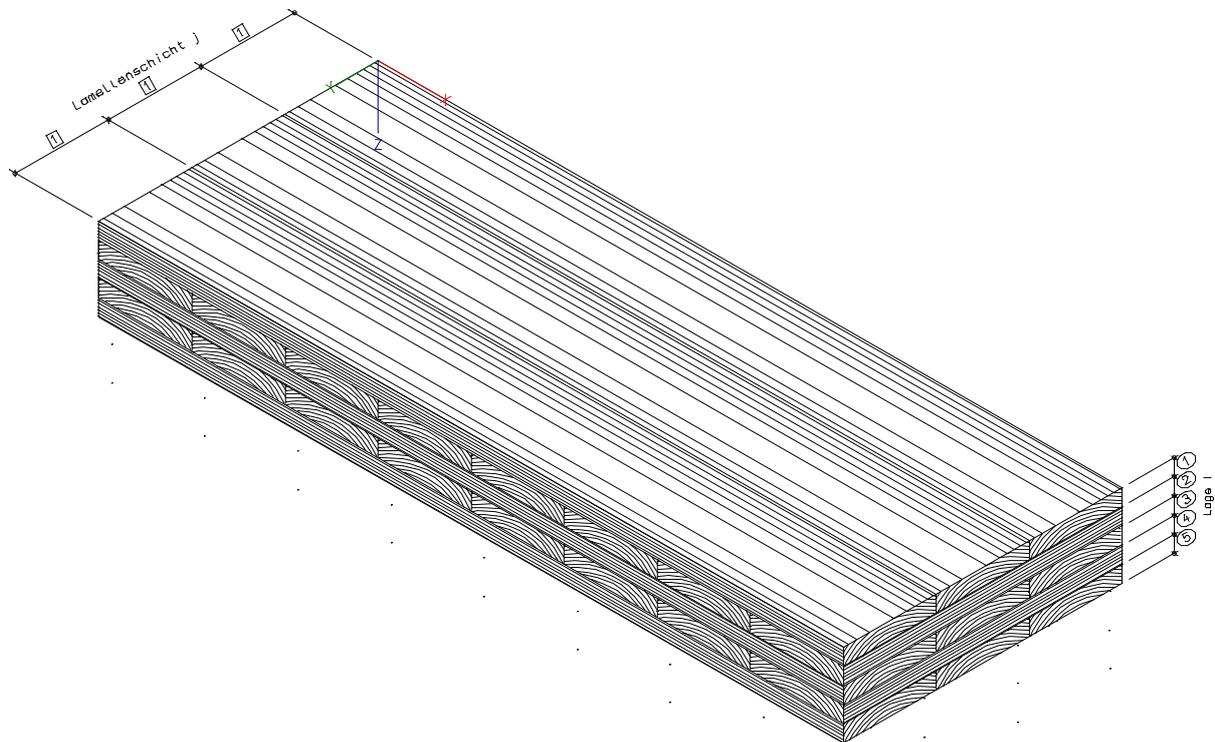
Auf der Grundlage dieser Arbeit wird zunächst ein ähnliches, jedoch an die Besonderheiten von BSP-Bauteilen angepasstes mechanisches Modell beschrieben. Für dieses modifizierte Modell wird anschließend die Steifigkeitsmatrix hergeleitet, da für die Simulationsrechnungen aus Abschnitt 9 das verallgemeinerte Weggrößenverfahren benutzt wird. Abschließend wird die numerische Näherungslösung mit der analytischen Lösung nach dem Schubanalogieverfahren verglichen.

Als Literatur für die in diesem Abschnitt benötigten mathematischen Methoden wird auf [6], [7] und [44] hingewiesen.

Die Berechnungen der folgenden Abschnitte wurden mit dem Mathematikprogramm „Maple“ durchgeführt. Die Ausdrücke der entsprechenden Dateien sind dem Anhang A beigelegt.

## 5.1 Statisches System

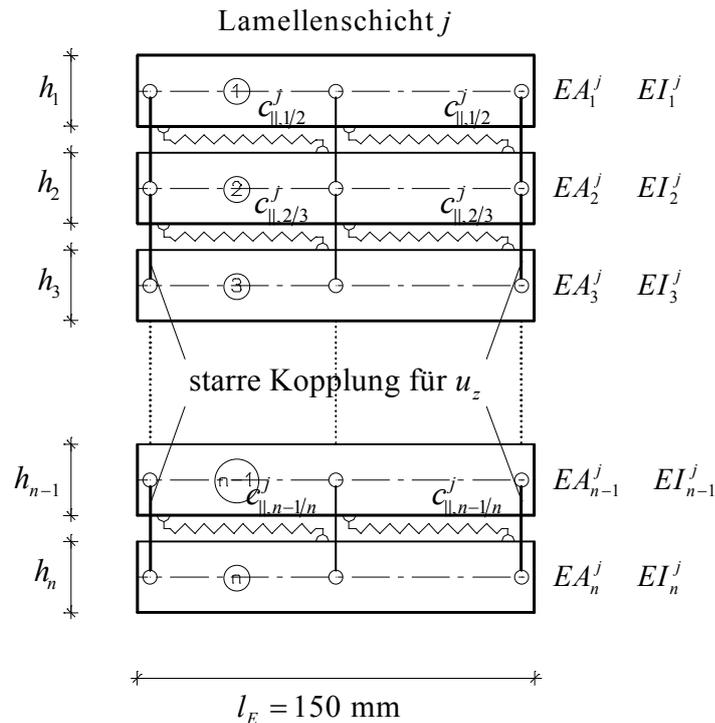
BSP-Bauteile bestehen aus mehreren übereinander und nebeneinander verklebten Brettern, deren Faserverläufe, je nach Plattenaufbau, parallel oder senkrecht zur Spannrichtung verlaufen können. Der Aufbau eines BSP-Trägers ist in Bild 5-1 dargestellt. Die einzelnen übereinander liegenden Bretter werden als Lagen bezeichnet. Die Nummerierung der Lagen erfolgt von oben nach unten mit dem Index  $i$ . Zwischen den einzelnen Lagen liegen die Verbundfugen, die ebenfalls von oben nach unten nummeriert sind, wobei als Index die Nummern der oberen und unteren Lage verwendet werden. Diese einzelnen Lagen werden wiederum zu Paketen zusammengefasst, den so genannten Lamellenschichten, die quer zur Spannrichtung bzw. dem Faserverlauf der äußersten Decklage verlaufen. Danach ergibt sich je nach Anzahl der Lamellenschichten die Breite des Brettsperrholzträgers. Die Nummerierung der Lamellenschichten erfolgt in negativer Y-Richtung mit dem Index  $j$ .



**Bild 5-1** Aufbau eines Brettsperrholzträgers mit der zugehörigen Nummerierung/Indizierung der einzelnen Lagen und Lamellenschichten.

Durch die Verklebung und dem damit verbundenen Zusammenwirken der Bretter ergibt sich auch bei einer äußerlich statisch bestimmten Lagerung ein innerlich hochgrad statisch unbestimmtes System. Für das Tragverhalten des einzelnen Bretts im Querschnitt, kann aufgrund der geringen Brettstärke im Verhältnis zur Brettlänge, ein Balkentragverhalten zugrunde gelegt werden. Angenommen wird außerdem, dass für das einzelne Brett die Bernoulli-Hypothese gilt und damit auch keine Verformungen infolge Schub. Ferner wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Lagen dehnsteif in Dickenrichtung sind und gleiche Biegelinien haben. Die Erläuterungen, warum im Rahmen dieser Arbeit, abweichend von dem in KNEIDL [39] beschriebenen Modell, von affinen Biegelinien ausgegangen wird, sind in Abschnitt 5.6 angegeben. Die Schubverformungen, die der Gesamtquerschnitt erfährt, werden mittels elastischen Kopplungen in Spannrichtung des Trägers berücksichtigt.

Bild 5-2 zeigt die elastische Kopplung der benachbarten Lagen für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete mechanische Modell, wobei die dargestellten Federn keine Einzelfedern sind, sondern als kontinuierliche Bettungsfedern zu verstehen sind.



**Bild 5-2** Elastische Kopplung der Lagen in Längsrichtung

Die in Bild 5-2 angegebenen Federsteifigkeit  $c_{||}$  ergibt sich nach dem in KNEIDL [39] beschriebenen Modell durch eine Reihenschaltung der einzelnen Federsteifigkeiten der benachbarten Lagen. Die Verbundfedersteifigkeit in Längsrichtung  $c_{||}$  ergibt sich damit wie folgt:

$$c_{||,i/i+1}^j = \frac{2 \cdot b^j \cdot G_i^j \cdot G_{i+1}^j}{h_i \cdot G_{i+1}^j + h_{i+1} \cdot G_i^j} \quad \text{Glg. 5-1}$$

Hierin bedeuten:

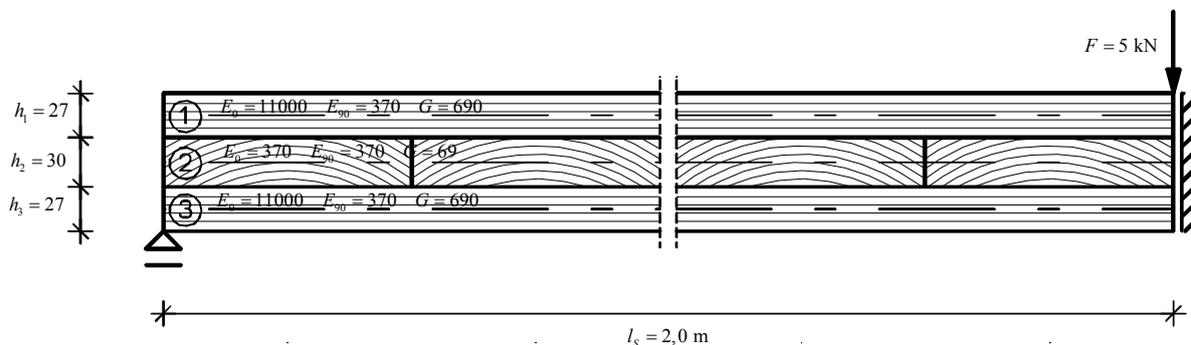
- $c_{||,i/i+1}^j$  = Verbundfugensteifigkeit in Richtung der Verbundfuge für die Verbundfuge  $i/i+1$  in der Lamellenschicht  $j$
- $b^j$  = Breite der Lamellenschicht  $j$
- $G_{i,\perp}^j$  = Schubmodul bzw. Rollschubmodul der Lage  $i$  in der Lamellenschicht  $j$
- $G_{i+1,\perp}^j$  = Schubmodul bzw. Rollschubmodul der Lage  $i+1$  in der Lamellenschicht  $j$
- $h_i$  = Dicke der Lage  $i$
- $h_{i+1}$  = Dicke der Lage  $i+1$

Da die Dicken der einzelnen Lagen  $i$  in jeder Lamellenschicht  $j$  identisch sind, wird bei der Bezeichnung der Lagendicke  $h_i$  auf den Index  $j$  für die Lamellenschicht verzichtet.

Wie bereits weiter oben erwähnt bestehen BSP-Träger i. d. R. aus mehreren nebeneinander liegenden Brettern, die mittels hierzu Querverlaufenden Brettern, den so genannten Querlagen, miteinander verbunden sind (siehe Bild 5-1). Durch diese Querlagen sind auch die einzelnen Lamellenschichten miteinander gekoppelt. Die Kopplung erfolgt in dem hier vorgestellten Modell ausschließlich über die Querbiegesteifigkeit der Querverlaufenden Brettlagen.

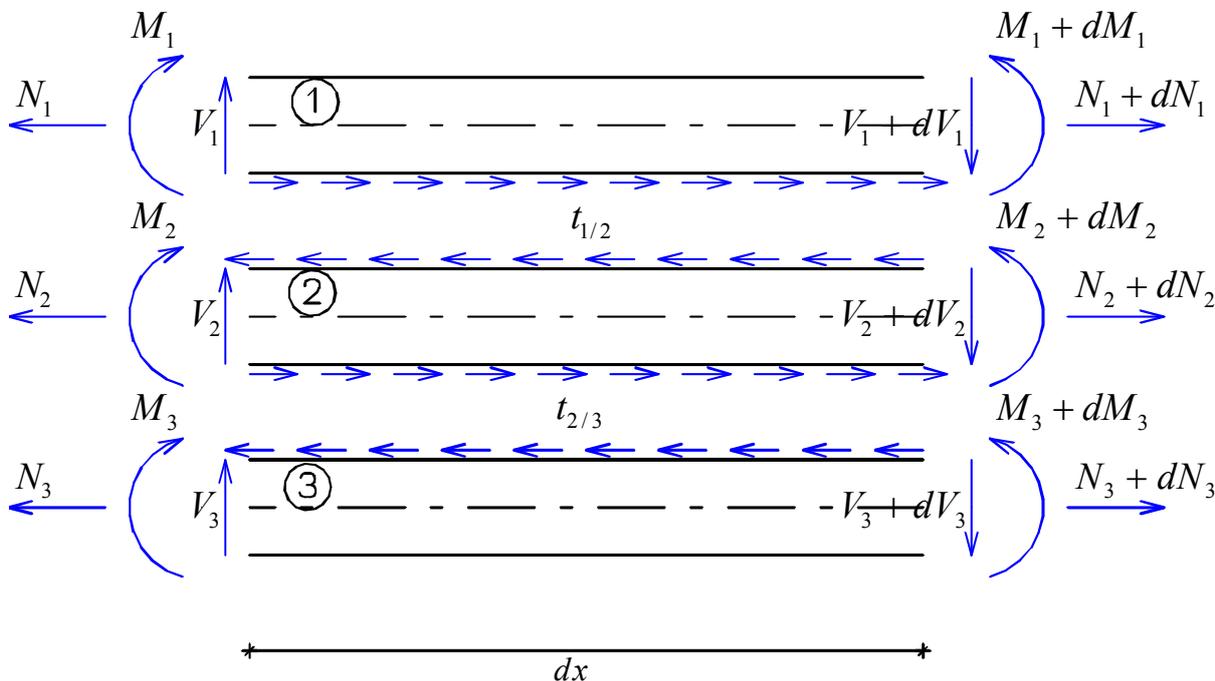
## 5.2 Herleitung der Differentialgleichung für einen 3-teiligen Querschnitt

Anhand des in Bild 5-3 dargestellten 3-teiligen Querschnitt werden beispielhaft die Differentialgleichungen hergeleitet. Für die Lösung eines solchen Systems von linearen homogenen Differentialgleichungen sei auf die entsprechende Literatur verwiesen. Deren Lösung ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.



**Bild 5-3** Statisches System und Aufbau des 3-teiligen Querschnitts (Trägerbreite B=150 mm)

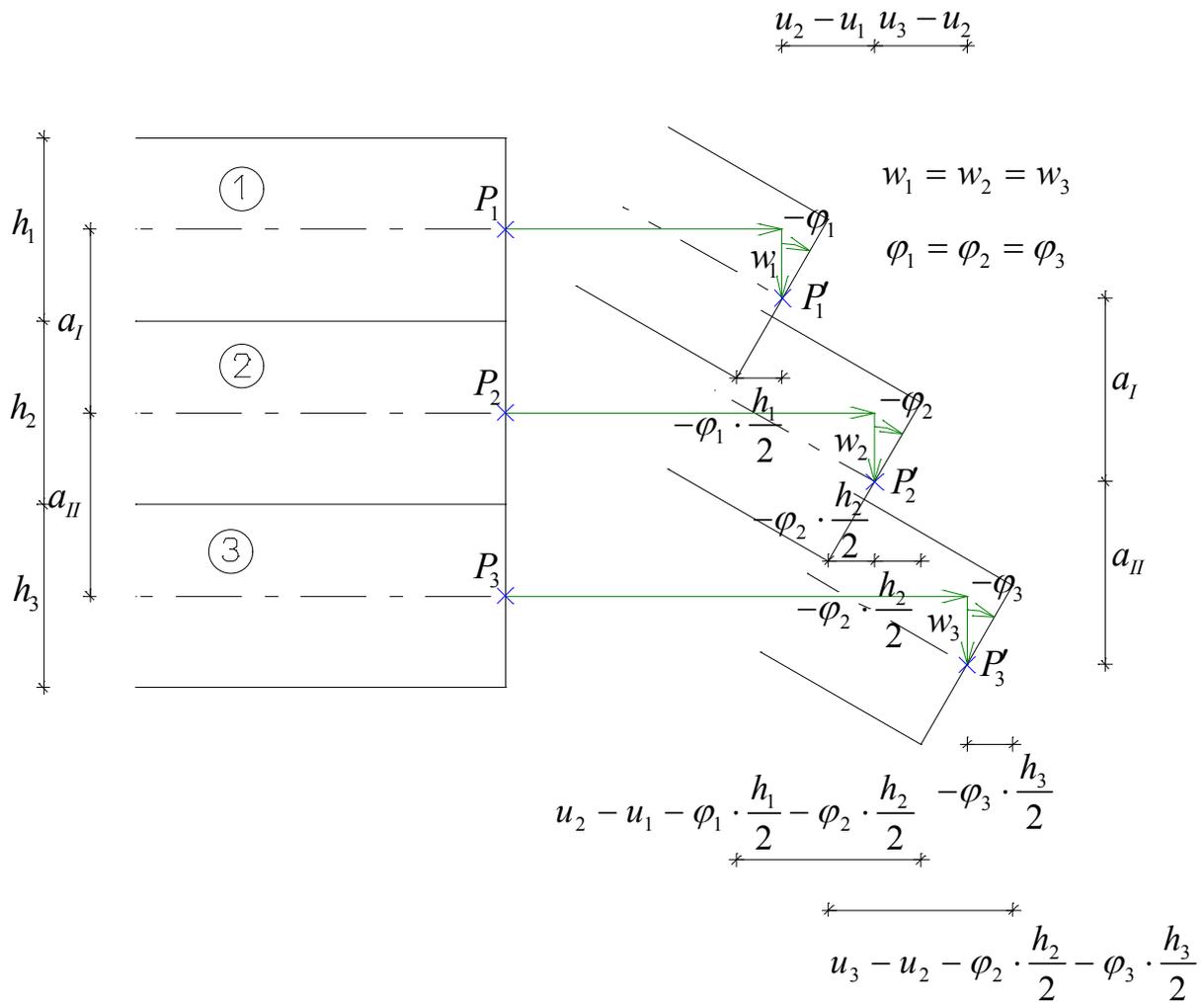
Der in Bild 5-3 dargestellten äußeren Belastung wirken die in Bild 5-4 veranschaulichten inneren Kräfte entgegen



**Bild 5-4** Inneren Kräfte für den 3-teiligen Querschnitt

Aufgrund der elastischen Kopplungen der einzelnen Lagen können sich diese unabhängig von einander verformen. Diese Verformungsdifferenzen erzeugen dann in der Verbundschicht  $i/i+1$  die Streckenbelastung  $t_{i/i+1}$ , die sich mit Hilfe der geometrischen Beziehungen aus Bild 5-5 wie folgt ergibt:

$$t_{i/i+1} = c_{\parallel,i/i+1} \cdot \left( u_{i+1} - u_i + \varphi \cdot \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) \tag{Glg. 5-2}$$



**Bild 5-5 Geometrische Beziehungen für die verformten Lagen  $i$  und  $i+1$  unter der Annahme affiner Biegelinien**

Da sich die einzelnen Stäbe im Gleichgewicht befinden müssen, ergeben sich mit Hilfe der drei Gleichgewichtsbedingungen

$$\sum H = 0 \quad \sum V = 0 \quad \sum M = 0 \quad \text{Glg. 5-3}$$

und dem Bild 5-4 folgende neun lineare Differentialgleichungen 1. Ordnung für die einzelnen Stäbe:

$$\begin{aligned}
 N_1' &= -t_{1/2} & N_2' &= t_{1/2} - t_{2/3} & N_3' &= t_{2/3} \\
 Q_1' &= 0 & Q_2' &= 0 & Q_3' &= 0 \\
 M_1' &= Q_1 - t_{1/2} \cdot \frac{h_1}{2} & M_2' &= Q_2 - (t_{1/2} + t_{2/3}) \cdot \frac{h_2}{2} & M_3' &= Q_3 - t_{2/3} \cdot \frac{h_3}{2}
 \end{aligned} \quad \text{Glg. 5-4}$$

Mit den drei bekannten linearen Differentialgleichungen 1. Ordnung für den schubstarrten Biegebalken (siehe z. B. GROSS et al. [34])

$$u' = \frac{N}{EA} \quad w' = \varphi \quad \varphi' = -\frac{M}{EI} \quad \text{Glg. 5-5}$$

ergeben sich, unter Berücksichtigung der affinen Biegelinien<sup>1</sup>, damit für den 3-teiligen Querschnitt folgende fünf weitere lineare Differentialgleichungen 1. Ordnung:

$$u_1' = \frac{N_1}{EA_1} \quad u_2' = \frac{N_2}{EA_2} \quad u_3' = \frac{N_3}{EA_3}$$

$$w' = \varphi \mid w_1' = w_2' = w_3' = w' = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

**Glg. 5-6**

$$\varphi' = -\frac{M_1}{EI_1} = -\frac{M_2}{EI_2} = -\frac{M_3}{EI_3}$$

Damit sind nun alle 14 linearen Differentialgleichungen 1. Ordnung, in Abhängigkeit der drei Verformungsgrößen  $u_i$ ,  $w$ ,  $\varphi$  sowie den drei Schnittgrößen  $N_i$ ,  $Q_i$ ,  $M_i$  für die einzelnen Stäbe aufgestellt. Zusammen ergeben die Gleichungen Glg. 5-4 und Glg. 5-6 folgendes homogene System an linearen Differentialgleichungen 1. Ordnung:

$$u_1' = N_1/EA_1$$

$$M_1' = Q_1 - t_{1/2} \cdot h_1/2$$

$$Q_1' = 0$$

$$N_1' = -t_{1/2}$$

---


$$u_2' = N_2/EA_2$$

$$M_2' = Q_2 - (t_{1/2} + t_{2/3}) \cdot h_2/2$$

$$Q_2' = 0$$

$$N_2' = t_{1/2} - t_{2/3}$$

---


$$u_3' = N_3/EA_3$$

$$M_3' = Q_3 - t_{2/3} \cdot h_3/2$$

$$Q_3' = 0$$

$$N_3' = t_{2/3}$$

---


$$w' = \varphi$$

$$\varphi' = -M_1/EI_1 = -M_2/EI_2 = -M_3/EI_3$$

**Glg. 5-7**

Das homogene System von linearen Differentialgleichungen 1. Ordnungen kann auch in folgender zweckmäßiger Matrixform dargestellt werden:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{A} \cdot \mathbf{y}$$

**Glg. 5-8**

Hierin bedeuten:

$\mathbf{y}'$  = Ableitung des Lösungsvektors

$\mathbf{y}$  = Lösungsvektor

$\mathbf{A}$  = Koeffizientenmatrix

Die komplette Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}$  für den dreiteiligen Querschnitt nach Bild 5-3 ist in Anhang A.1 angegeben.

Der Vektor  $\mathbf{y}'$  besteht aus den vier Untervektoren  $\mathbf{y}_1'$ ,  $\mathbf{y}_2'$ ,  $\mathbf{y}_3'$ ,  $\mathbf{y}_4'$ . analog dazu besteht der Vektor  $\mathbf{y}$  aus den vier Lösungsvektoren  $\mathbf{y}_1$ ,  $\mathbf{y}_2$ ,  $\mathbf{y}_3$ ,  $\mathbf{y}_4$ . Die Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}$  enthält 12 Untermatrizen. In der

---

<sup>1</sup> affine Biegelinie bedeutet:  $w_i(x) = w_{i+1}(x) = w(x)$  und  $w'_i(x) = w'_j(x) = w'(x)$  bzw.  $\varphi_i(x) = \varphi_{i+1}(x) = \varphi(x)$

Glg. 5-9 sind die Untervektoren für die beiden Vektoren  $\mathbf{y}'$  und  $\mathbf{y}$  sowie die Untermatrizen der Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}$  angegeben.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}' &= (\mathbf{y}'_1 \quad \mathbf{y}'_2 \quad \mathbf{y}'_3 \quad \mathbf{y}'_4)^T \\ \mathbf{y} &= (\mathbf{y}_1 \quad \mathbf{y}_2 \quad \mathbf{y}_3 \quad \mathbf{y}_4)^T \end{aligned} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{14} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} & \mathbf{A}_{24} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{32} & \mathbf{A}_{33} & \mathbf{A}_{34} \\ \mathbf{A}_{14} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{44} \end{pmatrix} \quad \text{Glg. 5-9}$$

Die Untervektoren  $\mathbf{y}'_1, \mathbf{y}'_2, \mathbf{y}'_3$  und  $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \mathbf{y}_3$  beinhalten jeweils die Verschiebungsgröße  $u_i$  und die Schnittgrößen  $M_i, Q_i, N_i$  bzw. deren jeweiligen Ableitungen. Der Untervektor  $\mathbf{y}'_4$  und  $\mathbf{y}_4$  beinhalten die beiden Verformungsgrößen  $w$  und  $\varphi$  bzw. deren jeweiligen Ableitung. Aufgrund der affinen Biegelinien für alle Lagen treten diese beiden Verformungsgrößen nicht für jede Lage  $i$  auf, sondern jeweils als eine einzige, für alle Lagen gültige Verformung. Die Elemente der Untervektoren  $\mathbf{y}'_i$  und  $\mathbf{y}_i$  sind in der Glg. 5-10 angegeben.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}'_1{}^T &= [u'_1 \quad M'_1 \quad Q'_1 \quad N'_1] & \mathbf{y}_1{}^T &= [u_1 \quad M_1 \quad Q_1 \quad N_1] \\ \mathbf{y}'_2{}^T &= [u'_2 \quad M'_2 \quad Q'_2 \quad N'_2] & \mathbf{y}_2{}^T &= [u_2 \quad M_2 \quad Q_2 \quad N_2] \\ \mathbf{y}'_3{}^T &= [u'_3 \quad M'_3 \quad Q'_3 \quad N'_3] & \mathbf{y}_3{}^T &= [u_3 \quad M_3 \quad Q_3 \quad N_3] \\ \mathbf{y}'_4{}^T &= [w' \quad \varphi'] & \mathbf{y}_4{}^T &= [w \quad \varphi] \end{aligned} \quad \text{Glg. 5-10}$$

Für die Lösung eines solchen Systems von linearen homogenen Differentialgleichungen wird, wie bereits erwähnt, auf einschlägige Literatur verwiesen.

### 5.3 Analytische Lösung mittels Schubanalogieverfahren

Für die Überprüfung der im Abschnitt 5.4 hergeleiteten Steifigkeitsmatrix für in Längsrichtung elastisch gekoppelte Stäbe mit affinen Biegelinien wird nachfolgend die analytische Lösung für den 3-teiligen Querschnitt aus Bild 5-3 nach dem Schubanalogieverfahren angegeben.

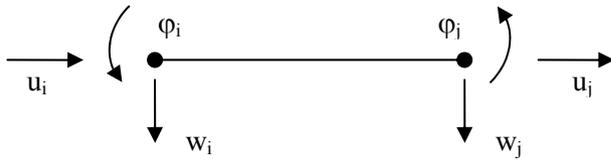
SCHOLZ [49] hat in seiner Arbeit gezeigt, dass die Lösung nach dem Schubanalogieverfahren für einen dreiteiligen Querschnitt mit der exakten Lösung übereinstimmt. Für die Ermittlung bzw. Herleitung des Schubanalogie-Verfahrens wird auf die bereits zuvor erwähnte Arbeit hingewiesen. Für das Beispiel aus Bild 5-3 ergibt sich für die maximale Durchbiegung in Feldmitte ein Wert von  $w_{max} = 253,2$  mm und eine maximale Normalkraft in den Längslagen von  $N_{max} = \pm 177,9$  kN.

Im Abschnitt 5.5 wird diese Lösung mit den Ergebnisse, die sich mit der im nachfolgenden Abschnitt hergeleiteten Steifigkeitsmatrix ergeben, verglichen.

### 5.4 Herleitung der Steifigkeitsmatrix

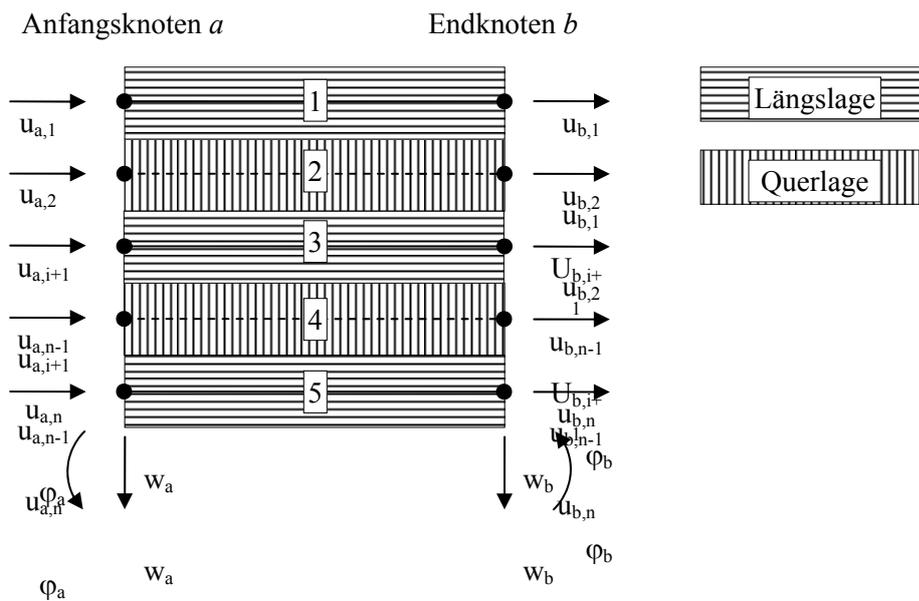
Die nachfolgende Herleitung der Steifigkeitsmatrix für das in den vorherigen Abschnitten beschriebene mechanische Modell, erfolgt mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Arbeit. Die Steifigkeitsmatrix des Brettsperrholzquerschnitts setzt sich dabei aus der Summe der Steifigkeitsmatrizen der Einzelstäbe, der Summe der Steifigkeitsmatrizen der Verbundfugen sowie den Anteilen infolge Querbiegung der Querlagen zusammen. Die Lösung wird dann im Abschnitt 5.5 mit der in Abschnitt 5.3 vorgestellten analytischen Lösung mittels Schubanalogieverfahren verglichen.

Beim klassischen Stabelement ohne Belastung in lokaler  $y$ -Richtung existieren jeweils am Anfang und Ende ein Längsverschiebungsfreiheitsgrad  $u_i, u_j$ , ein Querverschiebungsfreiheitsgrad  $w_i, w_j$  sowie ein Verdrehfreiheitsgrad  $\varphi_i, \varphi_j$ . Es existieren also insgesamt sechs unabhängige Freiheitsgrade. In Bild 5-6 sind die verschiedenen Freiheitsgrade für das klassische Stabelement dargestellt.



**Bild 5-6 Freiheitsgrade am klassischen Stabelement**

Ein Brettsperrholzquerschnitt besteht aus  $n$  Lagen mit  $k = n-1$  dazwischen liegenden Verbundfugen und  $m$  nebeneinander liegenden Brettern (siehe Bild 5-7). Die einzelnen Längslagen sind durch die Querlagen miteinander verbunden sind. Der Anteil aus dieser Verknüpfung wird zum Schluss separat betrachtet. Nachfolgend werden zunächst nur die Zusammenhänge in einer einzigen Lamellenschicht erläutert. Deshalb wird im Weiteren bei den Freiheitsgraden auf die Indexierung der Lamellenschicht  $j$  verzichtet. Wie bereits in Abschnitt 5.2 erwähnt, wird für sämtliche Betrachtung von affinen Biegelinien der Teilquerschnitte ausgegangen. Dadurch ergeben sich gleiche Durchbiegungen und Verdrehungen für die Anfangsknoten bzw. Endknoten einer jeden einzelnen Lage.



**Bild 5-7 Freiheitsgrade an einem beliebigen Brettsperrholzelement**

Für ein Element mit  $n$  Lagen, wie es in Bild 5-7 dargestellt ist, ergeben sich damit  $(n+2) \cdot 2$  Freiheitsgrade. Jedes Element hat in dem Querschnitt, wie beim klassischen Stabelement sechs Freiheitsgrade, wobei die Durchbiegung  $w$  und die Verdrehung  $\varphi$  für übereinander liegende Knoten jeweils identisch sind. Jede Verbundfuge hat somit insgesamt 8 Freiheitsgrade, welche den Freiheitsgraden der beiden Einzelquerschnitte entsprechen, die durch die Verbundfuge miteinander verbunden sind.

Für die Herleitung der Steifigkeitsmatrix gibt es verschiedene Möglichkeiten. Nachfolgend wird die Steifigkeitsmatrix mit dem Prinzip der virtuellen Arbeiten hergeleitet, da es relativ einfach und anschaulich ist. Dabei muss die Summe der virtuellen äußeren Arbeit  $\delta A_a$  gleich der Summe der virtuellen inneren Arbeit  $\delta A_i$  sein.

$$\delta A_a = \delta A_i \tag{Glg. 5-11}$$

Die virtuelle äußere Arbeit ergibt sich durch die äußeren Kräfte, die auf den Freiheitsgraden mit den zugehörigen virtuellen Verschiebungen Arbeit verrichten. Sie setzt sich aus der Summe der virtuellen äußeren Arbeit aus den einzelnen Teilquerschnitten zusammen.

$$\delta A_a = \sum_{i=1}^n (\delta A_{a,i}) \tag{Glg. 5-12}$$

Hierin bedeuten:

$$\sum_{i=1}^n = \text{Summe über alle Lagen}$$

$$\delta A_{a,i} = \text{Virtuelle äußere Arbeit für die Lage } i$$

Nach WUNDERLICH/KIENER [53] ergibt sich für die virtuelle äußere Arbeit des Einzelstabes:

$$\delta A_{a,i} = \mathbf{S}_i \cdot \delta \mathbf{v}_i^T \quad \text{Glg. 5-13}$$

Hierin bedeuten:

$$\mathbf{S}_i = \text{Vektor mit den äußeren Kräften an den Freiheitsgraden}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{a,i} & M_{a,i} & Q_{b,i} & M_{b,i} & N_{a,i} & N_{b,i} \end{bmatrix}^T$$

$$\delta \mathbf{v}_i = \text{Vektor mit den zu den Freiheitsgraden zugehörigen virtuellen Verschiebungen}$$

$$\begin{bmatrix} \delta w_a & \delta \varphi_a & \delta w_b & \delta \varphi_b & \delta u_{a,i} & \delta u_{b,i} \end{bmatrix}^T$$

Im System wird durch die virtuelle äußere Arbeit ebenfalls virtuelle innere Arbeit  $\delta A_i$  verrichtet. Diese setzt sich aus dem Anteil der inneren Arbeit der Einzelstäbe  $\delta A_{i,S}$  und der inneren Arbeit der einzelnen Verbundfugen  $\delta A_{i,V}$  zusammen.

$$\delta A_i = \delta A_{i,S} + \delta A_{i,V}$$

$$\delta A_i = \sum_{i=1}^n \delta A_{i,S,i} + \sum_{i=1}^{n-1} (\delta A_{i,V,i/i+1}) \quad \text{Glg. 5-14}$$

Durch den Elastischenverbund in Längsrichtung mit der Fugensteifigkeit  $c_{\parallel}$  wird die Schubverformung berücksichtigt. Für die Teilquerschnitte wird die Bernoulli-Hypothese vom eben bleiben der Querschnitte angenommen. Für den Einzelstab ergibt sich für die virtuelle innere Arbeit nach WUNDERLICH/KIENER [53]:

$$\delta A_{i,S,i} = \frac{1}{2} \cdot \int_{x=0}^l \left( \underbrace{EA_i \cdot \mathbf{u}'_i(x) \cdot \delta \mathbf{u}'_i(x)}_{\text{Normalkraft}} + \underbrace{EI_i \cdot \mathbf{w}''(x) \cdot \delta \mathbf{w}''(x)}_{\text{Biegung}} \right) dx \quad \text{Glg. 5-15}$$

Hierin bedeuten:

$$\delta A_{i,S,i} = \text{Virtuelle innere Arbeit des Einzelstabs für die Lage } i$$

$$EA_i = \text{Dehnsteifigkeit des Einzelstabs der Lage } i$$

$$EI_i = \text{Biegesteifigkeit des Einzelstabs der Lage } i$$

$$\mathbf{u}'_i, \delta \mathbf{u}'_i = \text{Erste Ableitung des Verschiebungsfeldsvektors für die tatsächlichen/virtuellen Längsverschiebungen (siehe Glg. 5-17)}$$

$$\mathbf{w}''_i, \delta \mathbf{w}''_i = \text{Zweite Ableitung des Verschiebungsfeldsvektors für die tatsächlichen/virtuellen Querverschiebungen (siehe Glg. 5-18)}$$

Für die virtuelle innere Arbeit der einzelnen Verbundfuge in Längsrichtung ergibt sich:

$$\delta A_{i,V,i/i+1} = \frac{1}{2} \cdot \int_{x=0}^l c_{\parallel,i/i+1} \cdot \Delta \mathbf{u}_{i/i+1}(x) \cdot \delta \Delta \mathbf{u}_{i/i+1}(x) dx \quad \text{Glg. 5-16}$$

Hierin bedeuten:

$\delta A_{i,V,i/i+1}$  = Virtuelle innere Arbeit der einzelnen Verbundfuge in Längsrichtung für die Verbundfuge  $i/i+1$

$c_{\parallel,i/i+1}$  = Verbundfugensteifigkeit in Längsrichtung der Verbundfuge für die Verbundfuge  $i/i+1$  (siehe Glg. 5-1)

$\Delta \mathbf{u}_{i/i+1}, \delta \Delta \mathbf{u}_{i/i+1}$  = Differenz der tatsächlichen/virtuellen Längsverschiebung zwischen der Fuge  $i$  und der Fuge  $i+1$  (siehe Glg. 5-19)

Für die Verschiebungsfeldvektoren für die Längs- und Querverschiebungen der Glg. 5-15 gilt:

$$\begin{array}{l} \mathbf{u}_i(x) = \boldsymbol{\Psi}_u^T(x) \cdot \mathbf{v}_i \\ \delta \mathbf{u}_i(x) = \boldsymbol{\Psi}_u^T(x) \cdot \delta \mathbf{v}_i \end{array} \quad \text{Glg. 5-17} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \mathbf{w}_i(x) = \boldsymbol{\Psi}_w^T(x) \cdot \mathbf{v}_i \\ \delta \mathbf{w}_i(x) = \boldsymbol{\Psi}_w^T(x) \cdot \delta \mathbf{v}_i \end{array} \quad \text{Glg. 5-18}$$

Hierin bedeuten:

$\mathbf{u}_i, \delta \mathbf{u}_i$  = Verschiebungsfeldvektor für die tatsächlichen/virtuellen Längsverschiebungen

$\boldsymbol{\Psi}_u^T$  = Vektor mit den Verschiebungsverläufen für die Längsverschiebungen

$\mathbf{w}_i, \delta \mathbf{w}_i$  = Verschiebungsfeldvektor für die tatsächlichen/virtuellen Querverschiebungen

$\boldsymbol{\Psi}_w^T$  = Vektor mit den Verschiebungsverläufen für die Querverschiebungen

$\mathbf{v}_i, \delta \mathbf{v}_i$  = Vektor mit den zu den Freiheitsgraden zugehörigen Verschiebungen

$$\left[ w_a \quad \varphi_a \quad w_b \quad \varphi_b \quad u_{a,i} \quad u_{b,i} \right]^T$$

Die Differenzen der Längs- und Querverschiebungen zwischen der Fuge  $i$  und der Fuge  $i+1$  ergeben sich nach Bild 5-5 analog zu Glg. 5-2 wie folgt:

$$\begin{array}{l} \Delta \mathbf{u}_{i/i+1}(x) = \mathbf{u}_{i+1}(x) - \mathbf{u}_i(x) + \mathbf{w}'(x) \cdot \left( \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) \\ \delta \Delta \mathbf{u}_{i/i+1}^j(x) = \delta \mathbf{u}_{i+1}(x) - \delta \mathbf{u}_i(x) + \delta \mathbf{w}'(x) \cdot \left( \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) \end{array} \quad \text{Glg. 5-19}$$

Die verwendeten Bezeichnungen in den beiden obigen Gleichungen wurden weiter oben bereits erwähnt, weshalb hier darauf verzichtet wird.

Die Gleichungen Glg. 5-17 und Glg. 5-18 enthalten die Vektoren mit den Verschiebungsverläufe sowie den analogen virtuellen Verschiebungsverläufe. Ein möglicher Ansatz für die Verschiebungsverläufe wären die, die sich mittels der analytischen Lösungen der Differentialgleichungen ergeben würden. Diese sind für die Finite-Elemente-Methode jedoch viel zu kompliziert und unhandlich. Daher müssen geeignete Verschiebungsansätze gewählt werden. Je genauer der gewählte Verschiebungsverlauf mit dem exakten übereinstimmt, desto mehr stimmt die potentielle Energie des Systems mit dem Minimum überein. Als Verschiebungsansätze werden die bekannten Hermite'schen Interpolationsfunktionen WUNDERLICH/KIENER [53] gewählt, die wie folgt lauten:

$$\boldsymbol{\Psi}_u^T(\xi) = [1 - \xi \quad 0 \quad 0 \quad \xi \quad 0 \quad 0] \quad \text{Glg. 5-20}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_w^T(\xi) = \left[ 0 \quad 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \quad (-\xi + 2\xi^2 - \xi^3)l \quad 0 \quad 3\xi^2 - 2\xi^3 \quad (\xi^2 - \xi^3)l \right] \quad \text{Glg. 5-21}$$

Hierin bedeuten:

$\xi$  = Dimensionslose Stabkoordinate ( $\xi = x/l$ )

$l$  = Elementlänge

Je geringer die Elementlänge  $l$  gewählt wird, desto genauer stimmen die gewählten Verschiebungsverläufe mit den tatsächlichen Verschiebungen überein. Im Abschnitt 5.5 werden die Lösungen für verschiedene Elementlängen mit der analytischen Lösung verglichen.

Da die gesamte innere virtuelle Arbeit die Summe der virtuellen Arbeiten der einzelnen Elemente ist, setzt sich damit auch die Gesamtsteifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  aus der Summe der Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Elemente zusammen.

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_{S,i} + \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{K}_{V,i/i+1} \quad \text{Glg. 5-22}$$

Hierin bedeuten:

- $\mathbf{K}$  = Gesamtsteifigkeitsmatrix
- $\mathbf{K}_{S,i}$  = Steifigkeitsmatrix des einzelnen Stabes für die Lage  $i$
- $\mathbf{K}_{V,i/i+1}$  = Steifigkeitsmatrix der Verbundfuge für die Längsverformung für die Verbundfuge  $i/i+1$

Die Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Elemente enthält man, in dem man zunächst getrennt in den zugehörigen Anteilen der virtuellen inneren und äußeren Arbeit die zugehörigen virtuellen Weggrößen ausklammert.

$$\sum_{i=1}^n \left( \begin{array}{l} (\dots)_i \cdot \delta u_{a,i} + (\dots)_i \cdot \delta w_a + (\dots)_i \cdot \delta \varphi_a + \\ (\dots)_i \cdot \delta u_{b,i} + (\dots)_i \cdot \delta w_b + (\dots)_i \cdot \delta \varphi_b \end{array} \right) \quad \text{Glg. 5-23}$$

Jede (...) -Ausdruck ergibt damit mit der Glg. 5-11 eine Zeile in der zugehörigen Steifigkeitsmatrix.

Für die Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}_{S,i}$  eines Einzelstabes ergibt sich dann:

$$\mathbf{K}_{S,i} = \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} 12 \cdot \frac{EI_i}{l^3} & -6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & -12 \cdot \frac{EI_i}{l^3} & -6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & 0 & 0 \\ -6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & 4 \cdot \frac{EI_i}{l} & 6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & 2 \cdot \frac{EI_i}{l} & 0 & 0 \\ \hline -12 \cdot \frac{EI_i}{l^3} & -6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & 12 \cdot \frac{EI_i}{l^3} & 6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & 0 & 0 \\ -6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & 2 \cdot \frac{EI_i}{l} & 6 \cdot \frac{EI_i}{l^2} & 4 \cdot \frac{EI_i}{l} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA_i}{l} & -\frac{EA_i}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA_i}{l} & \frac{EA_i}{l} \end{array} \right] \quad \text{Glg. 5-24}$$

Mit der Steifigkeitsmatrix der Verbundfuge  $\mathbf{K}_{V,i/i+1}$  wird die elastische Kopplung zwischen dem Einzelstab  $i$  und  $i+1$  berücksichtigt. Die Steifigkeitsmatrix besteht daher jeweils aus den folgenden vier Untermatrizen:

$$\mathbf{K}_{V,i/i+1} = \left[ \begin{array}{cc} \mathbf{K}_{V,i/i+1}^{11} & \mathbf{K}_{V,i/i+1}^{12} \\ \mathbf{K}_{V,i/i+1}^{21} & \mathbf{K}_{V,i/i+1}^{22} \end{array} \right] \quad \text{Glg. 5-25}$$

Die obigen Untermatrizen lauten wie folgt:

$$\mathbf{K}_{V,i/i+1}^{11} = \frac{1}{5} \cdot c_{\parallel} \cdot a \cdot \begin{bmatrix} \frac{6 \cdot a}{l} & -\frac{1}{2} \cdot a & -\frac{6 \cdot a}{l} & -\frac{1}{2} \cdot a \\ -\frac{1}{2} \cdot a & \frac{2}{3} \cdot l \cdot a & \frac{1}{2} \cdot a & -\frac{1}{6} \cdot l \cdot a \\ -\frac{6 \cdot a}{l} & \frac{1}{2} \cdot a & \frac{6 \cdot a}{l} & \frac{1}{2} \cdot a \\ -\frac{1}{2} \cdot a & -\frac{1}{6} \cdot l \cdot a & \frac{1}{2} \cdot a & \frac{2}{3} \cdot l \cdot a \end{bmatrix} \quad \text{Glg. 5-26}$$

$$\mathbf{K}_{V,i/i+1}^{12} = \frac{1}{2} \cdot c_{\parallel} \cdot a \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ \frac{1}{6} \cdot l & -\frac{1}{6} \cdot l & -\frac{1}{6} \cdot l & \frac{1}{6} \cdot l \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{6} \cdot l & \frac{1}{6} \cdot l & \frac{1}{6} \cdot l & -\frac{1}{6} \cdot l \end{bmatrix} \quad \text{Glg. 5-27}$$

$$\mathbf{K}_{V,i/i+1}^{22} = \frac{1}{2} \cdot c_{\parallel} \cdot a \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{6} \cdot l & -1 & -\frac{1}{6} \cdot l \\ 1 & -\frac{1}{6} \cdot l & -1 & \frac{1}{6} \cdot l \\ -1 & -\frac{1}{6} \cdot l & 1 & \frac{1}{6} \cdot l \\ -1 & \frac{1}{6} \cdot l & 1 & -\frac{1}{6} \cdot l \end{bmatrix} \quad \text{Glg. 5-28}$$

$$\mathbf{K}_{V,i/i+1}^{22} = \frac{1}{3} \cdot c_{\parallel} \cdot l \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & -1 & -1/2 \\ 1/2 & 1 & -1/2 & -1 \\ -1 & -1/2 & 1 & 1/2 \\ -1/2 & -1 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Glg. 5-29}$$

Damit sind nun die Elementsteifigkeitsmatrizen gegeben. Mit Hilfe des allgemeinen Weggrößenverfahrens können nun beliebig aufgebaute Brettsperrholzträger berechnet werden.

## 5.5 Vergleich analytische/FE-Lösung

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellte numerische Lösung wird nachfolgend mit der in Abschnitt 5.3 ermittelten analytischen Lösung für den in Bild 5-3 dargestellten Träger verglichen. In der Tabelle 5-1 sind die Normalkräfte und maximalen Durchbiegungen der analytischen Lösung angegeben.

**Tabelle 5-1 Normalkräfte und Durchbiegungen in den Teilquerschnitten der analytischen Lösung**

Teilquerschnitt	1	3
Normalkraft N [kN]	-177,92	177,92
Durchbiegung w [mm]	253,2	253,2

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits erwähnt, dass die FE-Lösung mit den gewählten Verschiebungsansätzen umso genauer mit der analytischen Lösung übereinstimmt, je kleiner die Länge des Elements gewählt wird. Für die Genauigkeit der FE-Lösung sind außerdem noch die

Verbundfugensteifigkeiten von Interesse. Je weicher die Verbundfugensteifigkeiten sind, desto kleiner muss die Elementlänge gewählt werden, damit sich die FE-Lösung immer weiter der analytischen Lösung annähert. Dies kann durch den  $\lambda$ -Wert bzw. die Verbundkennzahl  $\varepsilon_V$  (siehe Glg. 5-30), in die die Elementlänge direkt eingeht, ausgedrückt werden.

$$\varepsilon_V = \lambda \cdot e$$

**Glg. 5-30**

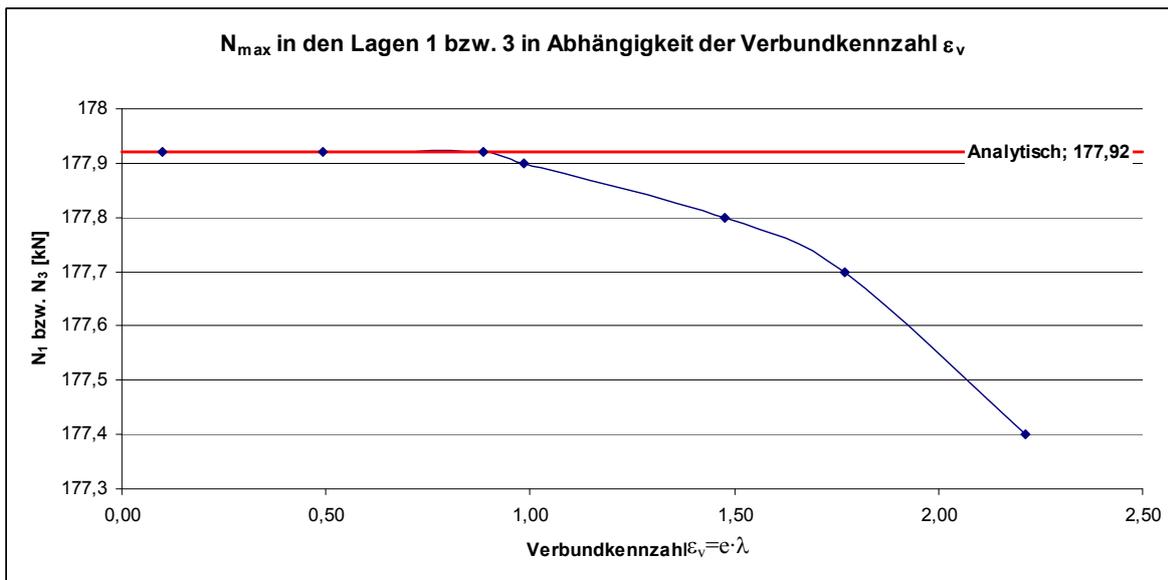
Hierin bedeuten:

$\varepsilon_V$  = Verbundkennzahl

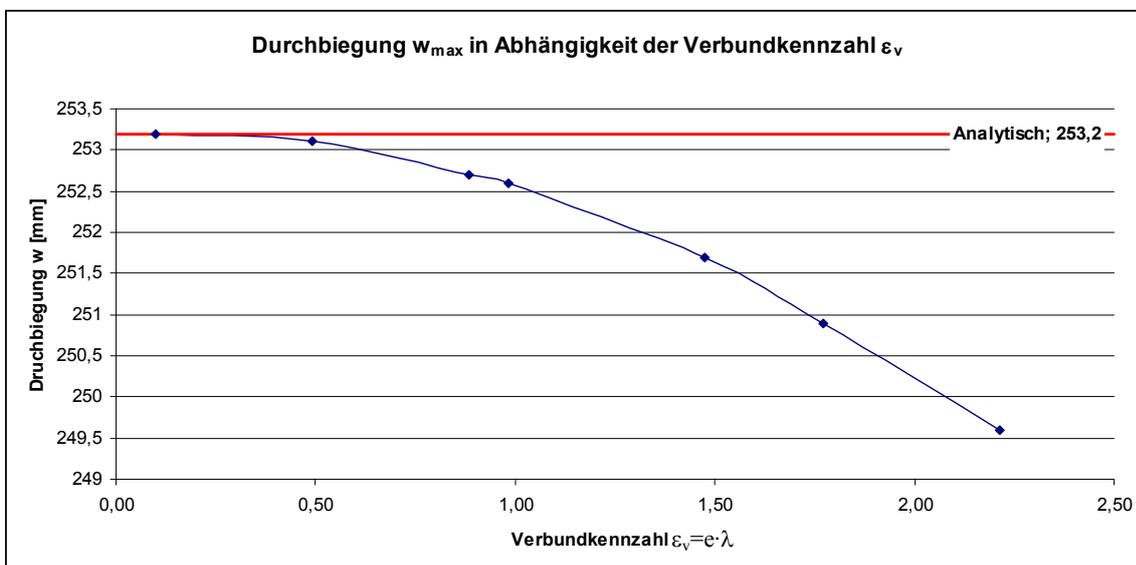
$$\lambda = \sqrt{c_{\parallel} / EA}$$

$e$  = Elementlänge

Für die numerische Lösung wurden nun verschiedene Elementlängen untersucht. In den Bildern Bild 5-8 und Bild 5-9 sind die Normalkräfte und Durchbiegungen der FE-Lösung für verschiedene Elementlängen dargestellt. Dabei zeigt sich, dass mit kleiner werdender Verbundkennzahl  $\varepsilon_V$ , die Ergebnisse der numerischen Lösung asymptotisch zu den analytischen Ergebnissen konvergieren.



**Bild 5-8** Numerische Lösung: maximale Normalkräfte in den Randquerschnitten 1 und 3



**Bild 5-9** Numerische Lösung: maximalen Durchbiegungen

Aus den obigen Bildern lässt deutlich erkennen, dass die numerische Lösung mit der in Abschnitt 5.4 hergeleiteten Steifigkeitsmatrix sehr gute Übereinstimmungen mit der analytischen Lösung liefert.

Für die Simulationsrechnungen wurde eine Elementlänge von 150 mm und ähnliche Verbundfugensteifigkeiten gewählt, deshalb können auch die Ergebnisse der Simulationsrechnungen als genau genug betrachtet werden.

## 5.6 Erläuterungen zum vereinfachten mechanischen Modell

Die nachfolgenden Ausführungen sollen erläutern, warum für die Simulationsrechnungen des Abschnitts 9 mit dem hier vereinfachten Modell durchgeführt wurden und nicht auf das bereits von KNEIDL [39] vorgestellte Modell zurückgegriffen wurde.

Einer der wichtigsten Gründe für die Wahl des vereinfachten Modells mit affinen Biegelinien liegt in der reduzierten Anzahl der Freiheitsgrade. Sowohl in dem vereinfachten Modell als auch dem Modell von KNEIDL [39] stimmen die Anzahl der Knoten in einem Querschnitt überein. Ein 5-lagiger Querschnitt, wie er auch später verwendet wird, besitzt somit in beiden Modellen 5 Knoten. Jeder Knoten liegt dabei jeweils in der Schwerlinie der zugehörigen Lage  $i$ . Der Unterschied besteht jedoch darin, dass bei dem hier gewählten Modell die Biegelinien der einzelnen Lagen als identisch angenommen werden und somit auch deren Ableitung, also die Verdrehungen. Mit dieser Vereinfachung besitzt jeder Knoten in diesem Schnitt die gleiche Durchbiegung  $w$  und Verdrehung  $\varphi$ . Lediglich die Verschiebungen  $u_i$  in Längsrichtung sind für jeden Knoten unterschiedlich. Somit setzt sich die Anzahl der Freiheitsgrade in einem Schnitt für das hier gewählte Modell aus der Anzahl der Lagen  $n_L + 2$  (für  $w$  und  $\varphi$ ) zusammen. Für das Modell mit Berücksichtigung unterschiedlicher Biegelinien der einzelnen Lagen ergibt sich die Anzahl der Freiheitsgrade in einem Schnitt aus der Anzahl der  $n_L \cdot 3$  (für  $u$ ,  $w$  und  $\varphi$ ).

Zur Verdeutlichung werden nachfolgend die Anzahl der Freiheitsgrade für einen Querschnitt bestehend aus 7 Lagen ( $n_L = 7$ ) mit 37 Knoten in Längsrichtung ( $n_K = 37$ ) und 10 nebeneinander liegenden Lamellenschichten ( $n_B = 10$ ) – unter Vernachlässig der festgehaltenen Freiheitsgrade infolge Auflagerungen – für die beiden Modelle angegeben:

$$\text{Vereinfachtes Modell:} \quad n_{FG} = n_K \cdot n_B \cdot \underbrace{(n_L + 2)}_{\text{FG im Schnitt}} = 37 \cdot 10 \cdot (7 + 2) = 3330$$

$$\text{Modell nach KNEIDL [39]:} \quad n_{FG} = n_K \cdot n_B \cdot \underbrace{(n_L \cdot 3)}_{\text{FG im Schnitt}} = 37 \cdot 10 \cdot (7 \cdot 3) = 7770$$

Für das Modell nach KNEIDL [39] mit Berücksichtigung unterschiedlicher Biegelinien würden sich somit mehr als doppelt so viele Freiheitsgrade, wie nach dem hier gewählten Modell ergeben!

Aufgrund der Vielzahl an Simulationen erscheint es daher sinnvoll das vereinfachte Modell für die Berechnungen zu wählen. Im Rahmen der Untersuchungen zum Biegetragverhalten von Brettsperrholzträgern erscheint eine Berücksichtigung unterschiedlicher Biegelinien für die einzelnen Lagen nicht erforderlich, da sich hieraus nur ein sehr geringer Einfluss auf die Ergebnisse gibt, der als vernachlässigbar angesehen werden kann, zumal bei der Simulation der Träger mit einem einheitlichen Elastizitätsmodul senkrecht zur Faser von  $E_{90,mean} = 370 \text{ N/mm}^2$  gerechnet wird.

# 6 Tragverhalten von Brettsperrholzträgern mit Brettabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit

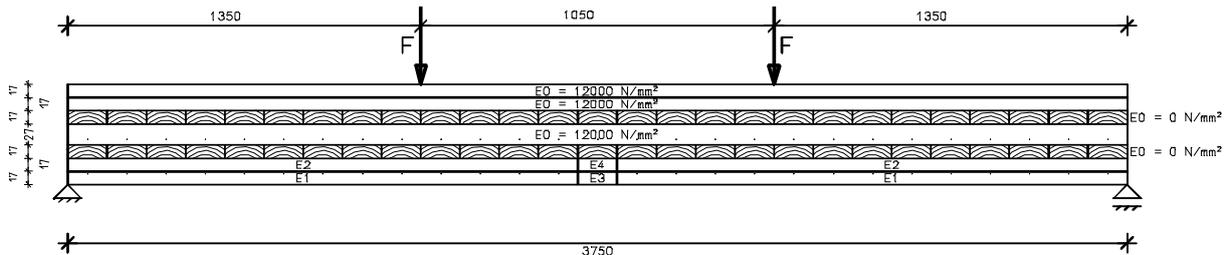
## 6.1 Allgemeines

Mit den nachfolgenden Betrachtungen soll das Tragverhalten von Brettabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit in einem BSP-Träger untersucht werden. COLLING [11] hat dies in seiner Arbeit für einen Brettschichtholzträger untersucht. Diese Ergebnisse sind jedoch aufgrund des Aufbaus von Brettsperrhölzern (deutlich geringere Bauteilhöhen, Querverlaufende Lagen und mehrere nebeneinander liegende Bretter) nicht direkt auf BSP-Träger übertragbar.

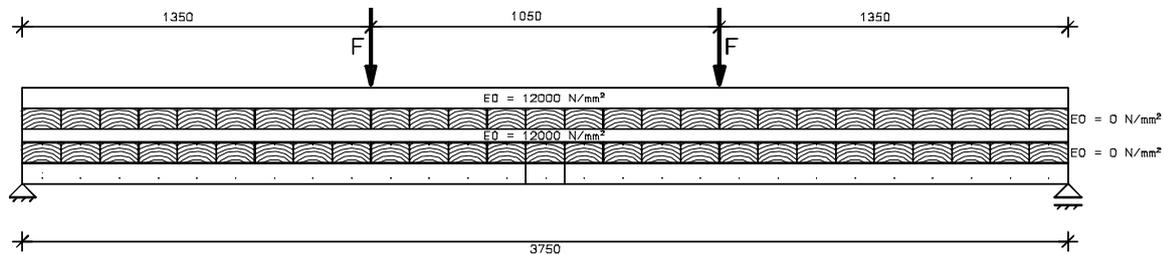
Wie BSH-Träger bestehen auch BSP-Träger aus mehreren verschiedenen Lagen/Brettern mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln. Da innerhalb des Bretts Bereiche mit hoher Steifigkeit (fehlerfreie Brettabschnitte) und Bereiche mit geringer Steifigkeit (z.B. Brettabschnitte mit Ästen) nebeneinander liegen, ist der Elastizitätsmodul innerhalb des Bretts nicht konstant.

Mit Hilfe des in Abschnitt 7 beschriebenen Rechenprogramms wurden die Auswirkungen des Tragverhaltens von Lagen/Brettern und Brettabschnitten mit unterschiedlichen Steifigkeiten auf die benachbarten Lagen bzw. Elemente untersucht. Für die Berechnungen wurden zwei verschiedene Träger mit folgenden Aufbauten verwendet:

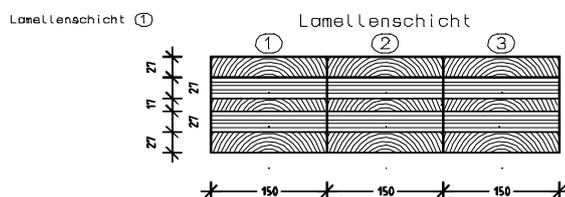
- Träger 1 (QS129) siehe Bild 6-1:  
eine Lamellenschicht (keine nebeneinander liegenden Bretter)  
zwei faserparallele Decklagen
- Träger 2 (QS125-3L) siehe Bild 6-2  
drei Lamellenschichten (drei nebeneinander liegende Bretter)  
eine faserparallele Decklage



**Bild 6-1** Bei den FE-Berechnungen für den Träger 1 (QS129) zugrunde gelegter Träger



Lamellenschicht ①	E1	E3	E1
Lamellenschicht ②	E2	E4	E2
Lamellenschicht ③	E1	E3	E1



**Bild 6-2** Bei den FE-Berechnungen für den Träger 2 (QS125-3L) zugrunde gelegter Träger

Bei den nachfolgenden Berechnungen wurden für den Träger 1 (QS129) die Elastizitätsmodule der Lagen 1 bis 5 für den Träger 2 (QS125-3L) die Elastizitätsmodule der Lagen 1 bis 4 konstant gehalten ( $E_v = 12000 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $E_{90} = 0 \text{ N/mm}^2$ ). Die Elastizitätsmodule  $E_1$  und  $E_2$  der unteren Lage wurden hingegen zwischen  $8000 \text{ N/mm}^2$  und  $16000 \text{ N/mm}^2$  variiert. Für die Berechnungen im Abschnitt 6.3 wurden außerdem die Elastizitätsmodule der Elemente 3 ( $E_3$ ) und 4 ( $E_4$ ) zwischen  $0 \text{ N/mm}^2$  (= ausgefallenes Element) und  $18000 \text{ N/mm}^2$  variiert. Die Elemente 3 und 4 liegen jeweils in Trägermitte. Außerdem wurden alle Spannungen in Elementmitte berechnet, um die Ergebnisse mit den FE-Ergebnissen vergleichen zu können.

## 6.2 Träger mit konstanten Lagen-Elastizitätsmoduln

In diesem Abschnitt wird für die Elastizitätsmodule der Elemente 3 und 4 der zur jeweiligen Lage zugehörige Elastizitätsmodul verwendet, d.h.  $E_3 = E_1$  und  $E_4 = E_1$ . Hierfür werden nachfolgen die Spannungen in den Elementen 3 und 4 untersucht.

Da in diesen Fällen die E-Module der einzelnen Lagen konstant sind, kann die Spannungsverteilung im Querschnitt nach der Verbundtheorie berechnet werden. Unter Berücksichtigung der Elastizitätsmodule der einzelnen Lagen, ergibt sich die Biegesteifigkeit des Querschnitts zu:

$$B_{x,n} = B_{x,E} + B_{x,S} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n E_i^j \cdot I_i^j + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n E_i^j \cdot A_i^j \cdot a_i^{j2} \quad \text{Glg. 6-1}$$

Hierin bedeuten

$B_{x,n}$  = Biegesteifigkeit des Querschnitts unter Berücksichtigung des Lagenaufbaus (netto Biegesteifigkeit) mit den tatsächlich vorhandenen Lage-Elastizitätsmoduln

$B_{x,E}$  = Summe der Eigenbiegesteifigkeiten der einzelnen Lagen

$B_{x,S}$  = Summe der Steiner-Anteile der einzelnen Lagen

$E_i^j$  = Elastizitätsmodule der i-ten Lage in der j-ten Lamellenschicht

$I_i$  = Eigenbiegesteifigkeiten der i-ten Lage in der j-ten Lamellenschicht

$A_i$  = Fläche der i-ten Lage in der j-ten Lamellenschicht

$a_i^{j2}$  = Abstand der i-ten Lage in der j-ten Lamellenschicht vom geometrischen Schwerpunkt (= D/2)

$\sum_{j=1}^k$  = Summe über alle Lamellenschichten

$\sum_{i=1}^n$  = Summe über alle Lagen

Die Spannung in einem beliebigen Punkt im Abstand  $z_{0,i}^j$  vom gewichteten Schwerpunkt  $z_{0,S}$  kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\sigma_{i,eff}^j = \frac{M}{B_{x,n}} \cdot E_i^j \cdot z_{0,i}^j \quad \text{Glg. 6-2}$$

Hierin bedeuten:

$\sigma_{i,eff}^j$  = tatsächlich vorhandene Spannung in einem Punkt mit dem Abstand  $z_{0,i}^j$  vom gewichteten Schwerpunkt  $z_{0,S}$

$M$  = vorhandenes Biegemoment

$B_{x,n}$  = Netto Biegesteifigkeit des Querschnitts mit den tatsächlich vorhandenen Lagen-Elastizitätsmoduln

$E_i^j$  = Elastizitätsmodul der i-ten Lage in der j-ten Lamellenschicht

$z_{0,i}^j$  = Abstand des Punktes vom gewichteten Schwerpunkt  $z_{0,S}$

Ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagen-Elastizitätsmodule ergibt sich die rechnerische Spannung  $\sigma_{i,eff,0}$  in einem Punkt wie folgt:

$$\sigma_{i,eff,0}^j = \frac{1}{\delta_B} \cdot \frac{M}{I} \cdot z_i^j \quad \text{Glg. 6-3}$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_{i,eff,0}^j$  = rechnerische Spannung in einem Punkt ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagen-Elastizitätsmodule mit dem Abstand  $z_i^j$  vom geometrischen Schwerpunkt  $z_S$
- $\delta_B$  = Plattenaufbaufaktor nach Glg. 6-4
- $M$  = vorhandenes Biegemoment
- $I$  = Flächen-Trägheitsmoment des Vollquerschnitts ( $B \cdot D^3/12$ )
- $z_i^j$  = Abstand des Punktes vom geometrischen Schwerpunkt  $z_S$

Die effektive (netto) Biegesteifigkeit von Brettsperrhölzern ist durch ihren geschichteten Aufbau mit den Querlagen deutlich geringer als die Biegesteifigkeit eines Vollquerschnitts mit denselben Querschnittsabmessungen (brutto Biegesteifigkeit). Der so genannte Plattenaufbaufaktor  $\delta_B$  drückt dabei aus, um wie viel die netto Biegesteifigkeit eines Brettsperrholzträgers geringer ist im Vergleich zur brutto Biegesteifigkeit eines Vollquerschnitts mit denselben Querschnittsabmessung. Der Plattenaufbaufaktor  $\delta_B$  berechnet sich dabei wie folgt:

$$\delta_B = \frac{B_{x,n}^V}{B_{x,b}^V} \quad \text{Glg. 6-4}$$

Hierin bedeuten:

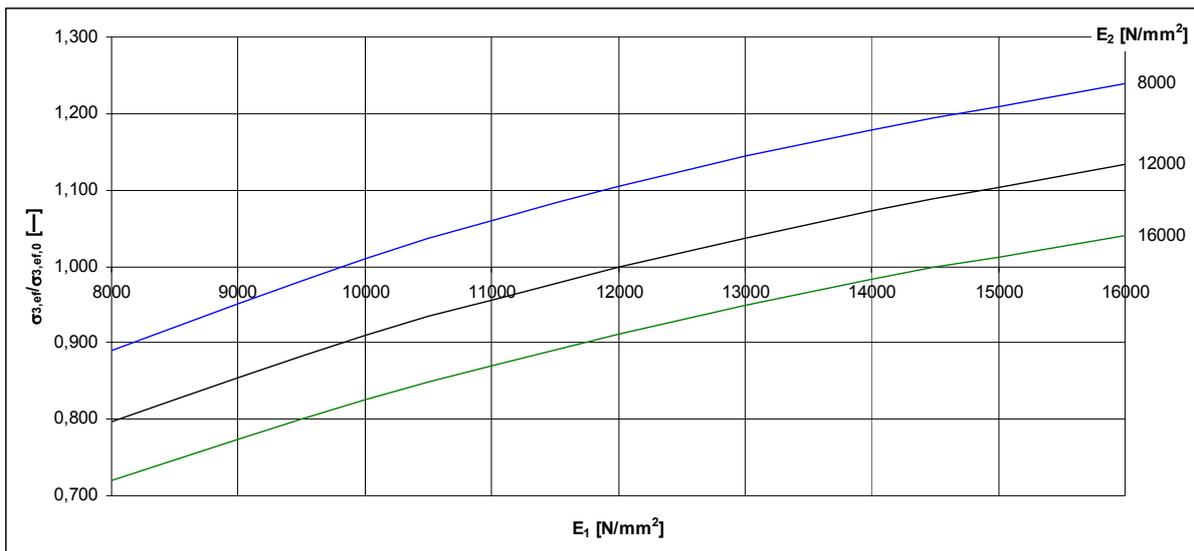
- $\delta_B$  = Plattenaufbaufaktor
- $B_{x,n}^V$  = Biegesteifigkeit des Querschnitts unter Berücksichtigung des Lagenaufbaus (netto Biegesteifigkeit) mit dem Vergleichs-Elastizitätsmodul  $E_V$  für die Längslagen und dem Elastizitätsmodul  $E_{90} = 0$  für die Querlagen
- $B_{x,b}^V$  = Biegesteifigkeit des Vollquerschnitts (brutto Biegesteifigkeit) mit dem Vergleichs-Elastizitätsmodul  $E_V$

Die Verhältnisse zwischen tatsächlich vorhandener Spannung  $\sigma_{i,eff}^j$  (nach Glg. 6-2) und der näherungsweise berechneten Spannung  $\sigma_{i,eff,0}^j$  (nach Glg. 6-3) sind für die Elemente 3 und 4 der drei Träger in Bild 6-3 bis Bild 6-6 dargestellt.

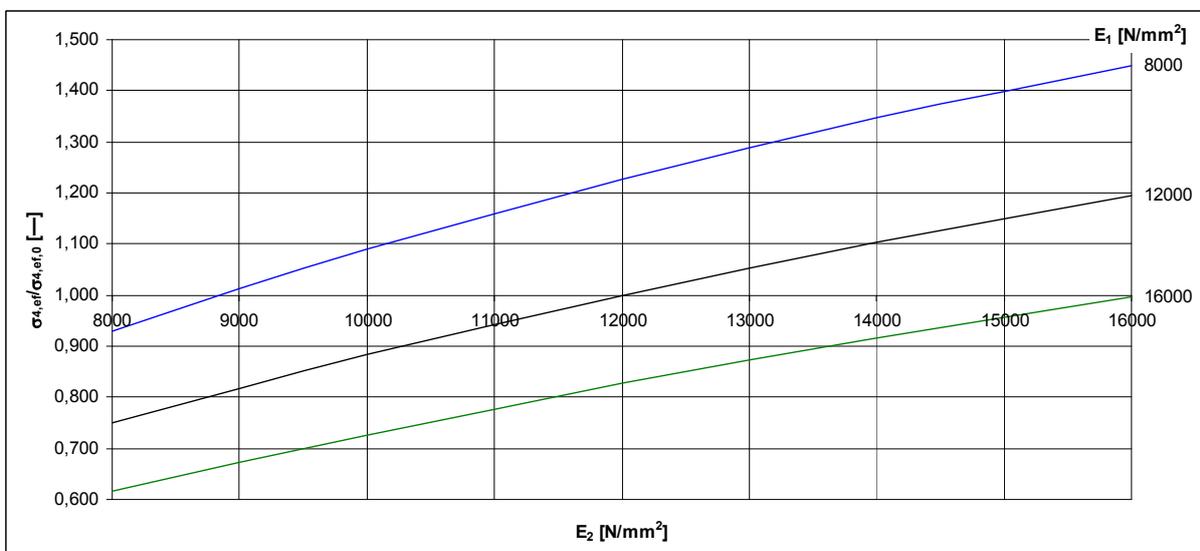
Mit dem Verhältniswert  $\sigma_{i,eff}^j / \sigma_{i,eff,0}^j$  wird ausgedrückt, wie sich in den unteren benachbarten Lagen die Spannungen verändern, wenn für diese Lagen von dem Vergleichs-Elastizitätsmodul für alle Längslagen ( $E_V = 12000 \text{ N/mm}^2$ ) abgewichen wird.

In den nachfolgenden Abschnitten sind die Ergebnisse für die Träger 1 und 2 für die verschiedenen Lage-Elastizitätsmodule angeben.

### 6.2.1 Ergebnisse für den Träger 1 (QS129<sup>1</sup>)



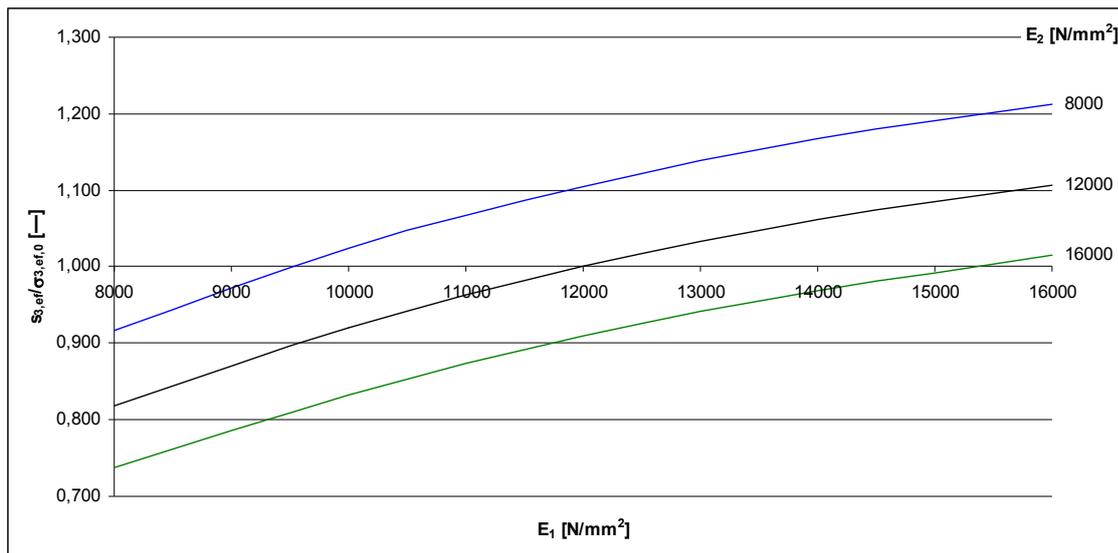
**Bild 6-3** Spannung  $\sigma_{3,eff}$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{3,eff,0}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmoduln  $E_1$  und  $E_2$  für den Träger 1 (QS129)



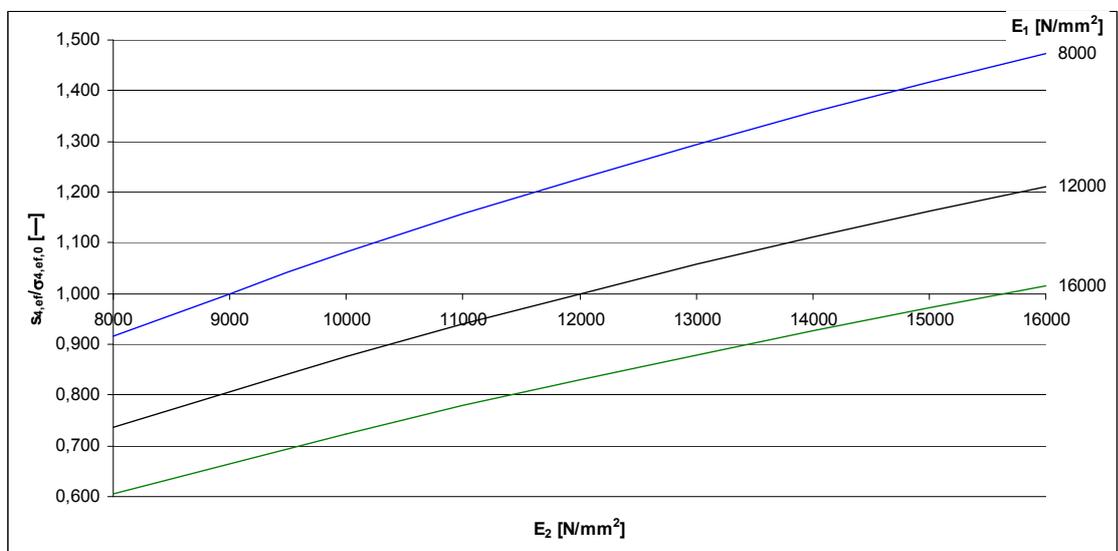
**Bild 6-4** Spannung  $\sigma_{4,eff}$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{4,eff,0}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmoduln  $E_1$  und  $E_2$  für den Träger 1 (QS129)

<sup>1</sup> QS129 = zwei faserparallele Decklagen – eine nebeneinander liegende Lamellenschicht

### 6.2.2 Ergebnisse für den Träger 3 (QS125-3L<sup>1</sup>)



**Bild 6-5** Spannung  $ef\sigma_3$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{3,eff,0}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmoduln  $E_1$  und  $E_2$  für den Träger 2 (QS125-3L)



**Bild 6-6** Spannung  $\sigma_{4,eff}$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{4,eff,0}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmoduln  $E_1$  und  $E_2$  für den Träger 2 (QS125-3L)

### 6.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die obigen Bilder zeigen, dass mit zunehmendem Lagen-Elastizitätsmodul die in dieser Lage auftretende Spannung zunimmt. Die Zunahme der Spannung fällt für die BSP-Träger jedoch deutlich geringer aus als bei dem BSH-Träger nach COLLING [11]. Das heißt der Unterschied zwischen tatsächlich vorhandener Spannung  $\sigma_{i,eff}^i$  (nach Glg. 6-2) und näherungsweise ermittelter Spannung  $\sigma_{i,eff,0}$  (nach Glg. 6-3) fällt für die untersuchten BSP-Träger wesentlich größer aus.

Für den Fall  $E_1 = E_2 = 16000 \text{ N/mm}^2$  beträgt für den BSH-Träger nach COLLING [11] die maximale Zunahme der Spannung für das Element 3 ca. 20%. Bei den BSP-Trägern ist die tatsächlich

<sup>1</sup> QS125-3L = eine faserparallele Decklage – drei nebeneinander liegende Lamellenschichten

vorhandene Spannung jedoch nur um ca. 2% bzw. ca. 4% größer, als die nach Glg. 6-3 berechnete Spannung.

Dies hängt mit dem Plattenaufbaufaktor  $\delta_B$  zusammen, der bei der Berechnung der Spannung  $\sigma_{i,eff,0}^j$  von Brettsperrholzträgern mit eingeht. Da bei einem BSH-Träger netto und brutto Biegesteifigkeit identisch ist ergibt sich ein Plattenaufbaufaktor  $\delta_B$  von 1,0.

Die netto Biegesteifigkeit  $B_{x,n}$  aus Glg. 6-1 kann auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$B_{x,n} = E^* \cdot I \quad \text{Glg. 6-5}$$

Hierin bedeuten:

- $B_{x,n}$  = Biegesteifigkeit des Querschnitts unter Berücksichtigung des Lagenaufbaus (netto Biegesteifigkeit) mit den tatsächlich vorhandenen Lage-Elastizitätsmoduln
- $E^*$  = Elastizitätsmodul des Querschnitts unter Berücksichtigung des Aufbaus
- $I$  = Flächen-Trägheitsmoment des Vollquerschnitts ( $B \cdot D^3/12$ )

Setzt man Glg. 6-5 in Glg. 6-2 ein und berechnet mit Glg. 6-3 das Verhältnis  $\sigma_{i,eff}^j / \sigma_{i,eff,0}^j$  so ergibt sich hierfür folgende Gleichung:

$$\frac{\sigma_{i,eff}^j}{\sigma_{i,eff,0}^j} = \underbrace{\frac{E_i^j}{E^*}}_{k_E} \cdot \underbrace{\frac{z_{0,i}}{z_i}}_{k_z} \cdot \delta_B \quad \text{Glg. 6-6}$$

Die beiden Verhältnisfaktoren  $k_E$  und  $k_z$  sowie der Plattenaufbaufaktor  $\delta_B$  der obigen Gleichung, sind für den BSP-Träger QS129 und den BSH-Träger nach COLLING [11] in der Tabelle 6-1 angegeben.

**Tabelle 6-1** Verhältnisfaktoren  $k_E$  und  $k_z$  für den BSP-Träger QS129 und BSH-Träger Colling

	Verhältnisfaktor $k_E$	Verhältnisfaktor $k_z$	Plattenaufbaufaktor $\delta_B$	$k_E k_z$	$k_E \cdot k_z \cdot \delta_B$
BSP-Träger QS129	1,26	0,91	0,91	1,15	1,04
BSH-Träger Colling	1,23	0,97	1,00	1,19	1,19

Die Tabelle 6-1 zeigt, dass für BSP-Träger der Unterschied zwischen tatsächlich vorhandener Spannung nach Glg. 6-2 und der näherungsweise ermittelten Spannung nach Glg. 6-3 aufgrund des Plattenaufbaufaktor  $\delta_B$  deutlich geringer ausfällt als bei Brettchichtholzträgern.

Je geringer der Elastizitätsmodul der benachbarten Lage ist, desto höher fällt die Spannung in der Lage mit dem höheren Elastizitätsmodul aus. Für den Fall  $E_1 = 16000 \text{ N/mm}^2$  und  $E_2 = 8000 \text{ N/mm}^2$  ergeben sich für das Element 3 nach Glg. 6-2 wesentlich höhere Spannungen als nach Glg. 6-3. Für die Spannung nach Glg. 6-2 in Element 3 ergibt sich eine Erhöhung für Träger 1 (QS129) von ca. 24%, für Träger 2 (QS125-3L) von ca. 21% und für den BSH-Träger nach COLLING [11] von 32%. Die Zunahme der Spannung in der Lage mit dem höheren Elastizitätsmodul liegt für die zwei BSP-Träger ungefähr in der gleichen Größenordnung wie für den BSH-Träger.

Werden in den äußersten Zuglagen Bretter mit denselben Elastizitätsmodulen verwendet, die jedoch von den Elastizitätsmoduln der übrigen Lagen des Querschnitts abweichen, ist es ausreichend die Spannungen nach Glg. 6-3 zu berechnen. Haben die äußersten Zulagen jedoch auch unterschiedliche Elastizitätsmodule, so ist es zwingend erforderlich die Spannungen nach Glg. 6-2 zu ermitteln. Da bei der Produktion von BSH-Trägern i.A. aber visuell sortierte Bretter verwendet werden, ist dies jedoch nicht möglich. Anhand dieser Ergebnisse sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Werden für die äußersten Zuglagen, Bretter mit höheren Elastizitätsmodul als für die restlichen Längslagen verwendet, erhöht sich für diese die Spannung nur unwesentlich.
- Je größer der Unterschied der Elastizitätsmodule zwischen den benachbarten Lagen ist, desto höher sind die Spannungen in der Lage mit dem höheren Elastizitätsmodul (die „schwache“ Lage gibt Spannungen an den „stärkeren“ Nachbarn ab)
- Werden in Brettsperrholzträgern planmäßig für die Längslagen Bretter mit unterschiedlichen Steifigkeiten verwendet, sind die Spannungen nach Glg. 6-2 zu bestimmen

### 6.3 Träger mit nicht konstanten Lagen-Elastizitätsmoduln

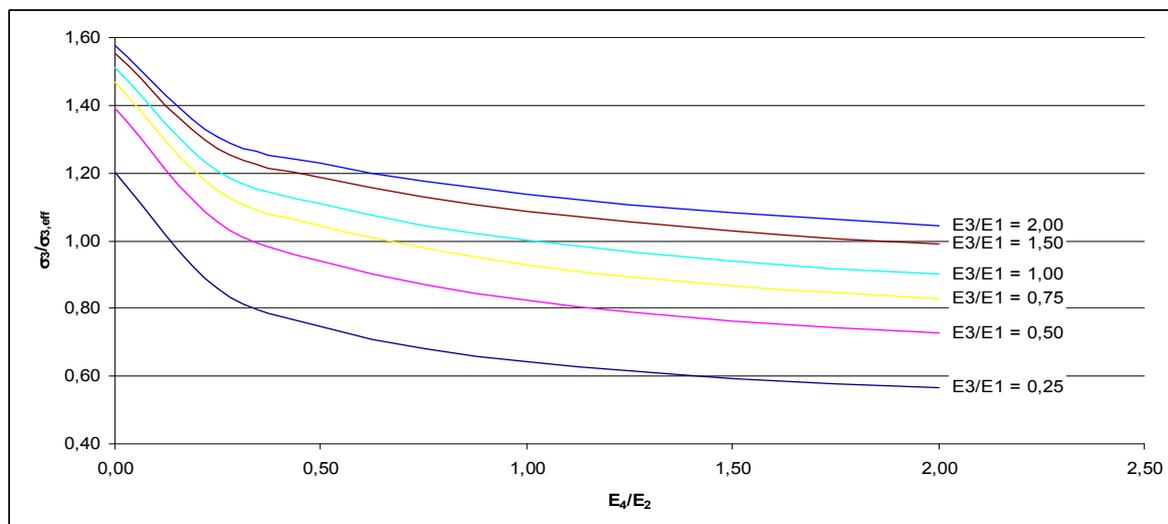
Die Auswirkungen von unterschiedlichen Lagen-Elastizitätsmoduln auf die Spannungen in den Elementen 3 und 4 wurde im vorherigen Abschnitt untersucht. Die Lagen hatten dabei jeweils konstante Elastizitätsmodule, d.h. die Elemente 3 und 4 hatten denselben Elastizitätsmodul wie die zugehörige Lage ( $E_1 = E_3$  und  $E_2 = E_4$ ). Abweichend hiervon wird in diesem Abschnitt der Einfluss auf die Spannungen der Elemente 3 und 4 untersucht, wenn die Elastizitätsmodule der Elemente 3 und 4 von dem Elastizitätsmodul der zugehörigen Lage abweichen ( $E_1 \neq E_3$  und  $E_2 \neq E_4$ ).

Eine einfache Berechnung der Spannungen mit der gängigen Biegelehre sind aufgrund der auftretenden Lastumlagerungen nicht mehr möglich, weshalb die nachfolgenden Berechnungen ausschließlich mit dem in Abschnitt 7 beschriebenen Rechenprogramm durchgeführt wurden. Für die Untersuchungen wurden wiederum die zwei BSP-Träger des vorherigen Abschnitts verwendet.

Für die Untersuchungen wurden in Abhängigkeit von den Verhältnissen  $E_3/E_1$  und  $E_4/E_2$  die Spannungen  $\sigma_3$  und  $\sigma_4$  in der Mitte der Elemente 3 und 4 mit dem Rechenprogramm nach Abschnitt 7 bestimmt und auf die effektiven Spannungen nach Glg. 6-2 bezogen. Die Verhältniswerte der Spannungen  $\sigma_3/\sigma_{3,eff}$  und  $\sigma_4/\sigma_{4,eff}$  geben an, um wie viel sich die Spannungen in den Elementen 3 und 4 verändern, wenn die Elastizitätsmodule dieser Elemente von dem Elastizitätsmodul der zugehörigen Lage abweicht.

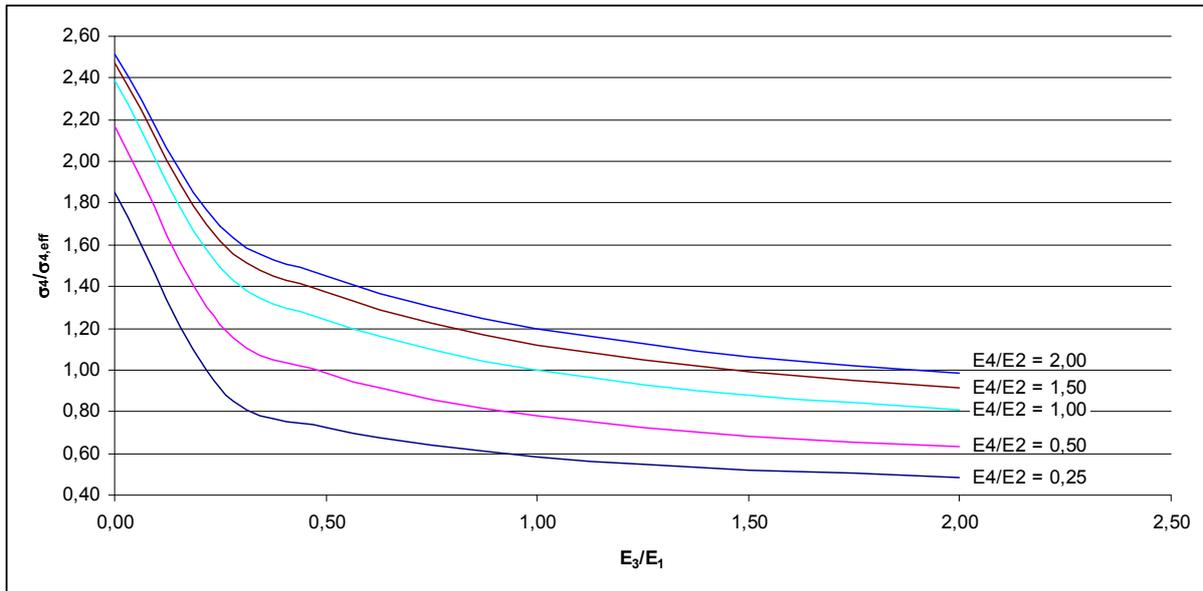
In den nachfolgenden Abschnitten sind die Ergebnisse für die Träger 1 und 2 für die verschiedenen Verhältnisse der Elastizitätsmodule wiedergegeben.

#### 6.3.1 Ergebnisse für den Träger 1 (QS129<sup>1</sup>)



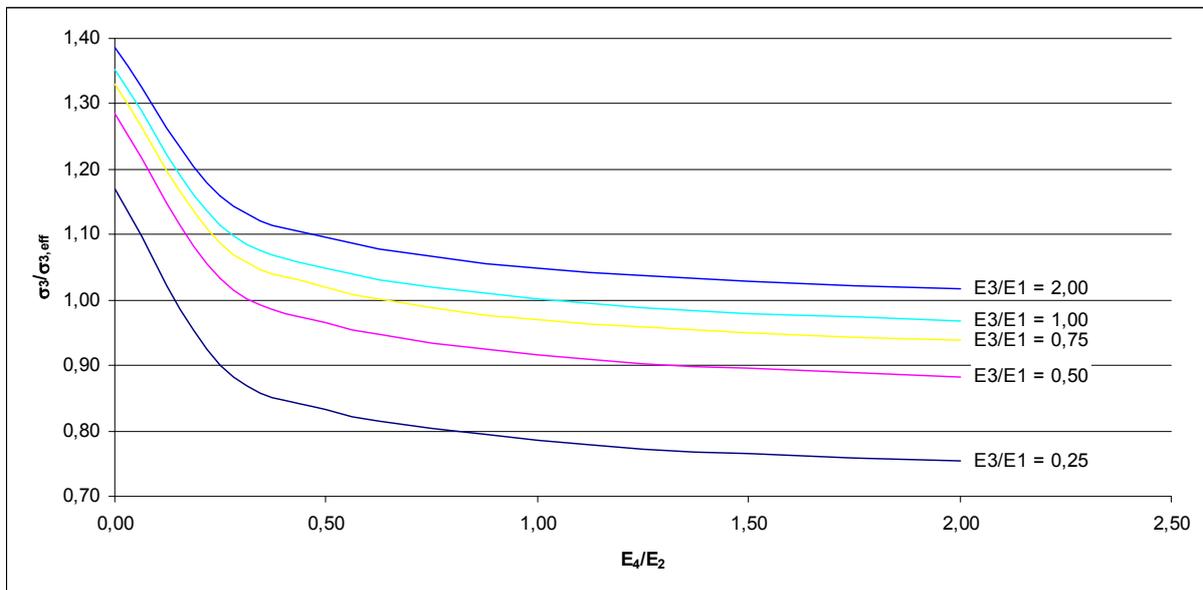
**Bild 6-7** Spannung  $\sigma_3$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{3,eff}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Verhältnissen  $E_3/E_1$  und  $E_4/E_2$  der Elastizitätsmodule für den Träger 1 (QS129)

<sup>1</sup> QS129 = zwei faserparallele Decklagen – eine nebeneinander liegende Lamellenschicht



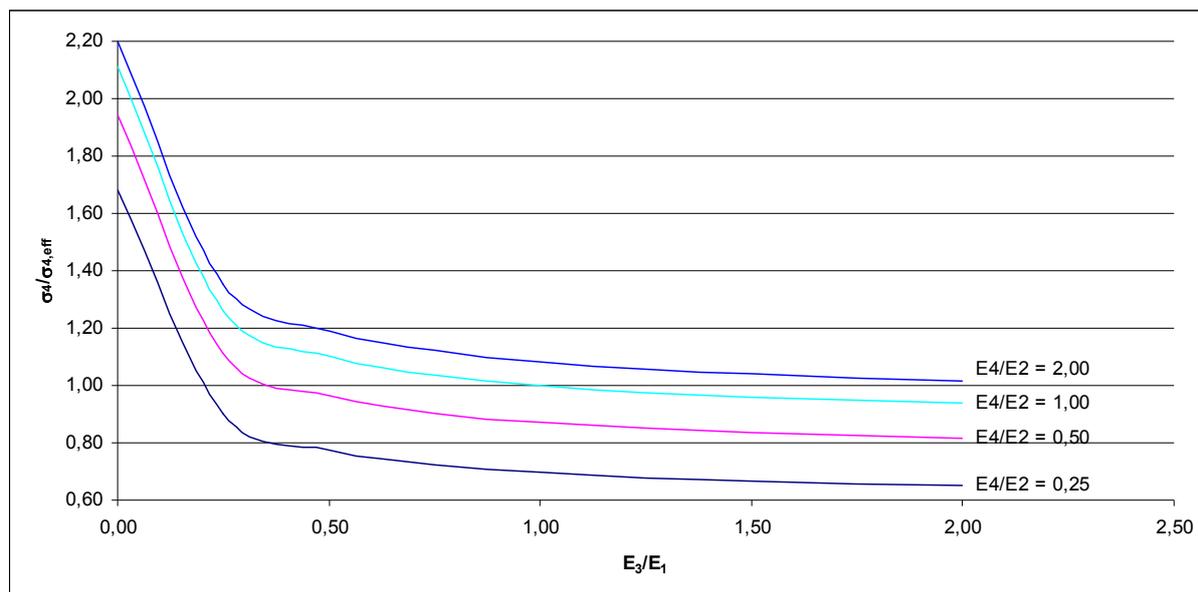
**Bild 6-8** Spannung  $\sigma_4$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{4,eff}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Verhältnissen  $E_3/E_1$  und  $E_4/E_2$  der Elastizitätsmodule für den Träger 1 (QS129)

### 6.3.2 Ergebnisse für den Träger 2 (QS125-3L<sup>1</sup>)



**Bild 6-9** Spannung  $\sigma_3$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{3,eff}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Verhältnissen  $E_3/E_1$  und  $E_4/E_2$  der Elastizitätsmodule für den Träger 2 (QS125-3L)

<sup>1</sup> QS125-3L = eine faserparallele Decklage – drei nebeneinander liegende Lamellenschichten



**Bild 6-10** Spannung  $\sigma_4$  (bezogen auf die Spannung  $\sigma_{4,eff}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Verhältnissen  $E_3/E_1$  und  $E_4/E_2$  der Elastizitätsmodule für den Träger 2 (QS125-3L)

### 6.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Bild 6-7 bis Bild 6-10 zeigen, dass die Spannung in einer Zelle umso höher ist, je höher der zugehörige Elastizitätsmodul der Zelle ist. Betrachtet man beispielsweise in Bild 6-7 die Spannung  $\sigma_3$  so zeigt sich, dass diese bei konstantem  $E_4/E_2$  mit steigendem  $E_3/E_1$  ebenfalls zunimmt. Dies gilt natürlich in umgekehrte Weise ebenfalls. Die Spannung in einem Element mit niedrigerem Elastizitätsmodul (z. B. Brettabschnitt mit Ast) ist geringer als die Spannung in einem Element mit höherem Elastizitätsmodul. Dies bedeutet, dass ein „schwächeres“ Element Spannungen an die Nachbarelemente abgibt.

Eine Zelle mit einem geringeren Elastizitätsmodul besitzt auch eine geringere Dehnsteifigkeit, als ein Nachbarelement mit höherem Elastizitätsmodul und höherer Dehnsteifigkeit. Aufgrund der Verleimung sind die beiden Zellen starr miteinander verbunden, wodurch diese die gleichen Dehnungen (zumindest an den Berührungsfugen) haben. Da die beiden Dehnungen gleich sind, ergibt sich die Spannung  $\sigma$  in der jeweiligen Zelle, indem man die Dehnung  $\varepsilon$  mit dem zugehörigen Elastizitätsmodul  $E$  der Zelle multipliziert ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ). Die Zelle mit dem höheren Elastizitätsmodul übernimmt einen Teil der Spannung der Zelle mit dem niedrigeren Elastizitätsmodul („schwache“ Zelle wird entlastet). Diese Entlastung des „weicheren“ Brettabschnitts wird bei übereinander liegenden Brettabschnitten (z. B. QS129) als „Laminierungseffekt“, bei nebeneinander liegenden Brettabschnitten (z. B. QS125-3L) als „Systemfaktor“ bezeichnet.

Um den Laminierungseffekt besser zu verstehen, wird nachfolgend davon ausgegangen, dass im Träger 1 (QS129) das Element 3 (unterste Lage) ein Brettabschnitt mit einem Ast ist, indem aufgrund des Astes der Elastizitätsmodul um ca. 25% geringer ist, als der Elastizitätsmodul des restlichen Bretts ( $E_3/E_1 = 0,75$ ). Weiter wird davon ausgegangen, dass der Elastizitätsmodul des Elements 4 dem der zugehörigen Lage entspricht ( $E_4/E_2 = 1$ ). Anhand von Bild 6-7 ergibt sich eine um ca. 93% geringere Spannung  $\sigma_3$  in Element 3, als für die Spannung  $\sigma_{3,eff}$  nach Glg. 6-2. Das Element 3 wird also um ca. 7% entlastet. Dies bedeutet, dass die Tragfähigkeit, die sich nach Glg. 6-2 ergeben würde, etwa 7% zu klein ist.

Um die Größenordnungen der Lastumlagerungen für den Systemfaktor zu veranschaulichen, wird nachfolgend ähnlich dem obigen Beispiel davon ausgegangen, dass im Träger 2 (QS125-3L) das Element 4 (unterste Lage der mittleren Lamellenschicht) ein Brettabschnitt mit einem Ast ist, indem aufgrund des Astes der Elastizitätsmodul um ca. 25% geringer ist, als der Elastizitätsmodul des restlichen Bretts ( $E_4/E_2 = 0,75$ ). Weiter wird davon ausgegangen, dass der Elastizitätsmodul der benachbarten Elemente 1 und 3 dem der zugehörigen Lagen entsprechen ( $E_3/E_1 = 1$ ).

Für den Träger 2 (QS125-3L) ergibt sich aus Bild 6-10, dass die Spannung  $\sigma_4$  in Element 4 um etwa 5% geringer ist, als die Spannung  $\sigma_{4,eff}$ , die sich nach Glg. 6-2 für  $E_4/E_2 = 1$  ergibt. Das Element 4 wird also um etwa 5% entlastet. Damit ergibt sich eine um ca. 5% höhere Tragfähigkeit als nach Glg. 6-2.

Sowohl der Laminierungseffekt als auch der Systemfaktor fallen umso größer aus, je höher der Unterschied der Elastizitätsmodule für die benachbarten Zellen ist. Für „hochwertige“ Bretter mit keinen oder nur sehr kleinen Ästen fällt der Laminierungseffekt und Systemfaktor sehr gering aus, da der Elastizitätsmodul der Brettabschnitte mit Ästen nur sehr wenig abgemindert wird, d. h.  $E_3/E_1 = 1$ . Auch bei Keilzinkungen ist kein Laminierungseffekt oder Systemfaktor vorhanden, da der Elastizitätsmodul einer Keilzinkenverbindung ungefähr mit dem eines fehlerfreien Holzes übereinstimmt (siehe z. B. COLLING [11]).

Durch die Entlastung eines Elements wird dem Nachbarelement jedoch unweigerlich eine zusätzliche Belastung zugewiesen. Für den Träger 1 (QS129) ergibt sich für den o. a. Fall ( $E_3/E_1 = 0,75$  und  $E_4/E_2 = 1$ ) eine Mehrbelastung des Elements 4 von etwa 10%. Das Element 3 des Trägers 2 (QS125-3L) wird für den o. a. Fall ( $E_4/E_2 = 0,75$  und  $E_3/E_1 = 1$ ) um ca. 4% höher belastet.

Wenn es sich bei dem „stärkeren“ Element (QS129 Element 4, QS125-3L Element 3) um einen fehlerfreien Brettabschnitt handelt, kann diese zusätzliche Belastung ohne weiteres aufgenommen werden. Ist das Element 4 bzw. 3 jedoch eine Keilzinkenverbindung mit hoher Steifigkeit aber gleichzeitig geringer Festigkeit, so kann diese Mehrbelastung dieses Elements zu viel sein, wodurch die Tragfähigkeit des BSP-Trägers erreicht ist.

Somit zeigt sich, dass wie bei BSH-Trägern auch bei BSP-Trägern es gefährlicher ist, wenn eine Keilzinkung in der Nähe eines Astes liegt, als zwei benachbarte Keilzinkenverbindungen, die aufgrund ähnlicher Steifigkeiten keine Mehrbelastung erfahren.

Für das in Abschnitt 7 beschriebene Rechenmodell zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Brettsperrholzträgern, spielt das Bruchkriterium eine entscheidende Rolle. Mit dem Bruchkriterium wird festgelegt, wann das endgültige Versagen eines BSP-Trägers erreicht ist. Bisherige Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass nach Ausfall eines Elements in der Zugzone, die daraus resultierende Mehrbelastung für das Nachbarelement nicht aufnehmen kann und bei derselben Laststufe versagt. Bild 6-7 bis Bild 6-10 zeigen, warum dies der Fall ist.

Fällt in dem Träger 1 (QS129) das Element 4 aus ( $E_4/E_2 = 0$ , zweite Lage von unten), so nimmt die Spannung im Element 3 (bei  $E_3/E_1 = 1$ ) um etwa 50% zu. Bei Ausfall des Elements 3 ( $E_3/E_1 = 0$ , unterste Lage) steigt die Spannung  $\sigma_4$  in Element 4 um den Faktor 2,39 an! Für den BSH-Träger den COLLING [11] in seiner Arbeit untersucht hat, ergibt sich für diesen Fall für das Element 4 lediglich eine Mehrbelastung von etwa 80%.

Wenn bei dem Träger 2 (QS125-3L) das Element 4 ausfällt ( $E_4/E_2 = 0$ , mittlere Lage), nehmen die Elemente 3 (bei  $E_3/E_1 = 1$ ) etwa 35% mehr Spannung auf.

Derartig hohe zusätzliche Beanspruchungen können nur von Zellen mit extrem hoher Festigkeit, wie z. B. fehlerfreien Brettabschnitten aufgenommen werden.

Ziel dieses Abschnittes war es, die Veränderung der Spannungen in den Elementen 3 und 4 zu untersuchen, wenn sich deren Elastizitätsmodule von dem der übrigen Zellen der zugehörigen Lagen unterscheiden. Dabei konnten folgende Erkenntnisse festgestellt werden, die im Wesentlichen auch mit denen des vorherigen Abschnitts übereinstimmen:

- Spannungen werden von steifen Elementen angezogen
- „weichere“ Elemente geben Spannungen an Nachbarelemente ab (Laminierungseffekt bzw. Systemfaktor)
- Keilzinkungen ziehen aufgrund ihrer hohen Steifigkeit Spannungen an, diese Mehrbelastung ist i. A. aber zu hoch, weshalb keine Laststeigerung möglich ist
- Mehrbelastungen infolge ausfallender Elemente können nur von Zellen mit sehr hoher Festigkeit aufgenommen werden

Anhand zweier BSP-Träger sollte das Tragverhalten von Brettabschnitten mit unterschiedlichen Steifigkeiten in einem Brettsperrholzträger verdeutlicht werden, sowie die Tendenzen mit den

vorgegeben Trägern zahlenmäßig belegt werden. Die vorgestellten Verhältnisse der Spannungen (Bild 6-3 bis Bild 6-10) gelten nur für die betrachteten Träger.

Zwar haben die Ergebnisse nur eingeschränkte Gültigkeit, dennoch konnten wichtige Erkenntnisse über das Tragverhalten von Brettsperrhölzern gewonnen werden, um das Tragverhalten insgesamt besser zu verstehen.

## 7 Programm zur Vorhersage der Biegetragfähigkeit von Brettsperrholzträgern

### 7.1 Simulation der Holzeigenschaften

#### 7.1.1 Allgemeines

Für die Simulation von BSP-Trägern mit beliebigen Holzeigenschaften (Rohdichte, Ästigkeit, E-Modul etc.), wird das von COLLING [11] und EHLBECK et al. [23] entwickelte Simulationsmodell verwendet. Neben der Erläuterung dieses Simulationsmodells werden in den nachfolgenden Abschnitten auch die hierfür benötigten Eingangsdaten vorgestellt. Für die Simulation wird jede einzelne Lamelle in mehrere, jeweils 150 mm lange Brettabschnitte unterteilt, die im Weiteren als „Zellen“ bezeichnet werden.

Um die Holzeigenschaften der Brettlamellen möglichst realistisch simulieren zu können, wurden für das oben genannte Simulationsmodell zunächst die festigkeitsrelevanten Einflussgrößen wie Holzfeuchte, Rohdichte und Ästigkeit für das in deutschen Leimbaubetrieben verwendeten Schnittholz aufgenommen und anschließend statistisch ausgewertet. An diesen Proben wurden außerdem noch die Zug- und Druckelastizitätsmodule sowie Zug- und Druckfestigkeiten bestimmt. Mit den zuvor ermittelten festigkeitsrelevanten Einflussgrößen konnten schließlich Regressionsgleichungen für die E-Module und Festigkeiten angegeben werden. Hierzu sei auf die Arbeiten [13], [14], [19], [21], [23] und [28] hingewiesen.

In den nachfolgenden Abschnitten wird der prinzipielle Ablauf des in COLLING [11] und EHLBECK et al. [23] beschriebenen Simulationsmodells, zum allgemeinen Verständnis in gekürzter Form wiedergegeben. Eine genaue Beschreibung, wie die Eigenschaften eines BSH-Trägers simuliert werden, ist den zuvor genannten Arbeiten zu finden.

Zur Simulation eines kompletten BSP-Trägers werden ausschließlich die verschiedenen Holzeigenschaften jedes einzelnen Bretts jeder Längslage simuliert, wobei der Schubmodul mit  $G = 690 \text{ N/mm}^2$  für die Längslage als konstant angenommen wird. Die Holzeigenschaften der Querlagen werden nicht simuliert, da es hierfür bislang noch keine Eingangsdaten gibt. Da mit den Simulationen außerdem ausschließlich die Biegetragfähigkeit unter Berücksichtigung der festigkeitsrelevanten Einflussgrößen von Brettsperrhölzern untersucht wird, ist eine Berücksichtigung der Streuung der Holzeigenschaften der einzelnen Querlagen nicht relevant. Für die Querlagen werden deshalb folgende konstante Werte angenommen:

- Zug- bzw. Druck-Elastizitätsmodul:  $E_{t,90} = E_{c,90} = 370 \text{ N/mm}^2$
- Rollschubmodul:  $G_R = 69 \text{ N/mm}^2$
- Zug- bzw. Druck-Festigkeit:  $f_{t,90} = 0,4 \text{ N/mm}^2, f_{c,90} = 2,5 \text{ N/mm}^2$
- Rollschubfestigkeit:  $f_R = 1,0 \text{ N/mm}^2$

#### 7.1.2 Holzfeuchte

Die geprüften BSP-Träger hatten im Mittel eine Holzfeuchte von  $(12 \pm 2)\%$  (siehe Anhang E). Deshalb wird auch für die Simulation eine konstante Holzfeuchte von  $u = 12\%$  für jede einzelne Zelle angenommen. COLLING [11] hat in zusätzlichen Simulationsrechnungen den Einfluss der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern abgeschätzt. Dabei ergab sich eine Abnahme von 1,5% bei einer Zunahme der Holzfeuchte von 1%. Da BSP-Träger ein ähnliches Tragverhalten haben

wie BSH-Träger, ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Holzfeuchte auf die Biegetragfähigkeit in einer ähnlichen Größenordnung liegt.

### 7.1.3 Lage der Keilzinkenverbindungen

Wie Untersuchungen von COLLING/GÖRLACHER [14] gezeigt haben, ist es nicht möglich eine für alle deutschen Holzleimbaubetriebe repräsentative Verteilung für die Brettlänge zu ermitteln. Aus diesem Grund erfolgten sämtliche Simulationsrechnungen von COLLING [11] mit einer mittleren Brettlänge von  $l_B = 4,0$  m mit einer Standardabweichung von  $s = 0,40$  m. Da für die Produktion von Brettschichtholz vermehrt maschinell sortiertes Holz zum Einsatz kommt, welches ungekürzt weiter verarbeitet wird, erscheint somit auch die Annahme der mittleren Brettlänge gerechtfertigt.

Um die Lage der Keilzinkungen in den Brettschichtholzträgern zu simulieren, geniert COLLING [11] zunächst eine Endloslamelle. Diese Endloslamelle setzt sich aus mehreren Brettern unterschiedlicher Länge zusammen. Aus dieser Endloslamelle werden schließlich die Lamellen für die einzelnen Lagen der Brettschichtholzträger „abgesägt“. Somit ergeben sich beliebig über den gesamten Brettschichtholzträger verteilte Keilzinkenverbindungen.

Im Gegensatz zur Brettschichtholzerstellung wird bei der Fertigung von Brettspertholz hauptsächlich visuell sortiertes Holz verwendet. Bei der visuellen Sortierung werden Brettabschnitte, deren Ästigkeit nicht der Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1 [N2] entsprechen, gezielt herausgeschnitten. Durch dieses gezielte Heraustrennen von potentiellen Schwachstellen ergeben sich deshalb andere Brettlängen und somit auch Keilzinkenabstände, als bei maschinell sortiertem Holz. Mit dem Heraustrennen derartiger Schwachstellen treten auch mehr Keilzinkenverbindungen innerhalb der Träger auf.

### 7.1.4 Rohdichte

Für die Simulation der Brett-Rohdichte wird für das gesamte Brett die Darr-Rohdichte als konstant angenommen. Aufgrund der geringen Streuung der Rohdichte innerhalb eines Brettes (siehe EHLBECK/COLLING [19]), die von der Streuung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften überdeckt wird (siehe COLLING [11]), ist diese vereinfachte Annahme gerechtfertigt. Zur Simulation der Brett-Rohdichte wird aus der repräsentativen Normalverteilung der Darr-Rohdichte nach GLOS [28] NV(430; 50) ein beliebiger Wert gewählt.

### 7.1.5 Ästigkeit

Für die Simulation der Ästigkeit in Längsrichtung des Bretts sei auf die Arbeit von EHLBECK et al. [21] hingewiesen, die auf den Daten und Ergebnisse von COLLING/DINORT [12] aufbaut. Hierzu wurde an insgesamt 456 Brettern, die aus drei unterschiedlichen Wuchsgebieten stammten und in die drei verschiedenen Güteklassen<sup>1</sup> sortiert wurden, die wuchsspezifischen Regelmäßigkeiten der Ästigkeit für zwei Brettbreiten untersucht. Die Arbeiten zeigten, dass sowohl die Astabstände als auch die Astgrößen in einer gewissen Regelmäßigkeit auftraten. Die regelmäßigen Astabstände bezeichneten die Verfasser als Hauptast-Abstände, die Astgrößen als charakteristischen KAR-Wert. Die vorhandenen Astabstände und KAR-Werte aller Brettabschnitte, wurden schließlich als vielfache dieser beiden charakteristischen Astgrößen angegeben. EHLBECK et al. [21] untersuchte außerdem noch den größten und kleinsten Hauptast-Abstand sowie die Differenz dieser beiden Werte. Der charakteristischen KAR-Wert wurde in gleicher Weise untersucht.

Die Ergebnisse zeigten, dass weder die Brettbreite noch das Wuchsgebiet einen gesicherter statistischen Einfluss auf die Ästigkeit haben. Bei der Ermittlung des charakteristischen KAR-Wertes konnten Unterschiede zwischen den verschiedenen Güteklassen festgestellt werden. Bei den

---

<sup>1</sup> Bezeichnung nach DIN 1052: 1988-04

Astabständen und den vielfachen der charakteristischen Astgrößen ergaben sich jedoch für die untersuchten Güteklassen identische Häufigkeitsverteilungen.

Mit diesen Erkenntnissen konnte nun die Ästigkeit in Längsrichtung eines Bretts wie folgt simuliert werden:

Simulation des Astabstandes

1. Wahl eines beliebigen kleinsten Astabstands  $a_{min}$   
aus Log-Normalverteilung LNV(3,476; 0,359)
2. Wahl einer beliebigen Differenz  $\Delta a$  zwischen größtem und kleinstem Haupt-Astabstand  
aus Log-Normalverteilung LNV(3,503; 0,520)
3. Wahl eines beliebigen Hauptast-Abstands  $a_{ges}$   
aus Log-Normalverteilung LNV(3,808; 0,372)

Berechnung des Hauptast-Abstands  $a$  des betrachteten Bretts nach Glg. 7-1

$$a = a_{min} + (a_{ges} - 15) \cdot \frac{\Delta a}{150 - 15} \quad \text{Glg. 7-1}$$

Simulation des KAR-Wertes

1. Wahl eines beliebigen kleinsten Vielfaches  $k_{min}$   
aus Log-Normalverteilung LNV(-0,347; 0,378)
2. Wahl einer beliebigen Differenz  $\Delta k$  zwischen größtem und kleinstem charakteristischen KAR-Wert  
aus Log-Normalverteilung LNV(0,485; 0,431)
3. Wahl eines beliebigen Vielfaches aus der Gesamtverteilung  $k_{i,ges}$   
aus Log-Normalverteilung LNV(0,312; 0,455)

Berechnung des Vielfachen des betrachteten Bretts nach Glg. 7-2

$$k = k_{min} + (k_{ges} - 0,25) \cdot \frac{\Delta k}{4,5 - 0,25} \quad \text{Glg. 7-2}$$

Wahl eines beliebigen charakteristischen KAR-Wertes  $KAR_c$   
aus Log-Normalverteilung LNV(-2,206, 0,342)

Berechnung des KAR-Wertes  $KAR$  des betrachteten Brettes nach Glg. 7-3

$$KAR = k \cdot KAR_c \quad \text{Glg. 7-3}$$

Die Häufigkeitsverteilung für das vielfache  $k_{i,ges}$  des charakteristischen KAR-Wertes  $KAR_c$  ist in der Arbeit EHLBECK et al. [23] zu finden. Die Parameter für die Häufigkeitsverteilung sind jedoch nicht angegeben. Selbiges gilt auch für den charakteristischen KAR-Wert  $KAR_c$ , dessen Häufigkeitsverteilung COLLING [11] zwar angibt, jedoch nicht die zugehörigen Parameter der Verteilung. Deshalb muss für die Simulation der Ästigkeit die notwendigen Verteilungsparameter aus den angegebenen Häufigkeitsverteilungen ermittelt werden.

Hierzu wurden zunächst für beide Werte  $KAR_c$  und  $k_{i,ges}$  aus den angegebenen Verteilungen die relative Häufigkeit abgelesen. Für beide Verteilungen wurde eine log-Normalverteilung angenommen. Da die Mittelwerte und Standardabweichungen der theoretischen Verteilungen nicht explizit in den genannten Arbeiten angegeben waren, wurden sie deshalb auf iterativem Weg ermittelt. Hierzu wurde zunächst die Differenz zwischen der gegebenen relativen Häufigkeit und der theoretischen Häufigkeit ermittelt und quadriert. Danach wurden diese Abstandskvadrat summiert und der Mittelwert sowie

die Standardabweichung solange verändert bis sich ein Minimum für die Summe der Abstandskquadrate ergab.

Bei der Ermittlung der Verteilungsparameter für das vielfache des charakteristischen KAR-Wertes  $k_{i,ges}$  wurden zwei zusätzliche Bedingungen bei der Optimierung berücksichtigt und zwar folgende:

- Gemessener Wert für die relative Häufigkeit für das 2,875-fache des charakteristischen KAR-Wertes muss gleich dem theoretischen Wert sein
- Theoretischer Wert der relativen Häufigkeit für das 1,875-fache des charakteristischen KAR-Wertes darf um nicht mehr als 10% von dem gemessenen Wert abweichen

Zwei zusätzliche Bedingungen wurden auch bei der Optimierung der theoretischen Verteilung für den charakteristischen KAR-Wert  $KARc$  berücksichtigt, die folgt lauten:

- Gemessener Wert für die relative Häufigkeit für  $KARc = 0,23$  muss gleich dem theoretischen Wert sein
- Theoretischer Wert der relativen Häufigkeit für  $KARc = 0,13$  darf um nicht mehr als 3,64% von dem gemessenen Wert abweichen

Die oben angegebenen Mittelwerte und Standardabweichungen für die beiden theoretischen Verteilungen wurden auf diese Weise ermittelt. Um die Qualität der ermittelten Verteilungen zu testen werden in Abschnitt 7.1.8.1 die gemessenen Verteilungen mit den simulierten Verteilungen verglichen. In diesem Abschnitt wird darüber hinaus auch die gemessene Ästigkeit nach COLLING [11] mit der simulierten Ästigkeit nach dem oben beschriebenen Verfahren verglichen.

## 7.1.6 Ermittlung des Zellen- und Brett-Elastizitätsmoduls

### 7.1.6.1 Nicht keilgezinkte Brettabschnitte

Mit der von COLLING [11] angegebenen Regressionsgleichungen kann nun für jede Zelle mit der bekannten Rohdichte und Ästigkeit der Elastizitätsmodul berechnet werden. Die Regressionsgleichung für den Druck-Elastizitätsmodul gilt für eine Holzfeuchte von  $u = 12\%$ .

$$\ln(E_{t,0}) = 8,20 + 3,13 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 1,17 \cdot KAR \quad \text{Glg. 7-4}$$

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

$$\ln(E_{c,0}) = 8,22 + 2,994 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 0,76 \cdot KAR \quad \text{Glg. 7-5}$$

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

Hierin bedeuten:

- $E_{t,0}, E_{c,0}$  = Zug- bzw. Druck-Elastizitätsmodul in  $N/mm^2$
- $\rho_0$  = Darr-Rohdichte in  $kg/m^3$
- $KAR$  = KAR-Wert nach Abschnitt 7.1.5
- $R$  = Korrelationskoeffizient
- $s_R$  = Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung)

Die Standardabweichung des Residuums  $s_R$  gibt an, um welches Maß die einzelnen Messwerte von der, aus allen Messwerten ermittelte Regressionsgerade abweichen. Die Streuung des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Brettes fällt jedoch deutlich geringer aus (siehe COLLING/SCHERBERGER [13]). Dabei wurde die gesamte Reststreuung  $s_R$  in zwei Anteile aufgeteilt:

- Abstand  $\Delta B$  des Bretts von der Regressionsgeraden
- Reststreuung  $s_{R,B}$  des Elastizitätsmoduls innerhalb eines Bretts

Weitere Untersuchungen von GÖRLACHER [32] zeigten:

- Abstand DB kann normalverteilt angenommen werden mit dem Mittelwert 0 und der Standardabweichung 0,16
- Die Reststreuung  $s_{R,B}$  innerhalb eines Bretts kann ebenfalls als normalverteilt angenommen werden mit dem Mittelwert 0,079 und der Standardabweichung 0,027

Mit diesen Erkenntnissen lässt sich der Elastizitätsmodul für die einzelnen Zellen sowohl unter Berücksichtigung der streuenden Holzeigenschaften (Rohdichte, Ästigkeit) als auch den wachstumsbedingten Regelmäßigkeiten wie folgt simulieren:

1. Wahl eines zufälligen Abstands des einzelnen Bretts  $\Delta B$  von der Regressionsgerade aus Normalverteilung  $NV(0; 0,16)$
2. Wahl einer zufälligen Reststreuung  $s_{R,B}$  für das einzelne Brett aus Normalverteilung  $NV(0,079; 0,027)$
3. Wahl eines zufälligen Streuwertes  $X$  für jede Zelle eines Bretts mit der Reststreuung  $s_{R,B}$  aus Normalverteilung  $NV(0; s_{R,B})$
4. Berechnung des zu erwartenden Zellen-E-Moduls  $E_{reg}$  nach Glg. 7-4 bzw. Glg. 7-5 mit der bekannten Rohdichte und Ästigkeit für die Zelle
5. Berechnung des Zellen-E-Moduls nach Glg. 7-6

$$\ln(E) = \ln(E_{Reg}) + \Delta B + X \quad \text{Glg. 7-6}$$

Mit dem oben beschriebenen Vorgehen werden die Elastizitätsmodule der einzelnen Zellen eines Bretts simuliert. Der E-Modul eines Bretts kann wie die Gesamtfedersteifigkeit von mehreren hintereinander geschalteten Federn nach Glg. 7-7 berechnet werden:

$$E_B = n \cdot \left( \sum_{i=1}^n E_i^{-1} \right)^{-1} \quad \text{Glg. 7-7}$$

Hierin bedeuten:

- $E_B$  = Elastizitätsmodul des Bretts
- $n$  = Anzahl der Zellen des Bretts
- $E_i$  = Zellen-Elastizitätsmodul nach Glg. 7-6

Im Simulationsprogramm werden zunächst für die einzelnen Zellen eines Brettes die zugehörigen Zellen-E-Module – wie oben beschrieben - simuliert und dann nach Glg. 7-7 der Brett-E-Modul berechnet. Wenn für den Brett-E-Modul Bereichsgrenzen vorgeben sind, wird überprüft, ob der simulierte Brett-E-Modul innerhalb dieser Grenzen liegt. Wenn dies nicht der Fall ist, wird die Simulation bei Punkt 1 neu begonnen und solange wiederholt, bis die Bereichsgrenzen für den Brett-E-Modul eingehalten sind.

### 7.1.6.2 Keilgezinkte Brettabschnitte

Für den Elastizitätsmodul von keilgezinkten Brettabschnitten gibt COLLING [11] folgende Regressionsgleichungen für eine Holzfeuchte von  $u = 12\%$  an:

$$\ln(E_{t,0,j}) = 8,407 + 2,630 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,\min} \quad \text{Glg. 7-8}$$

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

$$\ln(E_{c,0,j}) = 8,282 + 2,53 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,\min} \quad \text{Glg. 7-9}$$

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

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 E_{t,0,j}, E_{c,0,j} &= \text{Zug- bzw. Druck-Elastizitätsmodul einer Keilzinkenverbindung in N/mm}^2 \\
 \rho_{0,min} &= \text{kleinerer Wert der Darr-Rohdichten der beiden Stoßhälften in kg/m}^3 \\
 R &= \text{Korrelationskoeffizient} \\
 s_R &= \text{Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung)}
 \end{aligned}$$

Die Elastizitätsmodule der keilgezinkten Brettabschnitte werden wie folgt bestimmt:

1. Wahl eines zufälligen Streuwertes  $X$  aus der zugehörigen Reststreuung  $s_R$  aus  $NV(0, s_R)$  mit  $s_R = 0,187$  für Zug und  $s_R = 0,088$  für Druck
2. Berechnung des zu erwartenden E-Moduls der Keilzinkung  $E_{reg}$  nach Glg. 7-8 bzw. Glg. 7-9 mit der bekannten Rohdichte
3. Berechnung des Keilzinken-E-Moduls nach Glg. 7-10

$$\ln(E_j) = \ln(E_{Reg}) + X \quad \text{Glg. 7-10}$$

## 7.1.7 Ermittlung der Zellen-Festigkeit

### 7.1.7.1 Nicht keilgezinkte Brettabschnitte

Mit den folgenden Regressionsgleichungen können mit der bekannten Ästigkeit, Rohdichte und dem Elastizitätsmodul die Festigkeiten jeder Zelle berechnet werden (siehe COLLING [11]). Die berechneten Festigkeiten gelten ebenfalls für eine Holzfeuchte von  $u = 12\%$ .

$$\begin{aligned}
 \ln(f_{t,0}) &= -4,22 + \ln(E_{t,0}) \cdot (0,876 - 0,093 \cdot KAR) \\
 &\quad \text{mit } R = 0,86 \text{ und } s_R = 0,187
 \end{aligned} \quad \text{Glg. 7-11}$$

$$\begin{aligned}
 \ln(f_{c,0}) &= 2,586 + 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 - 0,825 \cdot KAR \\
 &\quad \text{mit } R = 0,94 \text{ und } s_R = 0,088
 \end{aligned} \quad \text{Glg. 7-12}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 f_{t,0}, f_{c,0} &= \text{Zug- bzw. Druckfestigkeit in N/mm}^2 \\
 E_{t,0} &= \text{Zug-Elastizitätsmodul in N/mm}^2 \\
 \rho_0 &= \text{Darr-Rohdichte in kg/m}^3 \\
 KAR &= \text{KAR-Wert} \\
 R &= \text{Korrelationskoeffizient} \\
 s_R &= \text{Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung)}
 \end{aligned}$$

Zur Simulation der Zellenfestigkeit wird dabei nach folgendem Schema vorgegangen:

Aus der Normalverteilung  $NV(0 | 0,13)$  wird für jedes Brett ein Abstand  $\Delta_B$  von der Regressionsgerade gewählt. Mit Hilfe der obigen Regressionsgleichungen wird für jede Zelle die erwartete Festigkeit  $f_{Reg,i}$  ermittelt. Anschließend wird aus der Reststreuung  $s_{R,B}$  für jede Zelle ein zufälliger Streuwert  $X_i$  gewählt ( $NV(0 | 0,13)$ ). Anschließend kann die Zellfestigkeit wie folgt ermittelt werden:

$$\ln(f_j) = \ln(f_{Reg,i}) + \Delta_B + X_i \quad \text{Glg. 7-13}$$

### 7.1.7.2 Keilgezinkte Brettabschnitte

COLLING [11] gibt auch für keilgezinkte Brettabschnitte Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Zug- und Druckfestigkeit an. Sie gelten wiederum für eine Holzfeuchte von  $u = 12\%$ .

$$\ln(f_{t,0,j}) = 2,72 + 6,14 \cdot 10^{-5} \cdot E_{t,0,j} \quad \text{Glg. 7-14}$$

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

$$\ln(f_{c,0,j}) = -3,05 + 0,66 \cdot \ln(E_{c,0,j}) + 9,85 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{0,\min} \quad \text{Glg. 7-15}$$

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

Hierin bedeuten:

$$f_{t,0,j}, f_{c,0,j} = \text{Zug- bzw. Druckfestigkeit einer Keilzinkenverbindung in N/mm}^2$$

$$E_{t,0,j}, E_{c,0,j} = \text{Zug- bzw. Druckelastizitätsmodul in N/mm}^2$$

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

$$R = \text{Korrelationskoeffizient}$$

$$s_R = \text{Standardabweichung des Residuums (gesamte Reststreuung)}$$

Zur Simulation der Keilzinkenfestigkeit wird dabei nach folgendem Schema vorgegangen:

1. Wahl eines zufälligen Streuwertes  $X$  aus der zugehörigen Reststreuung  $s_R$  aus  $NV(0, s_R)$  mit  $s_R = 0,195$  für Zug und  $s_R = 0,116$  für Druck
2. Berechnung der zu erwartenden Festigkeit der Keilzinkung  $f_{Reg}$  nach Glg. 7-14 bzw. Glg. 7-15 mit der bekannten Rohdichte
3. Berechnung der Keilzinken-Festigkeit nach Glg. 7-10

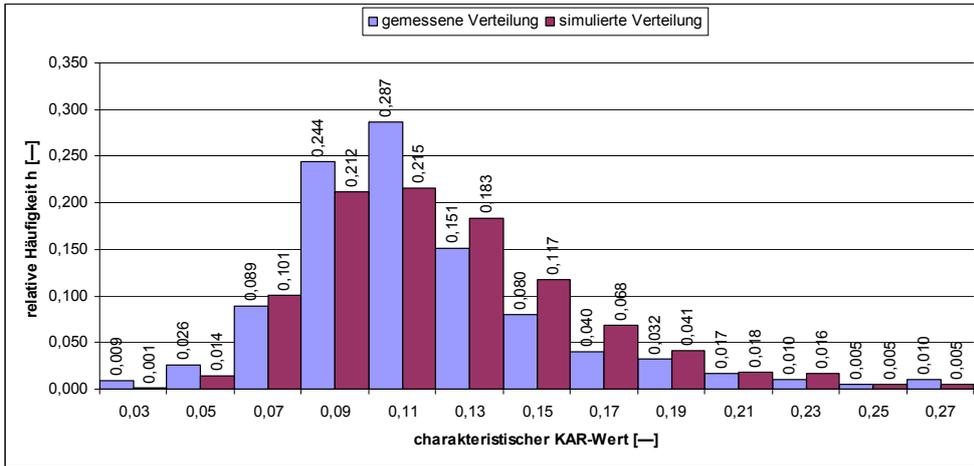
$$\ln(f_j) = \ln(f_{Reg}) + X \quad \text{Glg. 7-16}$$

## 7.1.8 Kontrolle der Simulationsqualität

Um die Qualität des in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Simulationsprogramms zu überprüfen, werden nachfolgend einzelne Simulationsergebnisse vorgestellt. Hierzu wird die simulierte Häufigkeitsverteilung der Ästigkeit mit der gemessenen Verteilung nach COLLING [11] verglichen. Wie bereits in Abschnitt 7.1.5 erwähnt, wird für die Simulation der Ästigkeit der sog. Charakteristische KAR-Wert  $KAR_c$  und das vielfache des charakteristischen KAR-Wertes  $k_{i,ges}$  benötigt. In den Arbeiten COLLING [11] und EHLBECK et al. [23] sind die gemessenen Häufigkeitsverteilung angegeben, die zugehörigen Verteilungsparameter sind hingegen nicht explizit aufgeführt. Aus diesem Grund wird neben der simulierten Häufigkeitsverteilung für die Ästigkeit zusätzlich die simulierte Häufigkeitsverteilung des charakteristischen KAR-Wertes  $KAR_c$  sowie die simulierte Häufigkeitsverteilung des vielfachen des charakteristischen KAR-Wertes  $k_{i,ges}$  mit den ermittelten Häufigkeitsverteilungen verglichen.

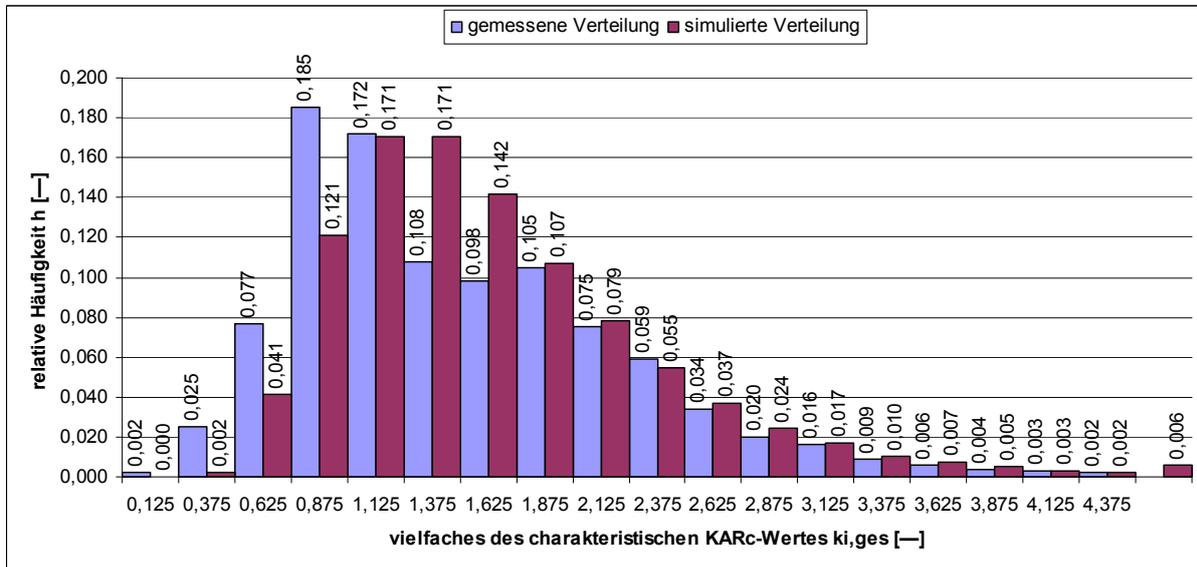
### 7.1.8.1 Simulierte Ästigkeiten

Im Diagramm 7-1 ist die gemessene Verteilung des charakteristischen KAR-Wertes  $KAR_c$  nach COLLING [11] sowie die simulierte Verteilung für einen Mittelwert  $z_M = -2,206$  und eine Standardabweichung  $s_z = 0,342$  dargestellt. Die Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Häufigkeiten fallen im Bereich zwischen 0,09 und 0,17 für den  $KAR_c$ -Wert am größten aus. Der größte Unterschied ist bei dem  $KAR_c$ -Wert von 0,11 mit ca. 0,07 festzustellen, was einer Differenz von ungefähr 25% entspricht.



**Diagramm 7-1** Gemessene Häufigkeitsverteilung des char. KARc-Wertes nach COLLING [11] und simulierte

Die simulierte Verteilung für das vielfache  $k_{i,ges}$  des charakteristischen KARc-Wertes, die sich für einen Mittelwert von  $z_M = 0,312$  und einer Standardabweichung von  $s_Z = 0,455$  ergibt ist in Diagramm 7-2 dargestellt. Außerdem enthält das Diagramm die gemessene Verteilung wie sie in EHLBECK et al. [23] angegeben ist. Auch in diesem Diagramm sind teilweise deutliche Unterschiede zwischen den gemessenen und simulierten Häufigkeiten festzustellen. Mit zunehmenden  $k_{i,ges}$  nimmt der Unterschied zwischen gemessener und simulierter Verteilung jedoch deutlich ab.



**Diagramm 7-2** Gemessene Häufigkeitsverteilung für das vielfache  $k_{i,ges}$  des charakteristischen KARc-Wertes nach EHLBECK et al. [23] und simulierte

Obwohl in den beiden obigen Diagrammen teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den gemessenen und simulierten Verteilungen festzustellen sind, ergibt sich dennoch eine relativ gute Übereinstimmung für die Häufigkeitsverteilung der Ästigkeit (siehe Diagramm 7-3). Dieses Diagramm zeigt, dass die in Abschnitt 7.1.5 angegebenen Werte und Gleichungen zur Simulation der Ästigkeit eines Brettes realistische Ergebnisse liefert.

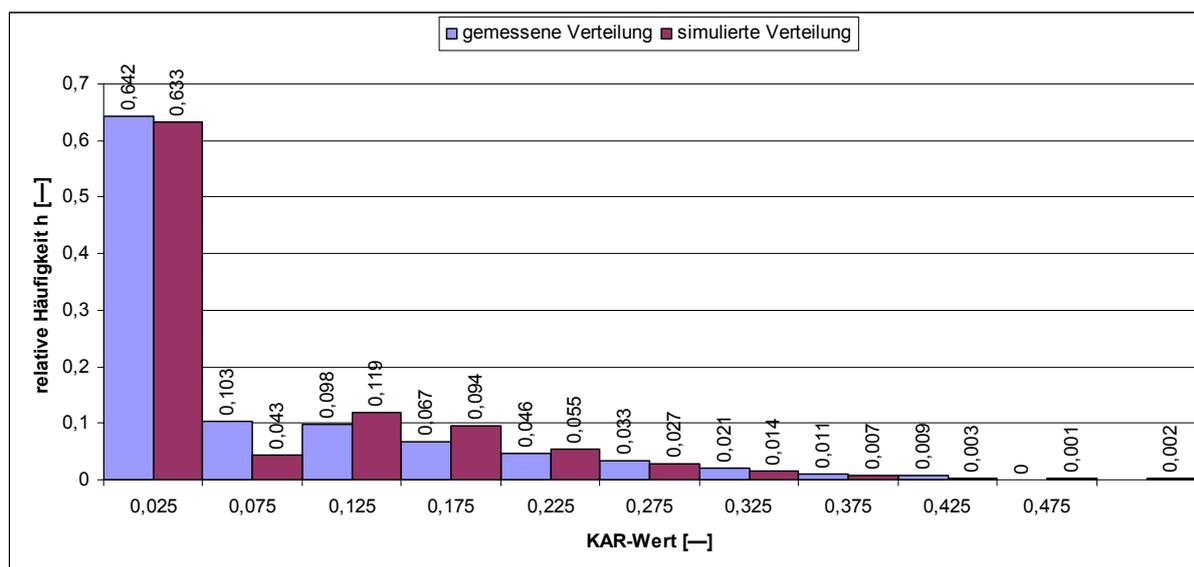


Diagramm 7-3 Gemessene Häufigkeitsverteilung der Ästigkeit nach COLLING [11] und simulierte

### 7.1.8.2 Simulierte Eigenschaften nicht keilgezinkter Brettabschnitte

In der nachfolgenden Tabelle sind die simulierten Werte nach dem obigen Schema angegeben. Bei diesen Simulationen galt als einzige Einschränkung, dass die Ästigkeit kleiner 0,67 sein musste. Außerdem sind zum Vergleich der simulierten Werte in dieser Tabelle noch Werte aus anderen Arbeiten für nicht keilgezinkte Brettabschnitte angegeben.

Tabelle 7-1 Vergleich der simulierten Eigenschaften mit Ergebnissen früherer Arbeiten für nicht keilgezinkte Brettabschnitte

Holzeigenschaft	Quelle	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung [N/mm <sup>2</sup> ]	Stichprobenumfang [-]
Zug-Elastizitätsmodul $E_{t,0}$	Simuliert	13576	2444	54346
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	13299	3263	10104
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	12250	3150	—
Druck-Elastizitätsmodul $E_{c,0}$	Simuliert	13294	2114	54346
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	13322	3006	10104
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	12410	2840	—
Zug-Festigkeit $f_{t,0}$	Simuliert	60,0	14,8	54346
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	58,0	14,1	10104
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	50,2	16,4	—
Druck-Festigkeit $f_{c,0}$	Simuliert	44,2	9,3	54346
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	42,5	6,9	10104
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	39,8	10,2	—

<sup>1</sup> Simulierte Eigenschaften  
<sup>2</sup> Versuchstechnisch ermittelte Eigenschaften

### 7.1.8.3 Simulierte Eigenschaften keilgezinkter Brettabschnitte

Wie bereits bei den nicht keilgezinkten Brettabschnitten wurden auch für keilgezinkte Brettabschnitte die Eigenschaften simuliert. In der nachfolgenden Tabelle sind die simulierten Werte nach dem obigen Schema angegeben. Bei diesen Simulationen galt ebenfalls als einzige Einschränkung, dass die Ästigkeit kleiner 0,67 sein musste und kein Ast im Bereich einer Keilzinkung sein durfte. Außerdem sind zum Vergleich der simulierten Werte in dieser Tabelle noch Werte aus anderen Arbeiten für keilgezinkte Brettabschnitte angegeben.

**Tabelle 7-2 Vergleich der simulierten Eigenschaften mit Ergebnissen früherer Arbeiten für keilgezinkte Brettabschnitte**

Keilzinkeneigenschaft	Quelle	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung [N/mm <sup>2</sup> ]	Stichprobenumfang [—]
Zug-Elastizitätsmodul $E_{t,0,j}$	Simuliert	13279	2032	1999
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	13080	2247	1896
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	13580	2350	—
Druck-Elastizitätsmodul $E_{c,0,j}$	Simuliert	11203	1658	1999
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	11264	2778	1896
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	11680	2800	—
Zug-Festigkeit $f_{t,0,j}$	Simuliert	35,3	7,2	1999
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	34,6	9,0	1896
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	34,8	8,4	—
Druck-Festigkeit $f_{c,0,j}$	Simuliert	33,9	7,1	1999
	WIEGAND [52] <sup>1</sup>	33,3	6,9	1896
	EHLBECK et al. [21] <sup>2</sup>	33,6	8,8	—
<sup>1</sup> Simulierte Eigenschaften				
<sup>2</sup> Versuchstechnisch ermittelte Eigenschaften				

## 7.2 Berücksichtigung des Bruchverhaltens von Brettsperrholzträgern

### 7.2.1 Allgemeines

Bei den Simulationsrechnungen zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit von Brettschichtholz wurden die Tragfähigkeiten mit Hilfe eines FE-Programms mit Scheibenelementen berechnet (siehe z.B. [11], [22] und [23]). Im Teil B der Arbeit EHLBECK et al. [22] (Münchner Untersuchungen) wurde ein alternatives Rechenverfahren zur Vorhersage der Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern vorgestellt (siehe auch Abschnitt 5). Bei dem Münchner Rechenmodell wird ein Brettschichtholzträger in eine begrenzte Anzahl an elastisch gekoppelten Einzelstäben zerlegt. Überprüft wurde die Qualität dieses Modells durch Tragfähigkeitsberechnungen an ausgewählten Trägern und einem Vergleich mit in Versuchen ermittelten Werten. Die Untersuchungen zeigten, dass die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern auch mit diesem Rechenmodell zuverlässig vorhersagt werden können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird, wie bereits in Abschnitt 5 erwähnt, in Anlehnung an das Münchner Modell, die Tragfähigkeiten von Brettsperrhölzern berechnet. Brettsperrholzträger bestehen in der Regel aus mehreren nebeneinander liegenden Brettern. Die Versuche im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Trägerbreite ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Biegetragfähigkeit von Brettsperrholz darstellt. Da mit zunehmender Anzahl an nebeneinander liegenden Brettern auch die Zahl der zu lösenden Gleichungssysteme zunimmt und damit die Rechenzeit, wurde für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit das modifizierte Münchner Rechenmodell gewählt und nicht die aufwändigere Berechnung mittels Scheibenelementen gewählt.

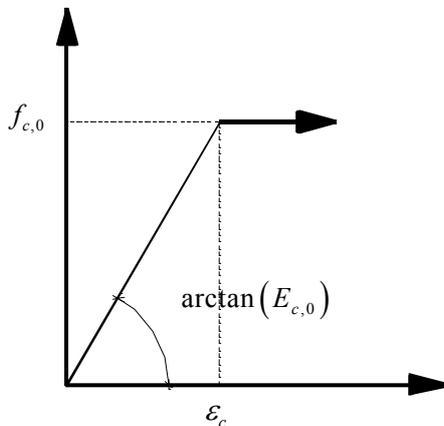
Für die Berechnung der Zustandsgrößen nach dem für diese Arbeit gewähltem Modell bietet sich das für die Berechnung von Stabtragwerken bekannte Verfahren der direkten Steifigkeitsmethode an. Hierzu werden die einzelnen Elementsteifigkeitsmatrizen und Elementlastvektoren benötigt, die dann zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix und dem Gesamtlastvektor zusammengebaut werden. Mit der Gesamtsteifigkeitsmatrix und dem Gesamtlastvektor lassen sich die Verformungen der einzelnen Freiheitsgrade berechnen. Aus diesen Verformungen können dann wiederum die Verformungen und Schnittgrößen der einzelnen Stäbe berechnet werden. Die für dieses Rechenmodell erforderlichen Elementsteifigkeiten wurden im Abschnitt 5.4 hergeleitet.

Wie bereits im Abschnitt 5.1 erwähnt und erläutert sind die Längslagen der Brettsperrhölzer durch die Querlagen miteinander verbunden. Für das mechanische Modell wird näherungsweise davon ausgegangen, dass die jeweils nebeneinander liegenden Elemente dieselben Verformungen haben.

Dies bedeutet, dass beispielsweise die Längsverformungen der 3-ten Lage in der Lamellenschicht 1 gleich den Längsverformungen der 3-ten Lage in der Lamellenschicht 2 sind. Um diese Abhängigkeiten der Verformungen rechnerisch berücksichtigen zu können, werden den jeweils nebeneinander liegenden Knoten dieselben Freiheitsgrade zugewiesen.

## 7.2.2 Nichtlineares Tragverhalten unter Druckbeanspruchung

Zur Berücksichtigung des nichtlinearen Tragverhaltens eines Brettabschnitts unter Druckbeanspruchung wird eine ideal – elastische / ideal – plastische Arbeitslinie (siehe Bild 7-1) verwendet. Hierbei entsprechen  $f_{c,0}$  der Druckfestigkeit,  $\varepsilon_c$  der Bruchstauchung (Dehnung) und  $E_{c,0}$  dem Druck-Elastizitätsmodul einer Zelle parallel zur Faser.



**Bild 7-1** Arbeitslinie einer Zelle unter Druckbeanspruchung

Die Umsetzung des nichtlinearen Tragverhaltens unter Druckbeanspruchung im Rahmen des Rechenprogramms wird nachfolgend beschrieben.

Sind alle erforderlichen Eingangsdaten Träbergeometrie, Auflagerbedingungen, Laststellung sowie die Materialeigenschaften jeder einzelnen Zelle (Steifigkeit und Festigkeit) festgelegt, werden die Spannungen  $\sigma^0$  und Dehnungen  $\varepsilon^0$  jeder Zelle für eine geringe Anfangsbelastung  $P^0$  berechnet. Der Lastfaktor  $k$ , bei dem das erste Element versagt, ergibt sich durch einen Vergleich der Festigkeiten der einzelnen Zellen mit den zugehörigen Spannungen ( $k = f/\sigma^0$ ). Die Belastung  $P^1$ , die Spannungen  $\sigma^1$  sowie Dehnungen  $\varepsilon^1$  die sich für 1. Laststufe ergeben werden mit dem zuvor ermittelten Lastfaktor  $k$  berechnet ( $P^1 = k \cdot P^0$ ,  $\sigma^1 = k \cdot \sigma^0$ ,  $\varepsilon^1 = k \cdot \varepsilon^0$ ).

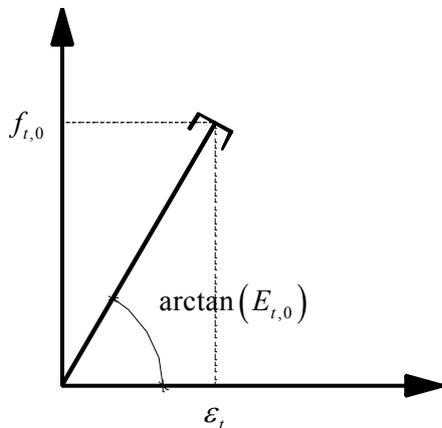
Liegt das ausfallende Element im Druckbereich wird für die weitere Berechnung, d. h. Laststeigerung ein „neuer Träger“ verwendet, bei dem der Elastizitätsmodul des ausgefallenen Elementes zu Null gesetzt wird. Dadurch kann die betroffene Zelle keine weiteren Spannungen aufnehmen; sie wird lediglich weiter gestaucht.

Dieser „neue Träger“ wird jetzt für eine geringe Belastung  $\Delta P$  ( $0,1 \cdot P^0$ ) sowie die daraus resultierenden Spannungen  $\Delta\sigma$  und Dehnungen  $\Delta\varepsilon$  berechnet. Um die weitere Laststeigerung zu berechnen, muss berücksichtigt werden, dass bereits vor der Laststeigerung  $\Delta P$  Spannungen  $\sigma^1$  und Dehnungen  $\varepsilon^1$  in den einzelnen Elementen vorhanden sind. Der Lastfaktor  $k$  bei dem das nächste Element versagt ergibt sich damit wie folgt:  $f = \sigma^1 + k \cdot \Delta\sigma$ . Mit diesem Lastfaktor kann nun die Belastung  $P^2$ , sowie die zugehörigen Spannungen  $\sigma^2$  und Dehnungen  $\varepsilon^2$  der neuen Laststufe berechnet werden ( $P^2 = P^1 + k \cdot \Delta P$ ,  $\sigma^2 = \sigma^1 + k \cdot \Delta\sigma$ ,  $\varepsilon^2 = \varepsilon^1 + k \cdot \Delta\varepsilon$ ).

Handelt es sich bei der ausfallenden Zelle wiederum um ein Druckelement, wird der Druck-Elastizitätsmodul dieser Zelle zu Null gesetzt. Dieser „neue Träger“ wird analog des vorherigen Absatzes erneut berechnet. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis das erste Zugelement versagt. Der nachfolgende Abschnitt erläutert die Berücksichtigung eines ausgefallenen Zugelementes im Rahmen des Rechenprogramms.

### 7.2.3 Ausfall eines Elements im Zugbereich

Zur Berücksichtigung des nichtlinearen Tragverhaltens eines Brettabschnitts unter Zugbeanspruchung wird eine ideal – elastische Arbeitslinie (siehe Bild 7-2) verwendet. Hierbei entsprechen  $f_{t,0}$  der Zugfestigkeit,  $\varepsilon_t$  der Bruchdehnung und  $E_{t,0}$  dem Zug-Elastizitätsmodul einer Zelle parallel zur Faser. Aufgrund der unterschiedlichen Arbeitslinien ist für den Brettsperrholzträger bei Ausfall eines Zugelementes ein anderes Tragverhalten zu erwarten, als dies bei Versagen eines Druckelementes der Fall wäre.



**Bild 7-2** Arbeitslinie einer Zelle unter Zugbeanspruchung

Ein Druckelement kann bei Erreichen der Bruchstauchung  $\varepsilon_c$  weiterhin die Spannung aufnehmen, die der Festigkeit der Zelle entspricht. Die benachbarten Elemente müssen somit nur die Zusatzspannungen aufnehmen, die über der Druckfestigkeit dieses Elementes liegen.

Erreicht hingegen ein Zugelement seine Festigkeit, so kann diese Zelle überhaupt keine Spannung mehr aufnehmen. Die Nachbarelemente müssen somit bereits beim Versagen dieses Elements zusätzlich zu ihren eigenen Spannungen die Spannung des ausgefallenen Zugelementes aufnehmen.

Für das ausgefallene Zugelement wird nun überprüft, ob eines der in Abschnitt 7.2.4 beschriebenen Versagenskriterien erfüllt ist. Wenn dies der Fall ist, kann die Berechnung abgebrochen werden, da die Tragfähigkeit des Brettsperrholzträgers erreicht ist.

Wenn keines der Bruchkriterien erfüllt ist, muss nun noch überprüft werden, ob die Zusatzspannungen infolge des ausgefallenen Zugelementes von den benachbarten Elementen überhaupt aufgenommen werden können. Hierzu müssen die Spannungen für die Laststufe bei der das Zugelement ausgefallen ist neu berechnet werden und zwar unter der Annahme, dass bereits zu Beginn an der Stelle des ausgefallenen Zugelementes eine Fehlstelle (kein Element) vorhanden war. Auf diese Weise erhält man die erhöhten Spannungen in den Nachbarelementen.

Für eine korrekte nichtlineare Berechnung müsste nun jedoch der komplette Versagensablauf der bereits ausgefallenen Druckelemente wiederholt werden. Damit ist jedoch ein erheblicher Rechenaufwand verbunden, der nicht unbedingt erforderlich ist.

COLLING [11] weist in seiner Arbeit darauf hin, dass frühere Simulationsrechnungen zeigten, dass sich der Ausfall einer Zelle im Zugbereich nur unwesentlich auf die Spannungen der Zellen im Druckbereich auswirkt. Aufgrund dieser Feststellung wird deshalb im Rahmen dieses Rechenprogramms auf eine genaue Berechnung verzichtet und die vereinfachende Annahme nach COLLING [11] verwendet. Die Dehnung  $\varepsilon_{c,1}$  in dem bereits ausgefallenen Druckelement, die unmittelbar vor Ausfall des Zugelementes vorhanden ist, ist identisch mit der Dehnung unmittelbar nach Ausfall des Zugelementes. Bei einem nichtlinearen Rechenprogramm erfolgt die Berechnung eines Druckelementes entlang der in Bild 7-3 mit 1 gekennzeichneten Linie. Da das verwendete Rechenprogramm jedoch ein rein lineares Rechenprogramm ist, muss dieser Zustand anders abgebildet werden. Hierzu wird für das bereits ausgefallene Druckelement mit einem Ersatz-Elastizitätsmodul  $E'_{c,0}$  gerechnet, der sich wie folgt ergibt:

$$E'_{c,0} = \frac{f_{c,0}}{\varepsilon_{c,1}}$$

Glg. 7-17

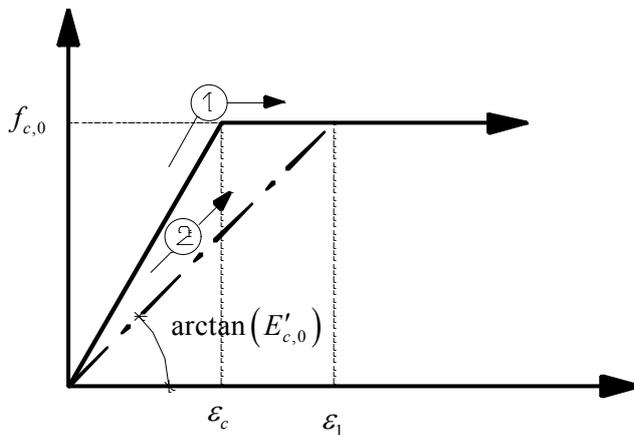
Hierin bedeuten:

$E'_{c,0}$  = Ersatz-Elastizitätsmodul für das bereits ausgefallene Druckelement

$f_{c,0}$  = Druckfestigkeit des Elementes

$\varepsilon_{c,1}$  = Dehnung des bereits ausgefallenen Druckelementes zum Zeitpunkt des Versagens einer Zelle im Zugbereich

Die Berechnungen der Spannungen direkt nach Ausfall eines Zugelementes erfolgt im Rahmen des hier beschriebenen Rechprogramms mit der in Bild 7-3 mit 2 gekennzeichneten Linie.



**Bild 7-3** Berechnung des Ersatz-Elastizitätsmoduls  $E'_{c,0}$  eines bereits ausgefallenen Druckelementes

Zur Abschätzung des Fehlers, der durch diese vereinfachende Annahme getroffen wird, sei auf COLLING [11] hingewiesen.

COLLING [11] hat für mehrere Träger die Unterschiede zwischen der exakter Berechnung und dem „Näherungsverfahren“ ermittelt. Die Vergleichsrechnungen zeigten, dass die Abweichungen im Druckbereich deutlich unter 1% lagen und lediglich im direkten Bereich der Lasteinleitung auf über 2% anstiegen. Anhand dieser Erkenntnis scheint es daher ausreichend die Berechnungen mit dem vereinfachten Verfahren durchzuführen, zumal die Tragfähigkeit eines Brettsperrholzträgers hauptsächlich von den äußeren Lagen im Zugbereich beeinflusst wird, die von dieser Näherung nicht betroffen sind.

Mit diesen Ersatz-Elastizitätsmodulen der bereits ausgefallenen Druckelemente werden nun für den Träger die Spannungen für die Laststufe berechnet, bei der das Zugelement ausgefallen ist. Diese Spannungen werden anschließend mit den zugehörigen Festigkeiten verglichen. Sobald die Festigkeit von einem Element überschritten ist, bedeutet dies, dass bei einer Laststufe zwei Zellen nacheinander ausfallen. Die Tragfähigkeit des Trägers gilt damit als erreicht und die Berechnung wird abgebrochen.

Wenn die Zusatzspannungen infolge des ausgefallenen Zugelementes von den anderen Elementen aufgenommen werden können, ist auch eine weitere Laststeigerung möglich. Die bereits ausgefallenen Druckelemente müssen hierzu jedoch wieder zu Null gesetzt werden, um sicher zu stellen, dass die bereits ausgefallenen Druckelemente bei der weiteren Berechnung auch keine weiteren Spannungen mehr aufnehmen. Die anschließende Berechnung läuft dann wieder wie in Abschnitt 7.2.2 beschrieben ab.

## 7.2.4 Versagenskriterien

Mit dem Rechenmodell werden bei jeder vorgegebenen Laststufe die vorhandenen Zug- bzw. Druckspannungen jeder einzelnen Zelle mit den zugehörigen Festigkeiten verglichen. Ist die Festigkeit in einer dieser Zellen überschritten, fällt das entsprechende Element aus. Anschließend wird von dem

Rechenmodell überprüft ob eine Laststeigerung möglich ist. Siehe hierzu auch den vorherigen Abschnitt.

Bei der Überprüfung einer möglichen Laststeigerung werden lediglich die vorhandenen Normalspannungen überprüft. Eine Kontrolle, ob die vorhanden Schub- bzw. Rollschubspannungen die fest vorgegebenen Schub- bzw. Rollschubfestigkeiten überschreiten wird im Rahmen dieses Rechenmodells nicht berücksichtigt. Zwar gibt es inzwischen Angaben über den Schubmodul GÖRLACHER/KÜRTH [33] und Rollschubmodul GÖRLACHER [31] in Abhängigkeit der Rohdichte, was die zugehörigen Festigkeiten betrifft, so gibt es hierüber noch keine genaueren Angaben. Die DIN EN 1194 [N8] gibt für die Schubfestigkeit parallel zur Faser einen Wert in Abhängigkeit der Zugfestigkeit in Faserrichtung an. SCHICKHOFER [48] zeigt jedoch, dass die Schubfestigkeit parallel zur Faser für höhere Festigkeiten tendenziell etwas niedriger liegt. Somit ist keine zuverlässige Angabe der Schub- bzw. Rollschubfestigkeiten in Abhängigkeit der Holzeigenschaften möglich.

Aufgrund dieser Ausführungen, ist eine Berücksichtigung der Schub- bzw. Rollschubfestigkeit bei der Ermittlung der Tragfähigkeit von Brettsperrhölzern nur schwer möglich, weshalb im Rahmen dieses Rechenmodells deshalb auch darauf verzichtet wird. Durch diese Einschränkung ist es jedoch möglich, dass das Rechenmodell eine weitere Laststeigerung anzeigt, obwohl die Tragfähigkeit z.B. infolge der im Bereich eines ausgefallenen Elementes vorhandenen, hohen Schubspannungen bereits erschöpft sein kann COLLING [11].

Um die Tragfähigkeit von Brettsperrhölzern dennoch zu ermitteln, ist es daher notwendig Kriterien festzulegen, wann die tatsächliche Tragfähigkeit erreicht ist. Die Erkenntnisse der zahlreichen Biegeversuche sowie den in COLLING [11] beschriebenen Versagenskriterien, werden nachfolgend die darauf abgeleiteten Bruchkriterien erläutert, die im Rahmen dieses Rechenmodells zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Brettsperrhölzern verwendet werden.

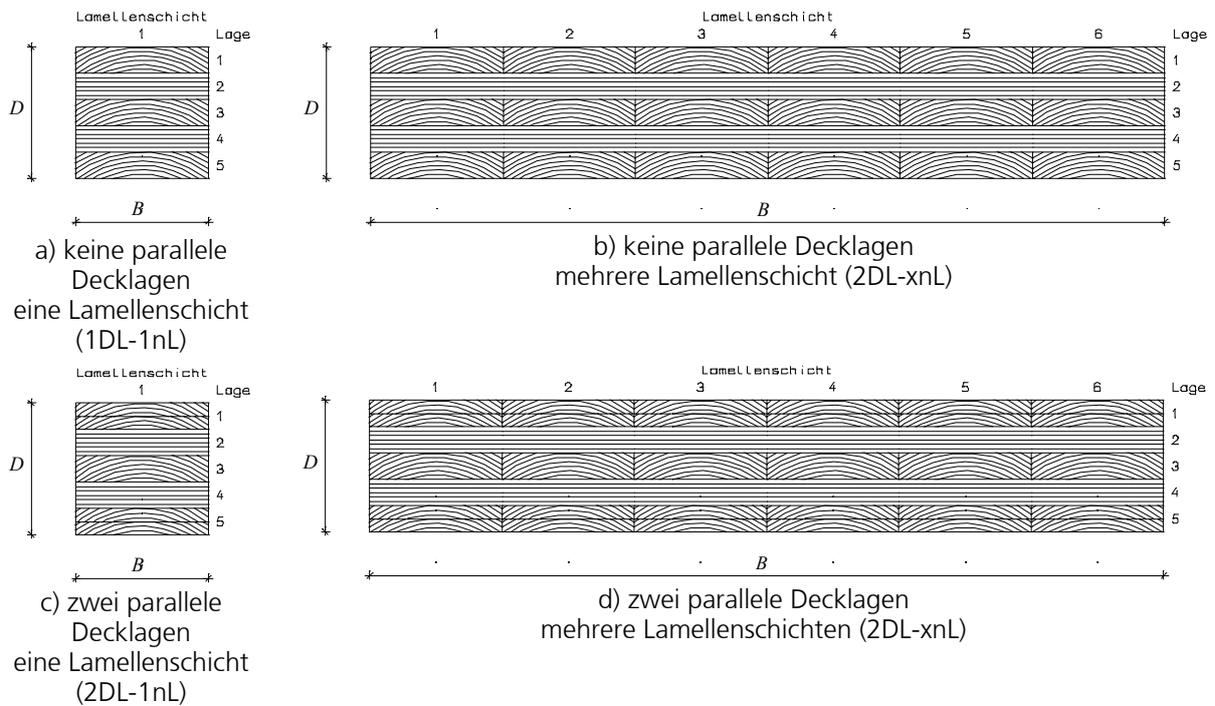
Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von BSP-Trägern werden folgende vier prinzipielle Arten von Querschnitten untersucht:

Querschnitt ohne parallele Decklagen und einer Lamellenschicht (1DL-1nL)  
(keine nebeneinander liegenden Bretter) siehe Bild 7-4a

Querschnitt mit zwei parallelen Decklagen und einer Lamellenschicht (2DL-1nL)  
(keine nebeneinander liegenden Bretter) siehe Bild 7-4b

Querschnitt ohne parallele Decklagen und mehreren Lamellenschichten (1DL-xnL)  
(mehrere nebeneinander liegende Bretter) siehe Bild 7-4c

Querschnitt mit zwei parallelen Decklagen und mehreren Lamellenschichten (2DL-xnL)  
(mehrere nebeneinander liegende Bretter) siehe Bild 7-4d



**Bild 7-4** Exemplarische Querschnittsaufbauten der vier prinzipiellen Arten von BSP-Querschnitten

### Bruchkriterien für den Querschnittstyp 1DL-1nL

#### Bruchkriterium 1

Wenn in der untersten Zuglage ein Holz- oder Keilzinkenelement ausfällt ist die Tragfähigkeit erreicht.

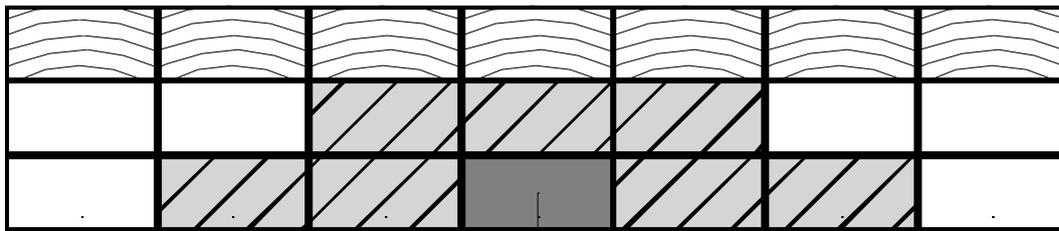
### Bruchkriterien für den Querschnittstyp 2DL-1nL

#### Bruchkriterium 1

Fallen bei der gleichen Laststufe zwei Zellen im Zugbereich nacheinander aus, so ist die Tragfähigkeit erschöpft. In diesem Fall breitet sich der Riss schlagartig aus (Rissfortschritt), was zum totalen Versagen des Trägers führt (siehe hierzu auch Abschnitt 7.2.3) COLLING [11].

#### Bruchkriterium 2

Fällt eine Zelle im Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Elementes aus (schraffierter Bereich in Bild 7-5), so wird die Berechnung abgebrochen. Hierdurch wird berücksichtigt, dass die in diesem Bereich auftretenden hohen Schubspannungsspitzen zu einem Rissfortschritt führen, auch wenn das Rechenmodell aufgrund der vorhandenen Längsspannungen eine weitere Laststeigerung für möglich hält COLLING [11].



Ausgefallenes Element

**Bild 7-5** Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Zügelements für den Querschnittstyp 2DL-1nL

### Bruchkriterien für den Querschnittstyp 1DL-xnL

#### Bruchkriterium 1

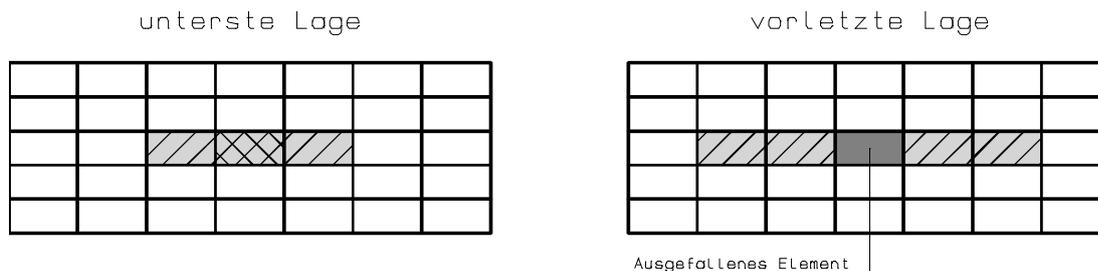
Unabhängig von dem ausfallenden Element (Holz oder Keilzinkung) ist die Tragfähigkeit erreicht, wenn die Anzahl an ausgefallenen Lamellenschichten gleich der Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter ist, wobei mit „Anzahl an ausgefallenen Zugelementen“ die Menge an ausgefallenen Elementen gemeint ist, die in unterschiedlichen Lamellenschichten liegen. Ausgefallene Elemente in derselben Lamellenschicht bleiben hier unberücksichtigt.

### Bruchkriterien für den Querschnittstyp 2DL-xnL

Damit die Bruchkriterien für den Querschnittstyp 2DL-xnL leichter erläutert und verstanden werden können, wird der Begriff „ausgefallene Lamellenschicht“ eingeführt, der wie folgt definiert ist:

*Eine „ausgefallene Lamellenschicht“ liegt vor, wenn in der untersten Lagenschicht ein Keilzinkenzugelement oder im Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Holzzugelementes in derselben Lamellenschicht ein weiteres Zugelement ausfällt.*

Fällt in der Umgebung eines bereits ausgefallenen Zugelementes (schraffierter Bereich in Bild 7-6) ein weiteres Zugelement aus, so gilt die komplette Lamellenschicht als ausgefallen.



**Bild 7-6** Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Zugelementes zur Definition einer „ausgefallenen Lamellenschicht“ (Draufsicht)

#### Bruchkriterium 1

Ist die Anzahl an „ausgefallenen Lamellenschichten“ gleich der Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter ist die Tragfähigkeit erreicht.

## 8 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Versuchswerten

Im Abschnitt 3.5 und 3.6 wurden Biegeversuche an Brettsperrholzträgern ohne und mit Keilzinkenverbindungen durchgeführt. Um die Qualität des Rechenmodells zu überprüfen wurden diese Träger mittels dem zuvor beschriebenen Rechenmodell simuliert. Ein Vergleich der Festigkeiten der Versuchsträger mit diesen simulierten Trägern soll Aufschluss über die Qualität des Rechenmodells geben.

Um die Güte des Rechenmodells noch besser verifizieren zu können, wurde auch auf zusätzliche Biegeversuche an Brettsperrholzträgern zurückgegriffen, die am KKI Augsburg<sup>1</sup> durchgeführt wurden. Für diese Versuchsträger wurden ebenfalls die Tragfähigkeiten simuliert. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen sowie den Versuchen aus Abschnitt 3.5 und 3.6 werden nachfolgend kurz dargestellt.

<sup>1</sup> KKI Augsburg, Abteilung Holzbau, Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Hochschule Augsburg

## 8.1 Vergleich Simulationswerte mit Versuchswerten aus Abschnitt 3.5 und 3.6

### 8.1.1 Träger ohne Keilzinkenverbindungen

Bei den Trägern ohne Keilzinkenverbindungen wurden insgesamt 6 verschiedene Versuchsträger geprüft. Der Aufbau der verschiedenen Versuchsträger ist in der Tabelle 8-1 angegeben. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Versuchsreihen ist im Abschnitt 3.5 bzw. 3.6 zu finden. Die Prüfung dieser Träger erfolgte mittels 4-Punkt-Biegeversuch mit einer Stützweite von  $l_S = 3750$  mm und einem Abstand der Einzellasten von  $l_F = 750$  mm um ein Biegeversagen zu erzwingen.

**Tabelle 8-1 Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus Teil A**

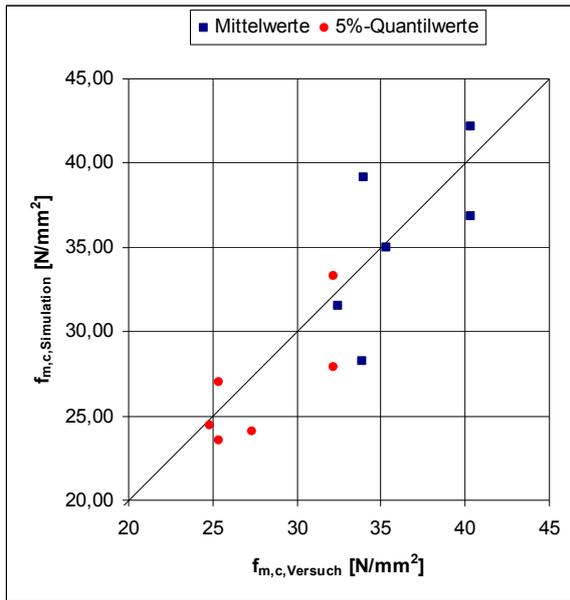
Bezeichnung Prüfsreihe	Bedeutung
1B.B-vo1	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 1 faserparallele Decklage visuell sortierte Bretter der Sortierklasse S10+ (siehe Bild 6.1 oben)
1B.B-mo1	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 1 faserparallele Decklage maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 (siehe Bild 6.1 oben)
1B.B-mo3	3 nebeneinander liegende Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 (siehe Bild 6.2 rechts oben)
1B.B-mo6	6 nebeneinander liegende Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 (siehe Bild 6.2 unten)
1B.B-vo1	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 2 faserparallele Decklagen visuell sortierte Bretter der Sortierklasse S10+ (siehe Bild 6.1 unten)
1B.B-mo1	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 2 faserparallele Decklagen maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 (siehe Bild 6.1 unten)

Für die Simulation der einzelnen Träger für die unterschiedlichen Sortierklassen wurden die Angaben von GÖRLACHER [32] verwendet. In Tabelle 8-2 sind die Kriterien nach denen die Holzeigenschaften der Sortierklassen simuliert wurden angegeben.

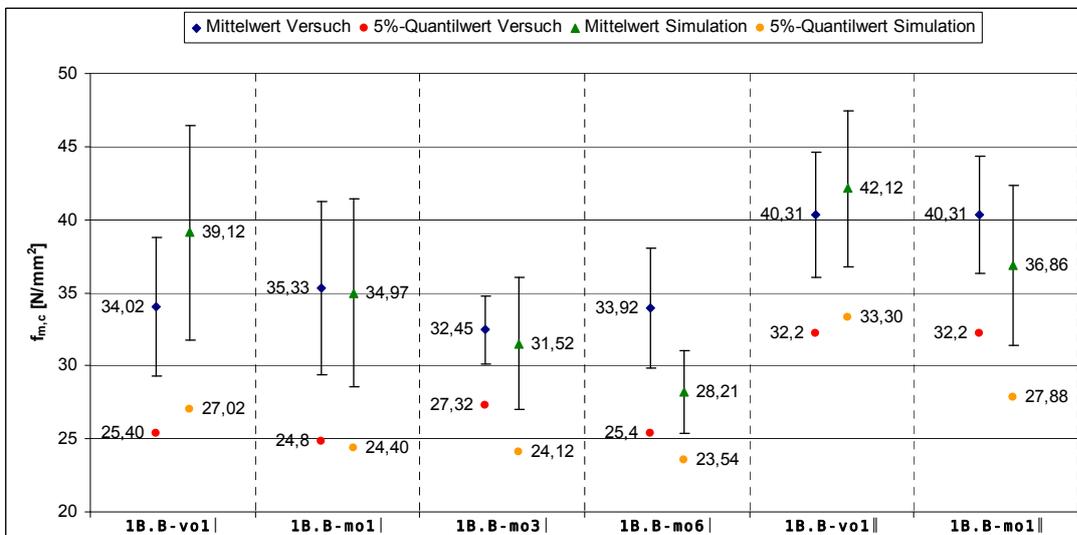
**Tabelle 8-2 Kriterien für die Simulation der verschiedenen Sortierklassen**

Sortierklasse	Kriterium
S10+	$KAR \leq 0,50$
MS10	$9000 \leq E \leq 12500$

Von jedem Träger wurden 200 Simulation durchgeführt und die jeweiligen Tragfähigkeiten ermittelt. Der Vergleich zwischen simulierten Festigkeiten und den in den Versuchen ermittelten Festigkeiten ist in Diagramm 8-1 für die Mittelwerte und 5%-Quantilwerte dargestellt. In Diagramm 8-2 sind zusätzlich die Standardabweichungen dargestellt.



**Diagramm 8-1 Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger ohne Keilzinkungen aus Abschnitt 3.5**



**Diagramm 8-2 Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger ohne Keilzinkungen aus Abschnitt 3.5**

Die maximale Abweichung bei den Mittelwerten und 5%-Quantilwerten beträgt ca. 15%. Für die Simulationen wurden nicht die Rohdichten und Ästigkeiten jedes einzelnen Prüfkörpers berücksichtigt, sondern lediglich die Kriterien für die Sortierklassen aus Tabelle 8-2. Dennoch ist für alle Träger immer noch eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationswerten und Versuchswerten festzustellen.

### 8.1.2 Träger mit Keilzinkenverbindungen

Bei den Trägern mit Keilzinkenverbindungen wurden insgesamt 4 verschiedene Versuchsträger geprüft. Der Aufbau der verschiedenen Versuchsträger ist in der Tabelle 8-3 angegeben. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Versuchsreihen ist im Abschnitt 3.6 zu finden. Die Prüfung dieser Träger erfolgte mittels 3-Punkt-Biegeversuch mit einer Stützweite von  $l_s = 3750$  mm wobei sich die Einzellast ungefähr in der Mitte des Trägers befand, also an der Stelle wo sich die Keilzinkenverbindung befand, um ein Keilzinkenbiegeversagen zu erzwingen.

**Tabelle 8-3 Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus Teil A**

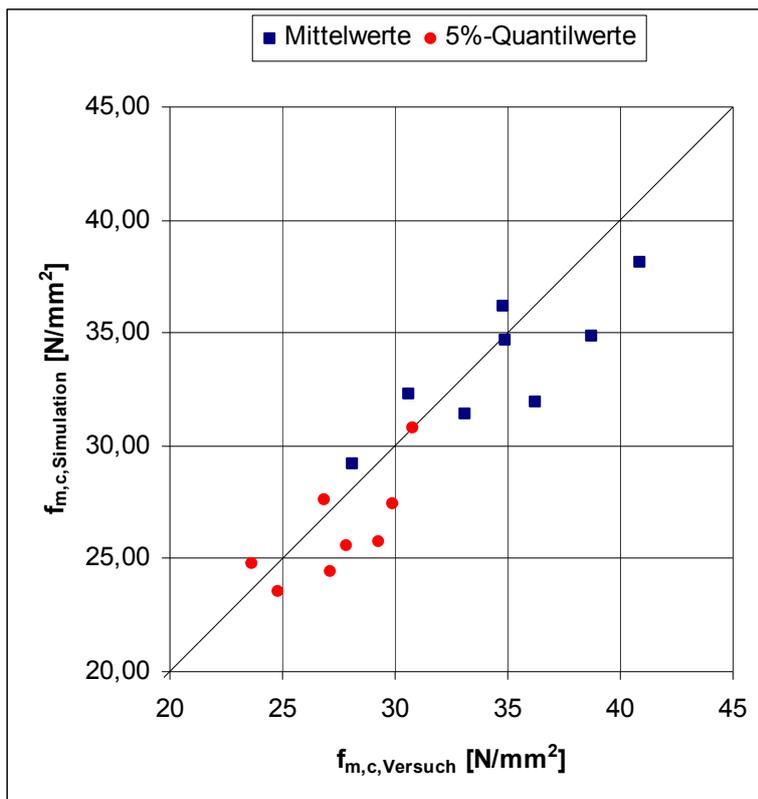
Bezeichnung Prüfserie	Bedeutung
1B.B-m11	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 1 faserparallele Decklage maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 liegende Keilzinkung (siehe Bild 7.1 oben bzw. Bild 7.2 links)
1B.B-m13	3 nebeneinander liegende Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 liegende Keilzinkung (siehe Bild 7.2 rechts)
1B.B-m11	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 2 faserparallele Decklagen maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 liegende Keilzinkung (siehe Bild 7.1 unten)
1B.B-v11	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 2 faserparallele Decklagen visuell sortierte Bretter der Sortierklasse S10+ liegende Keilzinkung (siehe Bild 7.1 unten)
1B.B-ms1	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 1 faserparallele Decklage maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 stehende Keilzinkung (siehe Bild 7.1 oben bzw. Bild 7.2 links)
1B.B-ms3	3 nebeneinander liegende Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 stehende Keilzinkung (siehe Bild 7.2 rechts)
1B.B-ms1	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 2 faserparallele Decklagen maschinell sortierte Bretter der Sortierklasse MS10 stehende Keilzinkung (siehe Bild 7.1 unten)
1B.B-vs1	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 2 faserparallele Decklagen visuell sortierte Bretter der Sortierklasse S10+ stehende Keilzinkung (siehe Bild 7.1 unten)

Die Simulation der Holzeigenschaften für die verschiedenen Sortierklassen erfolgte auf die gleiche Weise, wie bereits im vorherigen Abschnitt für die Träger ohne Keilzinkungen beschrieben. Außer den Holzeigenschaften müssen für diese Träger auch die Eigenschaften der Keilzinkenverbindungen simuliert werden. Die Keilzinkeneigenschaften wurden mittels der Regressionsgleichungen aus Abschnitt 7.1.6.2 und 0 simuliert. Diese Regressionsgleichungen gelten jedoch nur für stehende Keilzinkenverbindungen. Da bei den Versuchen jedoch auch liegende Keilzinkungen verwendet wurden, sind die simulierten Keilzinkenfestigkeiten anzupassen. Hierzu wurde die Festigkeit und Streuung der simulierten Keilzinkenfestigkeiten mittels der Faktoren  $k_F$  (für Variation der Keilzinkenfestigkeit) und  $k_s$  (für Variation der Reststreuung) modifiziert (siehe COLLING [11]). Mittels dieser Modifikationsfaktoren ist es möglich, die Festigkeiten der Keilzinkenverbindung so zu simulieren, dass sie mit den Versuchswerten aus Abschnitt 8.4.2.2 übereinstimmen. Die Faktoren zur Modifizierung der Keilzinkeneigenschaften sowie die daraus resultierende Keilzinkenzugfestigkeit sind in der Tabelle 8-4 angegeben. Zusätzlich sind in dieser Tabelle auch die im Versuch ermittelten Keilzinkenzugfestigkeiten aus Abschnitt 8.4.2.2 angegeben.

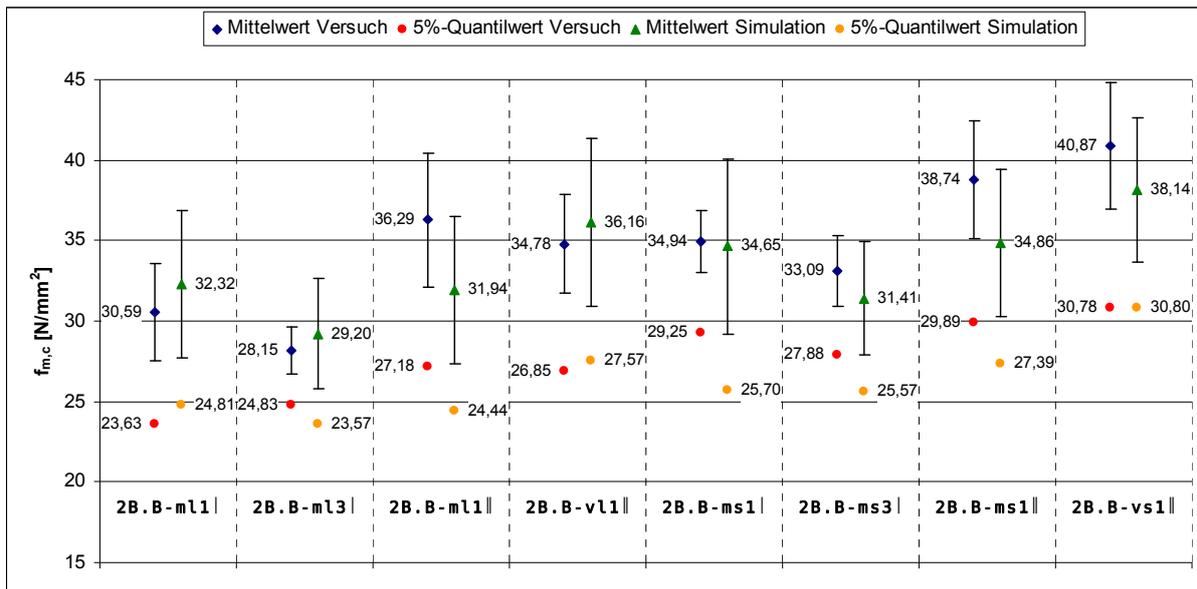
**Tabelle 8-4 Faktoren zur Anpassung der simulierten Keilzinkenfestigkeiten an die mittels Zugversuch ermittelten Keilzinkenfestigkeiten**

Keilzinkung	liegend		stehend	
	Versuch	Simulation	Versuch	Simulation
kF	1,00		1,10	
kS	0,90		0,85	
$x_M$	26,80	26,71	29,00	28,42
$x_{05}$	19,48	19,67	21,96	21,13
V	13,8%	16,0%	12,5%	15,6%

Mit diesen Modifikationswerten wurde ebenfalls 200 Simulationen für jeden Träger durchgeführt. Der Vergleich zwischen simulierten Festigkeiten und den in den Versuchen ermittelten Festigkeiten ist in Diagramm 8-3 für die Mittelwerte und 5%-Quantilwerte dargestellt. In Diagramm 8-4 sind zusätzlich die Standardabweichungen dargestellt.



**Diagramm 8-3 Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger mit Keilzinkungen aus Abschnitt 3.6**



**Diagramm 8-4** Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger mit Keilzinkungen aus Abschnitt 3.6

Aus den obigen Diagrammen ist zu erkennen, dass die simulierte Festigkeiten der Träger mit Keilzinkenverbindungen sehr gut mit den Festigkeiten der Versuchsträger übereinstimmen. Die maximalen Abweichungen liegen bei ca. 12%.

## 8.2 Vergleich Simulationswerte mit Versuchswerten aus [46] und [47]

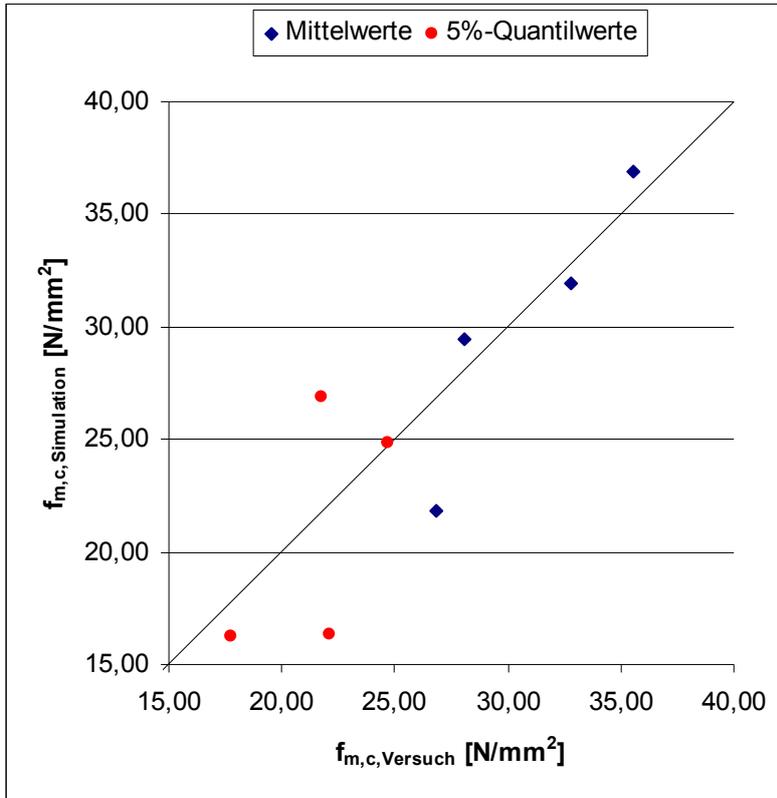
### 8.2.1 Träger ohne Keilzinkenverbindungen

Bei den Trägern ohne Keilzinkenverbindungen wurden insgesamt 4 verschiedene Versuchsträger geprüft. Der Aufbau der verschiedenen Versuchsträger ist in der Tabelle 8-5 angegeben. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Versuchsreihen ist in [46] zu finden. Die Prüfung dieser Träger erfolgte mittels 4-Punkt-Biegeversuch mit einer Stützweite von  $l_S = 3750$  mm und einem Abstand der Einzellasten von  $l_F = 750$  mm.

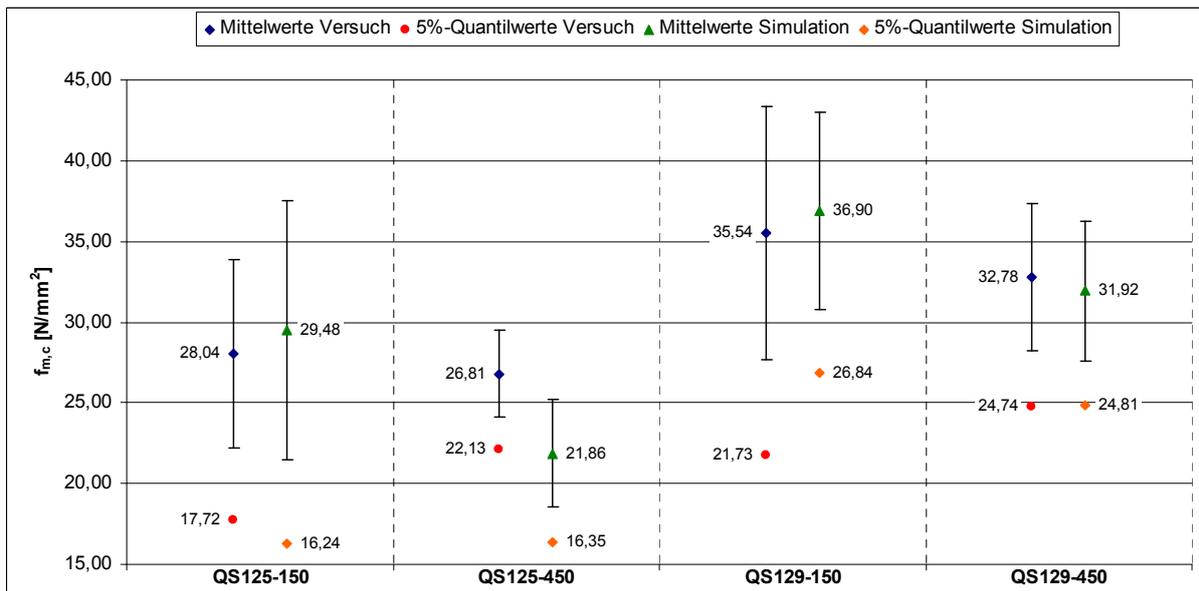
**Tabelle 8-5** Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus [46]

Bezeichnung Prüfsreihe	Bedeutung
QS125-150	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 1 faserparallele Decklage
QS125-450	3 nebeneinander liegende Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage
QS129-150	3 nebeneinander liegenden Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage
QS129-450	3 nebeneinander liegenden Lamellenschichten 2 faserparallele Decklagen

Die Festigkeitsrelevanten Einflussgrößen der äußersten Zuglage dieser Versuchsträger waren in Lage und Größe der Äste sowie die Brettrohdichte bekannt. Diese wurden bei den Simulationen exakt berücksichtigt und so für jeden Prüfkörper 200 Simulationsrechnungen durchgeführt. Der Vergleich zwischen den Versuchswerten und den simulierten Festigkeiten ist Diagramm 8-5 angegeben. Zur Veranschaulichung der Streuung sind in Diagramm 8-6 zusätzlich die Standardabweichungen angegeben.



**Diagramm 8-5 Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger ohne Keilzinkungen aus [46]**



**Diagramm 8-6 Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger ohne Keilzinkungen aus [46]**

Die obigen Diagramme zeigen, dass simulierten Festigkeiten sehr gut mit den Versuchswerten übereinstimmen. Die maximalen Abweichungen liegen unter 10%, lediglich die Versuchsserien QS125-450 und QS129-150 weisen etwas größere Abweichungen auf.

## 8.2.2 Träger mit Keilzinkenverbindungen

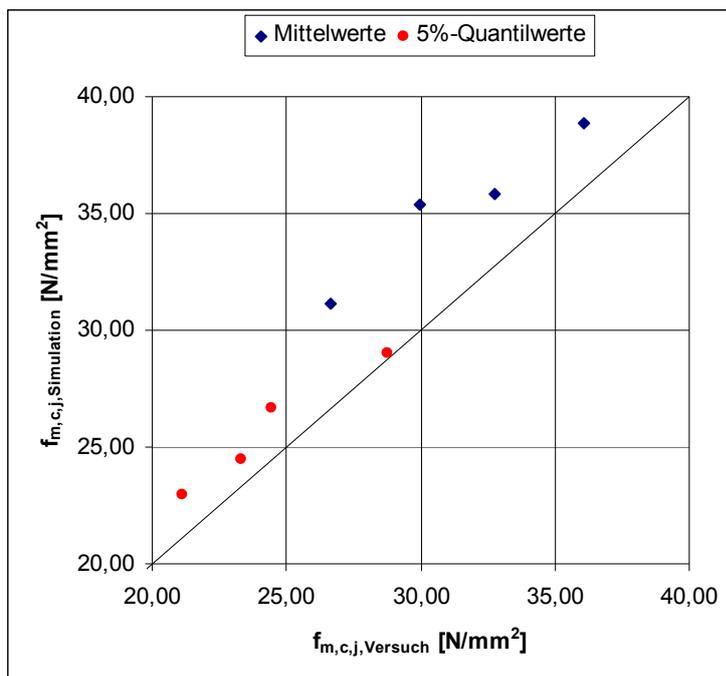
Neben den Versuchen an Trägern ohne Keilzinkenverbindungen aus Abschnitt 8.2.1 wurde auch Träger mit Keilzinkenverbindungen untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in [47] angegeben. Bei der Herstellung Prüfkörper wurde speziell darauf geachtet, dass die Keilzinkenverbindungen innerhalb des Prüfkörpers so angeordnet waren, dass sie im mittleren Drittel des Prüfkörpers sowie unmittelbar neben einem großen Ast der benachbarten Zelle zu liegen kam. Damit sollte der schlechteste Fall simuliert werden.

Bei den Trägern mit Keilzinkenverbindungen wurden insgesamt 4 verschiedene Versuchsträger geprüft. Der Aufbau der verschiedenen Versuchsträger ist in der Tabelle 8-6 angegeben. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Versuchsreihen ist in [47] zu finden. Die Prüfung dieser Träger erfolgte mittels 4-Punkt-Biegeversuch mit einer Stützweite von  $l_S = 3750$  mm und einem Abstand der Einzellasten von  $l_F = 750$  mm. Die Träger hatten alle eine liegende Keilzinkung.

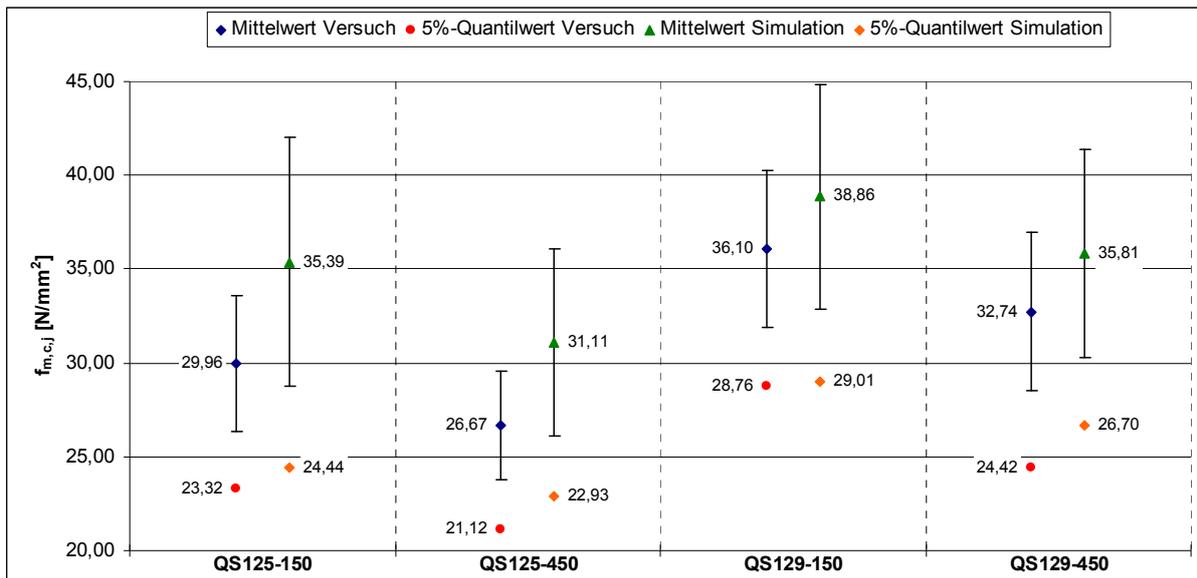
**Tabelle 8-6 Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus [47]**

Bezeichnung Prüferie	Bedeutung
QS125-150	1 nebeneinander liegende Lamellenschicht 1 faserparallele Decklage
QS125-450	3 nebeneinander liegende Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage
QS129-150	3 nebeneinander liegenden Lamellenschichten 1 faserparallele Decklage
QS129-450	3 nebeneinander liegenden Lamellenschichten 2 faserparallele Decklagen

Die Festigkeitsrelevanten Einflussgrößen der äußersten Zuglage dieser Versuchsträger waren in Lage und Größe der Äste sowie die Brettrohdichte bekannt. Darüber hinaus war auch die Lage der Keilzinkungen bekannt. Diese Eigenschaften wurden bei den Simulationen exakt berücksichtigt und so für jeden Prüfkörper 200 Simulationsrechnungen durchgeführt. Der Vergleich zwischen den Versuchswerten und den simulierten Festigkeiten ist Diagramm 8-7 angegeben. Zur Veranschaulichung der Streuung sind in Diagramm 8-8 zusätzlich die Standardabweichungen angegeben.



**Diagramm 8-7 Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger mit Keilzinkungen aus [47]**



**Diagramm 8-8** Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger mit Keilzinkungen aus [47]

Die größte Abweichung zwischen Versuchswerten und simulierten Festigkeiten beträgt ca. 10% für die 5%-Quantilwerte. Bei den Mittelwerten liegt die maximale Abweichung für die Versuchsreihen QS129-150 und QS129-450 bei ca. 9%. Für die beiden anderen Versuchsreihen fallen die simulierten Mittelwerte mit ca. 18% etwas höher aus.

## 8.3 Zusammenfassung

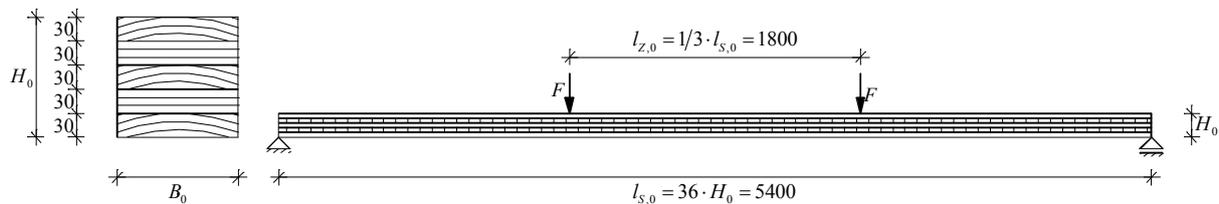
Aus den obigen Vergleichen zwischen den Versuchswerten und den simulierten Festigkeiten zeigt sich, dass es mit dem Rechenmodell möglich ist, das Tragverhalten von Brettsperrholzträgern unterschiedlicher Größe, Aufbau und Eigenschaften hinreichend genau zu beschreiben.

## 9 Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen

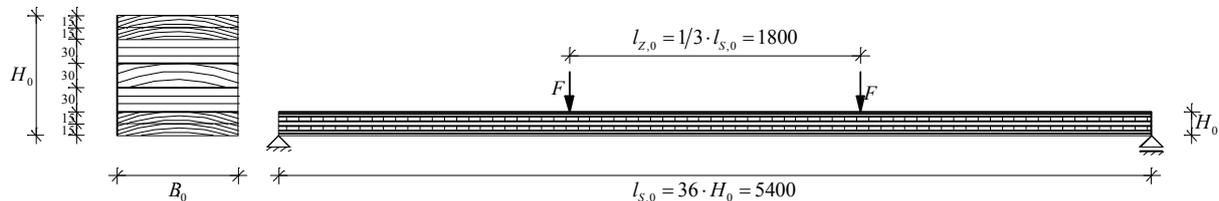
Die Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern hängt von vielen verschiedenen Einflussgrößen ab, die rechnerisch nur sehr schwer zu erfassen sind. Weil die Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit reinem Holzversagen wesentlich enger mit den Holzeigenschaften korreliert ist, als die Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen, ist es nicht möglich die Biegefestigkeit von dem Endprodukt mit einer einzigen allgemeingültigen Beziehungen anzugeben.

Mit der Aufteilung des Endproduktes Brettsperrholz in die beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen und dem in COLLING [11] beschriebenen theoretischen Modell, ist es jedoch möglich die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholz abzuschätzen. Hierzu müssen jedoch die Biegefestigkeiten der beiden voneinander unabhängigen „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen sowie deren Verhältnisse bekannt sein. Diese werden in diesem Abschnitt in Abhängigkeit der jeweils beeinflussenden Größen auf der Grundlage des in Abschnitt 7 beschriebenen Simulationsprogramms ermittelt.

Brettsperrholzträger können in zwei prinzipielle Trägerarten unterteilt werden: Träger mit einer faserparallelen Decklage und Träger mit zwei faserparallelen Decklagen. Für die in diesem Abschnitt vorgestellten Simulationsrechnungen wurden daher zwei unterschiedliche „Standard“-Träger gewählt (siehe Bild 9-1 und Bild 9-2). Die Ergebnisse für die Träger mit anderen Abmessungen oder Belastungen wurden auf die jeweiligen „Standard“-Träger bezogen.



**Bild 9-1** „Standard“-Träger mit einer faserparallelen Decklage (QS1) für die Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen



**Bild 9-2** „Standard“-Träger mit zwei faserparallelen Decklagen (QS2) für die Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen

Zur Simulation der Tragfähigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenverbindungen ist es erforderlich die Keilzinken über die Trägerlänge zu verteilen. Hierzu ist es notwendig die Länge der verwendeten Bretter zu simulieren.

In Abschnitt 7.1.3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass es nicht möglich ist eine repräsentative Verteilung anzugeben, die für alle Hersteller von Brettsperrhölzern gültig ist. COLLING [11] verwendete bei seinen Simulationsrechnungen eine mittlere „Standard“-Brettlänge von  $l_0 = 4,0$  m mit einer Standardabweichung von 0,4 m. Diese Wahl erfolgte mit Blickrichtung auf eine maschinelle Holzsortierung, bei der hauptsächlich ganze Bretter verarbeitet werden COLLING [11]. Bei der Herstellung von Merk-Dickholz<sup>®</sup> werden die Bretter jedoch ausschließlich visuell sortiert. Ferner werden im Rahmen der Sortierung Bereiche mit großen Ästen aus den Brettern herausgeschnitten, um möglichst viel Brettware verwenden zu können. Aufgrund dieser Maßnahme ergibt sich jedoch eine andere mittlere „Standard“-Brettlänge sowie eine andere zugehörige Standardabweichung.

In den Erläuterungen zur DIN 1052, Ausgabe 10.69 gab es noch die Empfehlung, dass die Abstände zwischen den Keilzinkenverbindungen benachbarter Lagen mindestens 300 mm betragen soll. Den Einfluss des gegenseitigen Abstandes von Keilzinkenverbindungen hat COLLING [11] in seiner Arbeit untersucht und festgestellt, dass weniger die Lage der Keilzinkenverbindungen von Bedeutung sind, als vielmehr die Häufigkeit von Keilzinkenverbindungen in den hochbeanspruchten Bereichen. Eine derartige Empfehlung gibt es in der aktuellen Ausgabe der DIN 1052 [N1] nicht mehr.

Aus diesen Gründen wird die Lage der Keilzinkenverbindungen mit den gewählten Brettlängenverteilungen zufällig über die Länge des Trägers verteilt. Damit können alle Möglichkeiten bzgl. der Lage von Ästen und Keilzinkenverbindungen bei den Simulationsrechnungen auftreten.

Um die Tragfähigkeit der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit der festigkeitsrelevanten Einflussgrößen zu ermitteln, wurde für jede Variation (Holzgüte, Trägergröße, Keilzinkenfestigkeit usw.) jeweils 2000 Träger simuliert. Mit den ermittelten Tragfähigkeiten wurde nach Glg. 6-2 die effektiven Biegegrandspannungen zum Zeitpunkt des Versagens ermittelt.

In den Abschnitten 3.5 und 3.6 wurden die 5%-Quantilwerte mittels einer angenommenen Log-Normalverteilung ermittelt. In Abhängigkeit der untersuchten Einflussgrößen ergaben sich jedoch unterschiedliche Verteilungsfunktionen für die Biegefestigkeiten. Daher ist es nicht möglich, die simulierten Biegefestigkeiten mit nur einer Verteilung zutreffend zu beschreiben.

Da es für das theoretische Modell jedoch wichtig ist, die 5%-Quantile der Biegefestigkeiten der beiden „Materialien“ möglichst genau zu bestimmen, wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit der 5%-Quantilwert verteilungsfrei durch abzählen ermittelt. Hierzu werden die 2000 Simulationsergebnisse in aufsteigender Reihenfolge sortiert und der 101. Wert als 5%-Quantilwert gewählt. Mit dieser

Bestimmung des 5%-Quantilwertes ist sichergestellt, dass der Wert genau erfasst wird, der in 5% aller Fälle unterschritten wird, unabhängig von der vorhandenen Verteilungsfunktion ( $100/2000 = 0,05$ ).

Das statistische „Mischverfahren“ benötigt als Eingangswerte die Mittel- und 5%-Quantilwerte der beiden „Materialien“ sowie den Variationskoeffizient des „schwächeren“ Materials. Außerdem geht das theoretische Modell davon aus, dass die Biegefestigkeiten der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen normalverteilt sind. Damit diese Voraussetzung für das theoretische Modell erfüllt ist, wird, wie bereits oben erwähnt, der 5%-Quantilwert und der Mittelwert verteilungsfrei ermittelt. Der angenommene Mittelwert ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel. Durch diese Annahmen wird der Festigkeitsverteilung eine Normalverteilung hineingezwungen, wodurch die Forderung des theoretischen Modells, dass die Festigkeiten der beiden „Materialien“ normalverteilt sein müssen, erfüllt. Der Variationskoeffizient ergibt sich damit gemäß Glg. 10-5 wie folgt:

$$v = \frac{1 - x_{05}/m}{1,645} \quad \text{Glg. 9-1}$$

Weil das in Abschnitt 10 beschriebene theoretische Modell relativ unempfindlich auf fehlerhafte Eingangswerte (siehe COLLING [11]) reagiert, ist der Fehler, der durch die hineingezwungene Normalverteilung entsteht relativ gering, da die 5%-Quantile verteilungsfrei und damit exakt ermittelt wurden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Biegefestigkeiten der beiden „Materialien“ in Abhängigkeit der festigkeitsrelevanten Einflussgrößen getrennt für die beiden Trägerarten (eine oder zwei faserparallele Decklagen) angegeben. Zur Unterscheidung dieser beiden Trägerarten werden in den Abkürzungen folgende hochgestellte Indizes verwendet:  $\perp$  = 1 faserparallele Decklage,  $\parallel$  = 2 faserparallele Decklagen.

## 9.1 Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen („Material“ Holz)

### 9.1.1 Allgemeines

Während bei den Trägern mit Keilzinkenverbindungen (siehe Abschnitt 9.2) die Biegetragfähigkeit in Abhängigkeit der Keilzinkenzugfestigkeit angegeben wurde, wird die Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen im Rahmen dieser Arbeit in Abhängigkeit der Holzeigenschaften Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul der Bretter angegeben. Erläuterungen warum die Tragfähigkeit der Träger mit Holzversagen nicht in Abhängigkeit der Zugfestigkeit der Bretter angegeben wird sind in COLLING [11] angegeben, weshalb hierauf nicht näher eingegangen wird.

Die gewählten Holzeigenschaften Ästigkeit, Darr-Rohdichte und Elastizitätsmodul der Bretter können auch als Kriterium für eine Sortierung der Bretter in verschiedene Sortierklassen verwendet werden.

Für die Bestimmung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der festigkeitsrelevanten Einflussgrößen für Träger mit nur einer faserparallelen Decklage  $\perp$  wurden folgende Beziehungen gewählt:

$$x_{05, \perp, \text{Holz}}^{\perp} = k_{IS, 05, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot k_{D, 05, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot k_{B, 05, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot k_{F, 05, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot x_{05, \perp, \text{Holz}}^{0, \perp} \quad \text{Glg. 9-2}$$

$$x_{m, \perp, \text{Holz}}^{\perp} = k_{IS, m, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot k_{D, m, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot k_{B, m, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot k_{F, m, \perp, \text{Holz}}^{\perp} \cdot x_{m, \perp, \text{Holz}}^{0, \perp} \quad \text{Glg. 9-3}$$

Für den Träger mit zwei faserparallelen Decklagen  $\parallel$  gelten folgende Beziehungen:

$$x_{05, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} = k_{IS, 05, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot k_{D, 05, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot k_{B, 05, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot k_{F, 05, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot x_{05, \parallel, \text{Holz}}^{0, \parallel} \quad \text{Glg. 9-4}$$

$$x_{m, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} = k_{IS, m, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot k_{D, m, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot k_{B, m, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot k_{F, m, \parallel, \text{Holz}}^{\parallel} \cdot x_{m, \parallel, \text{Holz}}^{0, \parallel} \quad \text{Glg. 9-5}$$

Hierin bedeuten:

$x_{05, Holz}^{  bzw.   }$ , $x_{m, Holz}^{  bzw.   }$ =	5%-Quantil- bzw. Mittelwert der Biegefestigkeit der Träger mit Holzversagen mit einer   bzw. zwei    faserparallelen Decklagen
$x_{05, Holz}^{0  bzw.   }$ , $x_{m, Holz}^{0  bzw.   }$ =	5%-Quantil bzw. Mittelwert der Biegefestigkeit des Standardträgers (in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften der Längslagen) mit einer   bzw. zwei    faserparallelen Decklagen
$k_{IS, 05, Holz}^{  bzw.   }$ , $k_{IS, m, Holz}^{  bzw.   }$ =	Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge mit einer   bzw. zwei    faserparallelen Decklagen
$k_{D, 05, Holz}^{  bzw.   }$ , $k_{D, m, Holz}^{  bzw.   }$ =	Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerhöhe mit einer   bzw. zwei    faserparallelen Decklagen
$k_{B, 05, Holz}^{  bzw.   }$ , $k_{B, m, Holz}^{  bzw.   }$ =	Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite mit einer   bzw. zwei    faserparallelen Decklagen
$k_{F, 05, Holz}^{  bzw.   }$ , $k_{F, m, Holz}^{  bzw.   }$ =	Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart mit einer   bzw. zwei    faserparallelen Decklagen

In den nachfolgenden Abschnitten wird die Bestimmung der einzelnen Faktoren  $k_i$  sowie der 5%-Quantilwerte und Mittelwerte der Biegefestigkeiten für die beiden „Standard“-Träger vorgestellt. Aus den jeweiligen Verhältniswerten der einzelnen Simulationsergebnisse wurden die Gleichungen zur Beschreibungen der verschiedenen Einflussfaktoren hergeleitet. Hierzu wurden die Parameter der jeweiligen Funktion bestmöglich an die Einzelwerte angepasst (Minimierung der Fehlerquadrate), wobei für die Parameter einigermaßen runde Werte angenommen wurden. Aufgrund der geringen Empfindlichkeit bezüglich den Eingangswerten bei dem „Mischverfahren“ (siehe Abschnitt 10) erscheint diese Vereinfachung gerechtfertigt.

Bei diesen Simulationsrechnungen wurde von einer mittleren Brettlänge  $l_B = 4,0$  m mit einer Standardabweichung von  $s_x = 0,4$  m ausgegangen. Um ein Keilzinkenversagen auszuschließen, wurde für die Keilzinkenzugfestigkeit die mittlere Zugfestigkeit eines fehlerfreien Brettabschnitts gewählt.

### 9.1.2 Standard-Träger – Einfluss der Holzeigenschaften

In diesem Abschnitt werden die Biegefestigkeiten für die beiden „Standard“-Träger (1 bzw. 2 faserparallele Decklagen) in Abhängigkeit der Holzeigenschaften der Bretter untersucht.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für eine rein visuelle Holzsortierung der Bretter unter Berücksichtigung des größten in einem Brett zulässigen KAR-Wertes sind in der Tabelle 9-1 angegeben.

**Tabelle 9-1 Biegefestigkeit in  $N/mm^2$  von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert der Decklamelle**

Trägertyp		KAR-Wert [—]			
		$0,35 \leq KAR \leq 0,50$	$0,25 \leq KAR \leq 0,35$	$0,15 \leq KAR \leq 0,25$	$KAR \leq 0,15$
	$x_{m, Holz}^0$	30,5	34,7	38,6	41,2
	$x_{05, Holz}^0$	22,7	26,0	29,4	31,5
	$v_{Holz}^0$	15,7	15,2	14,4	14,3
	$x_{m, Holz}^0$	33,0	36,9	40,1	46,9
	$x_{05, Holz}^0$	25,5	29,1	31,9	37,2
	$v_{Holz}^0$	13,8	12,8	12,5	12,6

Aus der obigen Tabelle ist zu erkennen, dass die Biegefestigkeit von Brettsperrholz für beide „Standard“-Träger zunimmt, wenn an die Ästigkeit der Bretter strengere Anforderungen gestellt werden.

In der Tabelle 9-2 sind die Simulationsergebnisse für eine rein maschinelle Holzsortierung nach der Darr-Rohdichte des Brettes angegeben. Für eine rein maschinelle Holzsortierung nach dem Brett-Elastizitätsmodul sind die Ergebnisse in der Tabelle 9-3 aufgeführt. An die Ästigkeit der Bretter wurde bei diesen Berechnungen keine besonderen Anforderungen gestellt ( $KAR \leq 0,50$ ).

**Tabelle 9-2 Biegefestigkeit in  $N/mm^2$  von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit von der Darr-Rohdichte  $\rho_0$  in  $kg/m^3$**

Trägertyp		$\rho_0$ [ $kg/m^3$ ]				
		370 ±15	400 ±15	430 ±15	460 ±15	490 ±15
	$X_{m,Holz}^0$	32,3	34,9	38,2	40,9	44,0
	$X_{05,Holz}^0$	25,1	26,6	29,1	31,7	33,9
	$V_{Holz}^0$	13,6	14,3	14,5	13,7	14,0
	$X_{m,Holz}^0$	36,5	39,5	42,9	46,1	49,7
	$X_{05,Holz}^0$	28,7	30,7	33,4	35,7	38,1
	$V_{Holz}^0$	13,0	13,6	13,4	13,7	14,2

**Tabelle 9-3 Biegefestigkeit in  $N/mm^2$  von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit vom Brett-Elastizitätsmodul  $E$  in  $N/mm^2$**

Trägertyp		$E$ [ $N/mm^2$ ]				
		9000 ±1000	11000 ±1000	13000 ±1000	15000 ±1000	17000 ±1000
	$X_{m,Holz}^0$	27,3	32,6	37,8	43,0	48,0
	$X_{05,Holz}^0$	21,0	25,0	28,9	33,4	38,0
	$V_{Holz}^0$	14,0	14,2	14,2	13,6	12,7
	$X_{m,Holz}^0$	30,5	36,5	42,2	48,3	53,8
	$X_{05,Holz}^0$	23,3	28,2	32,9	37,8	42,4
	$V_{Holz}^0$	14,4	13,9	13,4	13,3	12,9

**Tabelle 9-4 5%-Quantilwerte  $x_{05,Holz}^0$  in  $N/mm^2$  in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und der Darr-Rohdichte  $\rho_0$  in  $kg/m^3$  der Bretter**

Trägertyp		$\rho_0$ [ $kg/m^3$ ]				
		370 ±15	400 ±15	430 ±15	460 ±15	490 ±15
	$KAR \leq 0,15$	27,5	29,9	32,2	35,2	38,1
	$0,15 \leq KAR \leq 0,25$	26,0	28,2	30,3	32,8	35,8
	$0,25 \leq KAR \leq 0,35$	23,5	25,1	27,6	29,8	31,9
	$0,35 \leq KAR \leq 0,50$	19,9	21,2	22,9	24,7	27,3
	$KAR \leq 0,15$	31,9	34,1	37,6	40,5	44,2
	$0,15 \leq KAR \leq 0,25$	29,1	31,9	33,8	36,3	40,1
	$0,25 \leq KAR \leq 0,35$	26,1	28,1	30,1	32,7	35,5
	$0,35 \leq KAR \leq 0,50$	22,2		25,6	27,5	30,3

**Tabelle 9-5 Mittelwerte  $x_{m,Holz}^0$  in N/mm<sup>2</sup> in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und der Darr-Rohdichte  $\rho_0$  in kg/m<sup>3</sup> der Bretter**

Trägertyp		$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]				
		370 ±15	400 ±15	430 ±15	460 ±15	490 ±15
I	KAR ≤ 0,15	34,9	37,8	41,0	44,3	48,3
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	32,8	35,4	38,4	41,5	44,8
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	29,6	31,9	34,9	37,5	40,7
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	25,7	27,9	30,3	32,7	35,3
II	KAR ≤ 0,15	39,6	42,8	46,5	50,3	54,6
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	36,7	39,9	42,9	46,3	50,3
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	33,2	35,7	38,7	41,8	45,4
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	29,2		34,1	36,5	39,9

**Tabelle 9-6 Variationskoeffizienten  $v_{Holz}^0$  in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und der Darr-Rohdichte  $\rho_0$  in kg/m<sup>3</sup> der Bretter**

Trägertyp		$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]				
		370 ±15	400 ±15	430 ±15	460 ±15	490 ±15
I	KAR ≤ 0,15	12,8	12,6	13,1	12,6	12,8
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	12,5	12,4	12,7	12,7	12,3
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	12,7	12,9	12,7	12,6	13,1
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	13,8	14,5	14,8	14,8	13,8
II	KAR ≤ 0,15	11,8	12,4	11,7	11,8	11,6
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	12,6	12,1	12,8	13,1	12,3
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	12,9	13,0	13,5	13,2	13,3
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	14,5		15,2	14,9	14,5

**Tabelle 9-7 5%-Quantilwerte  $x_{05,Holz}^0$  in N/mm<sup>2</sup> in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und dem Elastizitätsmodul  $E$  in N/mm<sup>2</sup> der Bretter**

Trägertyp		$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]			
		9000 ±1000	11000 ±1000	13000 ±1000	15000 ±1000
I	KAR ≤ 0,15	24,7	28,0	31,4	36,3
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	23,3	26,4	30,3	34,4
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	21,3	24,3	28,0	31,6
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	18,4	21,4	24,7	28,0
II	KAR ≤ 0,15	28,0	31,7	36,3	41,4
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	25,9	29,8	34,1	38,1
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	23,3	27,1	31,3	34,9
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	20,3	23,7	27,4	31,8

**Tabelle 9-8 Mittelwerte  $x_{m,Holz}^0$  in N/mm<sup>2</sup> in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und dem Elastizitätsmodul  $E$  in N/mm<sup>2</sup> der Bretter**

Trägertyp		E [N/mm <sup>2</sup> ]			
		9000 ±1000	11000 ±1000	13000 ±1000	15000 ±1000
	KAR ≤ 0,15	30,9	35,2	39,9	45,3
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	29,1	33,4	38,3	43,0
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	26,8	30,9	35,4	40,1
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	23,8	27,8	32,1	36,3
	KAR ≤ 0,15	34,8	39,5	45,0	51,0
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	32,4	37,0	42,7	48,2
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	29,7	34,4	39,6	44,4
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	26,5	31,3	36,0	40,9

**Tabelle 9-9 Variationskoeffizienten  $v_{Holz}^0$  in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und dem Elastizitätsmodul  $E$  in N/mm<sup>2</sup> der Bretter**

Trägertyp		E [N/mm <sup>2</sup> ]			
		9000 ±1000	11000 ±1000	13000 ±1000	15000 ±1000
	KAR ≤ 0,15	12,3	12,4	12,9	12,1
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	12,1	12,7	12,7	12,2
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	12,5	12,9	12,6	12,8
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	13,8	14,0	14,1	14,0
	KAR ≤ 0,15	11,8	12,0	11,7	11,4
	0,15 ≤ KAR ≤ 0,25	12,2	11,8	12,3	12,7
	0,25 ≤ KAR ≤ 0,35	13,1	12,9	12,8	13,0
	0,35 ≤ KAR ≤ 0,50	14,4	14,8	14,5	13,5

**Tabelle 9-10 Biegefestigkeit in N/mm<sup>2</sup> von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit von der Sortierklasse der Decklamelle**

Trägertyp		S 7	S 10	S 13	MS 10	MS 13	MS 17	S7+	S10+
	$x_{m,Holz}^0$	24,9	30,6	38,9	33,2	39,1	46,3	37,4	37,8
	$x_{05,Holz}^0$	18,1	22,5	29,3	25,3	30,3	36,4	26,9	28,8
	$v_{Holz}^0$	16,7	16,2	15,0	14,5	13,7	13,1	17,1	14,5
	$x_{m,Holz}^0$	28,2	33,4	44,0	37,0	43,7	52,0	39,6	40,0
	$x_{05,Holz}^0$	20,6	25,7	34,1	28,5	34,4	41,3	30,7	31,0
	$v_{Holz}^0$	16,4	14,0	13,7	13,9	13,0	12,5	13,7	13,6

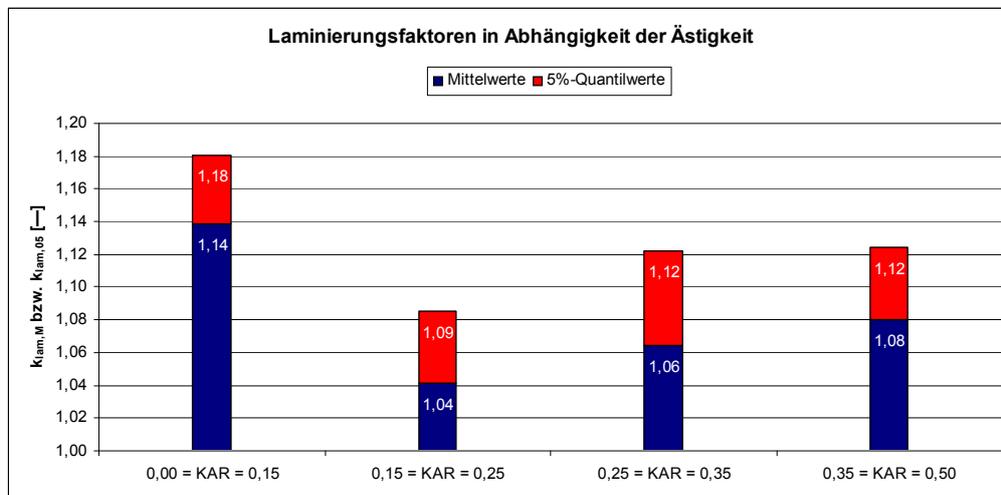
### 9.1.2.1 Laminierungseffekt

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Tragfähigkeiten in Abhängigkeit der Holzeigenschaften wurden, wie bereits erwähnt, sowohl für den Standardträger QS 1 (siehe Bild 9-1) mit nur einer faserparallelen Decklage als auch dem Standardträger QS 2 (siehe Bild 9-2) mit zwei faserparallelen Decklagen ermittelt.

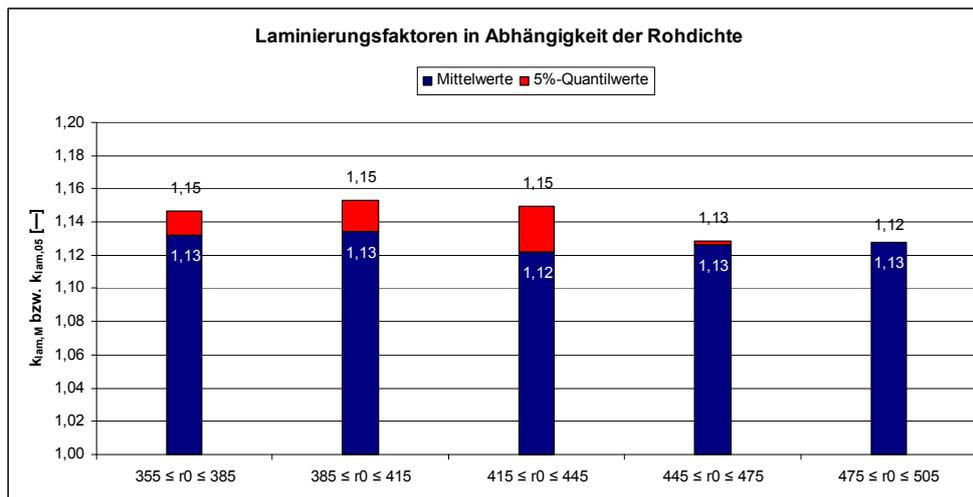
Im Abschnitt 2.3 wurde bereits auf den so genannten „Laminierungseffekt“ eingegangen. Zum besseren Verständnis wird jedoch nachfolgend nochmals kurz erläutert, was darunter zu verstehen ist.

Durch die beiden faserparallelen Decklagen des Querschnitts QS 2 können durch die Verleimung „weichere“ Brettabschnitte, wie z. B. Äste, einen Teil ihrer Last an steifere benachbarte Abschnitte ohne Äste abgeben. Diese Lastverteilung wird als „Laminierungseffekt“ bezeichnet.

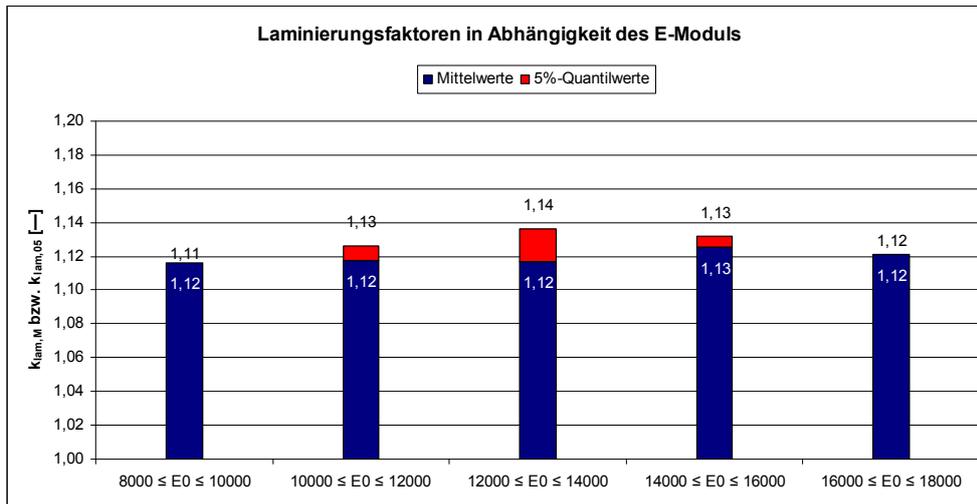
Die Größe dieser Lastverteilung ist in Abhängigkeit der verschiedenen Holzeigenschaften in Diagramm 9-1 dargestellt. Für die Ermittlung werden die Tragfähigkeiten des Querschnitts QS 2 mit denen des Querschnitts QS 1 verglichen. Aufgrund des Querschnittsaufbaus des Querschnitts QS 1 ist keine Lastverteilung möglich und damit auch kein Laminierungseffekt; anders hingegen beim Querschnitt QS 2. Aus diesem Grund wird für den Vergleich der Querschnitt QS 1 als Referenzquerschnitt gewählt, um die Größe dieses Laminierungseffektes zu ermitteln.



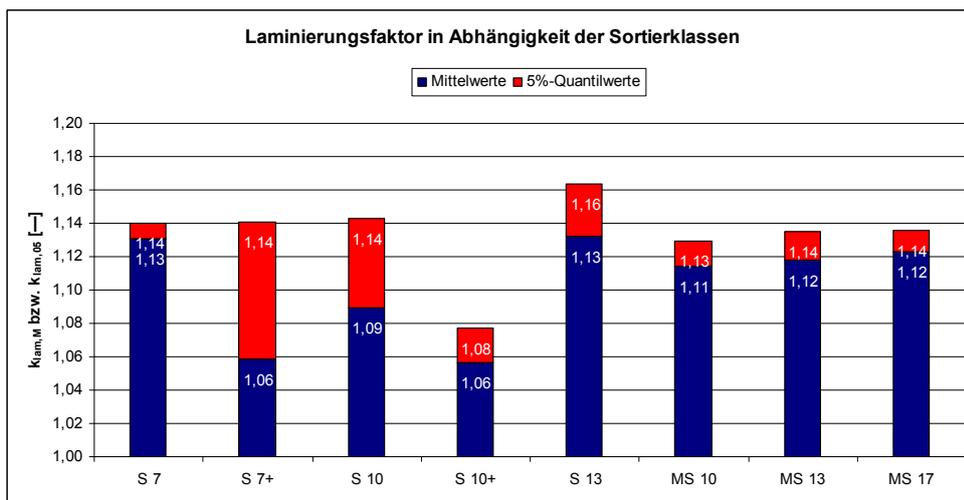
**Diagramm 9-1 Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (Ästigkeit) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen**



**Diagramm 9-2 Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (Rohdichte) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen**



**Diagramm 9-3 Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (E-Modul) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen**



**Diagramm 9-4 Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (Sortierklassen) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen**

Aus den obigen Diagrammen ist zu erkennen, dass der Laminierungsfaktor für den 5%-Quantilwert i. A. über dem des Mittelwerts liegt. Werden an die Holzeigenschaften geringere Anforderungen gestellt, fällt auch der Laminierungseffekt größer aus. Große Differenzen bei unterschiedlichen Holzeigenschaften sind jedoch nicht festzustellen, weshalb für die meisten Sortierkriterien ein einheitlicher Laminierungsfaktor von ca. 4% für den Mittelwert und ca. 8% für den 5%-Quantilwert angenommen werden kann.

### 9.1.3 Einfluss der Trägergröße und der Belastungsart

#### 9.1.3.1 Einfluss der Trägerlänge

Will man die Tragfähigkeit für einen Träger mit einer gegenüber dem Standardträger veränderten Stützweite ermitteln, so ist dies bei der Bestimmung der Tragfähigkeit zu berücksichtigen. Mit zunehmender Trägerlänge nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass in dem hochbeanspruchten Bereich mehr Äste vorhanden sind. Damit ist auch eine höhere Wahrscheinlichkeit gegeben, dass ein größerer Ast in diesem Bereich liegt, der früher zum Versagen des Trägers führt. Mit einer geringeren Stützweite ergibt sich demzufolge auch eine höhere Tragfähigkeit.

Zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge wird in Anlehnung an die Weibull-Verteilung folgende Gleichung gewählt:

$$k_{l_s} = \left( \frac{l_s}{l_{s,0}} \right)^{-\frac{1}{k_{wei}}} \quad \text{Glg. 9-6}$$

Hierin bedeuten:

- $k_{l_s}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge
- $l_s$  = Stützweite des Trägers
- $l_{s,0}$  = Stützweite des Standardträgers ( $l_{s,0} = 36 \cdot h_0 = 36 \cdot 150 = 5400$  mm)
- $k_{wei}$  = eine Kenngröße der Weibull-Verteilung

COLLING [9] zeigt, dass der Faktor  $k_{wei}$  in guter Näherung für ein homogenes isotropes Material mit  $k_{wei} = 1,15/v^1$  angegeben werden kann.

Wie sich bereits bei den von COLLING [11] und den hier vorliegenden Simulationsrechnungen zeigte, ist der Einfluss der Trägerlänge sowohl von der Form der Verteilung als auch dem zugehörigen Variationskoeffizienten abhängig. Deshalb kann der Einfluss der Trägerlänge nicht mit der Gleichung der Weibull-Theorie beschrieben werden.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge, auf die bereits von COLLING [11] vorgestellten Beziehungen zurückgegriffen, die wie folgt lauten:

$$k_{l_s, M, H} = \left( \frac{l_s}{l_{s,0}} \right)^{-\beta_{l_s, M, H}} \quad \text{Glg. 9-7}$$

$$k_{l_s, 05, H} = \left( \frac{l_s}{l_{s,0}} \right)^{-\beta_{l_s, 05, H}} \quad \text{Glg. 9-8}$$

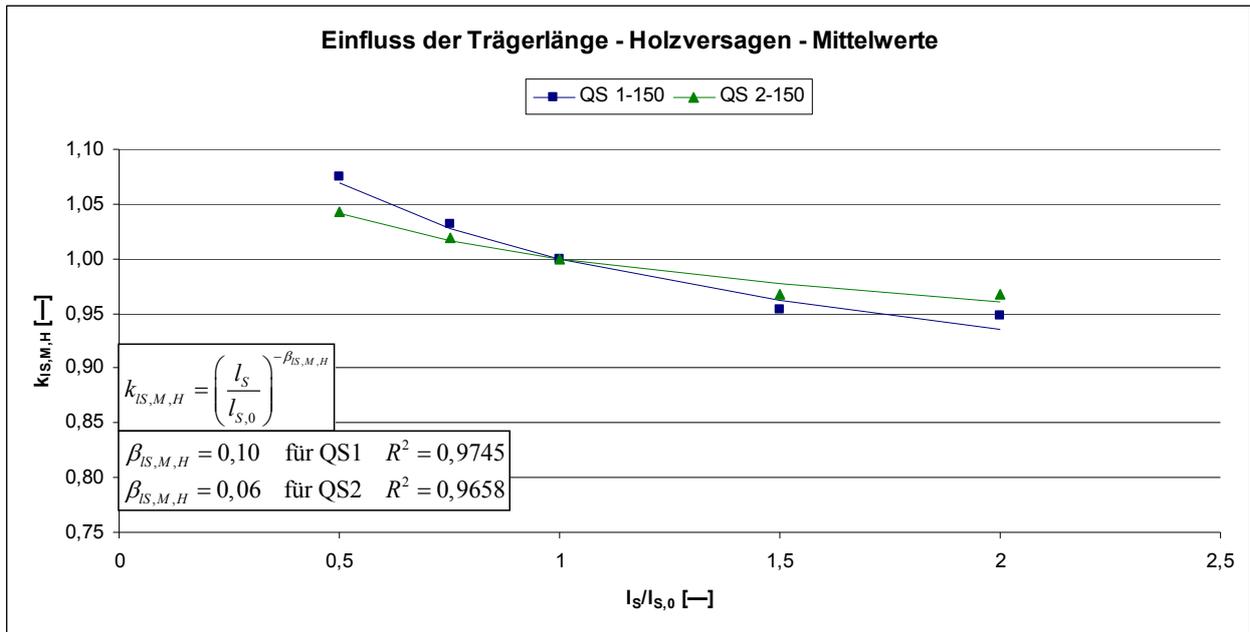
Hierin bedeuten:

- $k_{l_s, M, H}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge (für Mittelwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $k_{l_s, 05, H}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge (für 5%-Quantilwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $\beta_{l_s, M, H}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge (für Mittelwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $\beta_{l_s, 05, H}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge (für 5%-Quantilwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $l_s$  = Stützweite des Trägers
- $l_{s,0}$  = Stützweite des Standardträgers ( $l_{s,0} = 36 \cdot h_0 = 36 \cdot 150 = 5400$  mm)

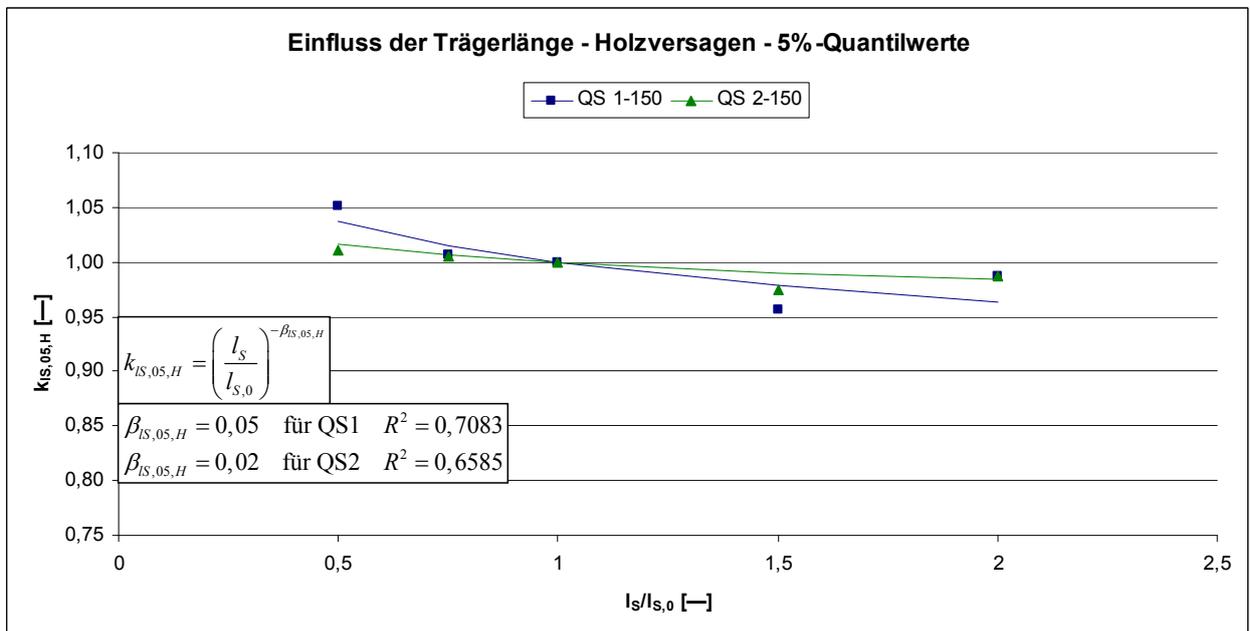
Für die Simulationen dieses Abschnitts wurde lediglich die Stützweite verändert. Die Trägerbreite und Belastungsart des Standardträgers wurden hingegen nicht verändert. Zur Belastungsart sei angemerkt, dass lediglich das Verhältnis von Zylinderabstand  $l_z$  zur Stützweite  $l_s$ , das dem des Standardträgers von 1/3 entspricht, beibehalten wurde. Dies bedeutet beispielsweise, dass bei doppelter Stützweite  $l_s$  sich auch der Zylinderabstand  $l_z$  verdoppelt. Dadurch beträgt das Verhältnis  $l_z/l_s$  immer 1/3.

Der Verlauf der Faktoren  $k_{l_s, M, H}$  und  $k_{l_s, 05, H}$ , die sich bei der Simulation der Träger mit unterschiedlichen Stützweiten ergaben sind für die Mittelwerte im Diagramm 9-5 und für die 5%-Quantilwerte im Diagramm 9-6 dargestellt.

<sup>1</sup>  $v$  entspricht dem Variationskoeffizient der Festigkeitsverteilung des betrachteten Materials



**Diagramm 9-5** Einfluss der Trägerlänge auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen



**Diagramm 9-6** Einfluss der Trägerlänge auf die 5%-Quantilwerte von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen

Die obigen Diagramme zeigen, dass der Einfluss der Trägerlänge unabhängig von den beiden untersuchten Querschnittstypen QS 1 (eine faserparallele Decklage) und QS 2 (zwei faserparallele Decklagen) ist. Für beide Querschnittsaufbauten ergeben sich annähernd die gleichen Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge.

Der Mittelwert der Biegefestigkeit nimmt mit zunehmender Stützweite geringfügig stärker ab als der zugehörige 5%-Quantilwert.

**Anmerkungen zum Laminierungseffekt**

Der Vergleich der Biegefestigkeiten der beiden untersuchten Querschnitte QS 2 und QS 1 zeigt, dass der Querschnitt QS 2 unabhängig von der Trägerlänge stets größere Festigkeiten aufweist als QS 1. Für die Mittelwerte der Biegefestigkeit ergibt sich ein Verhältnisfaktor von ungefähr 1,04. Bei den 5%-Quantilwerten weist der Querschnitt QS 2 circa 8% höhere Festigkeiten auf als der Querschnitt QS

1 (siehe Diagramm 9-7). Diese Faktoren entsprechen denen, wie sie im Abschnitt 9.1.2.1 für die beiden Querschnittstypen ermittelt wurden.

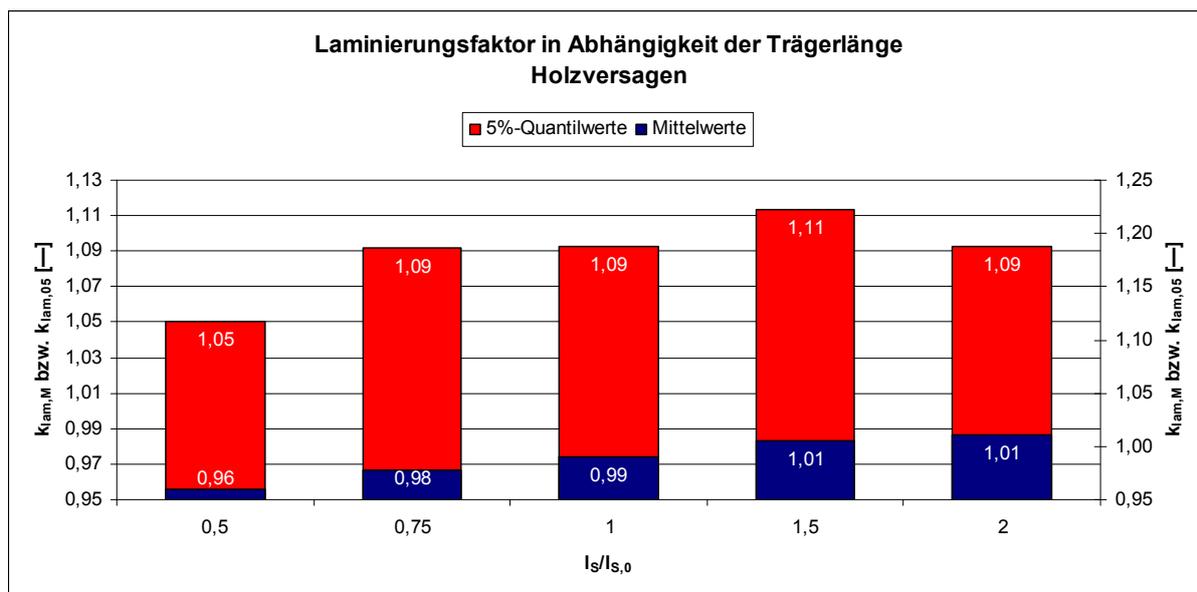


Diagramm 9-7 Laminierungsfaktor in Abhängigkeit der Trägerlänge für Brettsperrholzträger mit Holzversagen

### 9.1.3.2 Einfluss der Trägerbreite

Für Träger mit mehr als einer nebeneinander liegenden Lamellenschicht ergeben sich höhere Tragfähigkeiten als für den Standardträger mit nur einer nebeneinander liegenden Lamellenschicht.

Durch die größere Anzahl an nebeneinander liegenden Brettern, nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass im hochbeanspruchten Bereich ein Brettabschnitt mit einem großen Ast liegt. Aufgrund dieses großen Astes, besitzt dieser Brettabschnitt auch einen i. A. geringeren Elastizitätsmodul und geringere Festigkeit als die umliegenden Brettabschnitte. Die nebeneinander liegenden Bretter wirken dabei als parallel geschaltete Federn, wodurch die umliegenden steiferen Abschnitte einen Teil der Last des schwächeren Abschnitts übernehmen. Wie bei Querschnitten mit zwei übereinander liegenden faserparallelen Lagen, ergeben sich auch für Querschnitte mit mehr als einer nebeneinander liegenden Lamellenschicht höhere Tragfähigkeiten als für die Standardträger mit nur einer Lamellenschicht.

Zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite (Anzahl nebeneinander liegender Bretter) wurden folgende Beziehungen verwendet:

$$k_{B,M,H,i} = \left( \frac{B}{B_0} \right)^{-\beta_{B,M,H,i}} \quad \text{Glg. 9-9}$$

$$k_{B,05,H,i} = m_i \cdot \left( \frac{B}{B_0} \right)^{-\beta_{B,05,H,i}} \quad \text{Glg. 9-10}$$

Hierin bedeuten:

$k_{B,(M/05),H,i}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Trägern mit Holzversagen für die Mittel- und 5%-Quantilwerte

$m_{B,(M/05),H,i}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Trägern mit Holzversagen für die Mittel- und 5%-Quantilwerte

$\beta_{B,(M/05),H,i}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Trägern mit Holzversagen für die Mittel- und 5%-Quantilwerte

$\beta_{B,05,H,i}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Trägern mit Holzversagen für die Mittel- und 5%-Quantilwerte

$B$  = Breite des Trägers (Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter)

$B_0$  = Breite des Standardträgers (Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter des Standardträgers = 1)

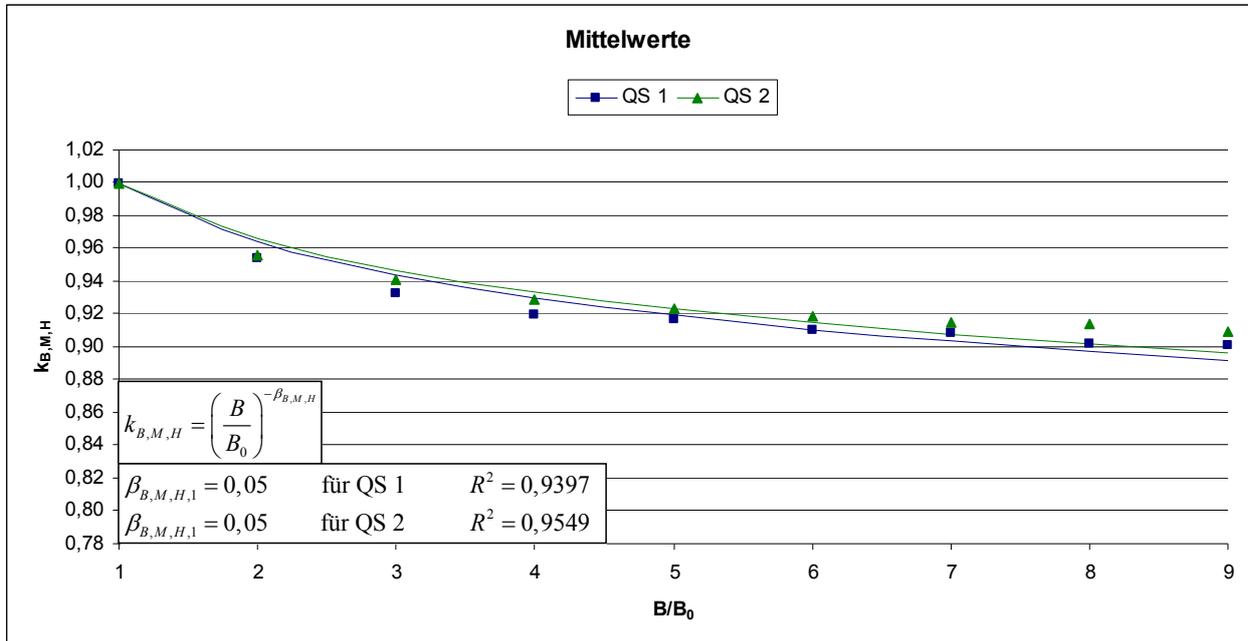


Diagramm 9-8 Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen

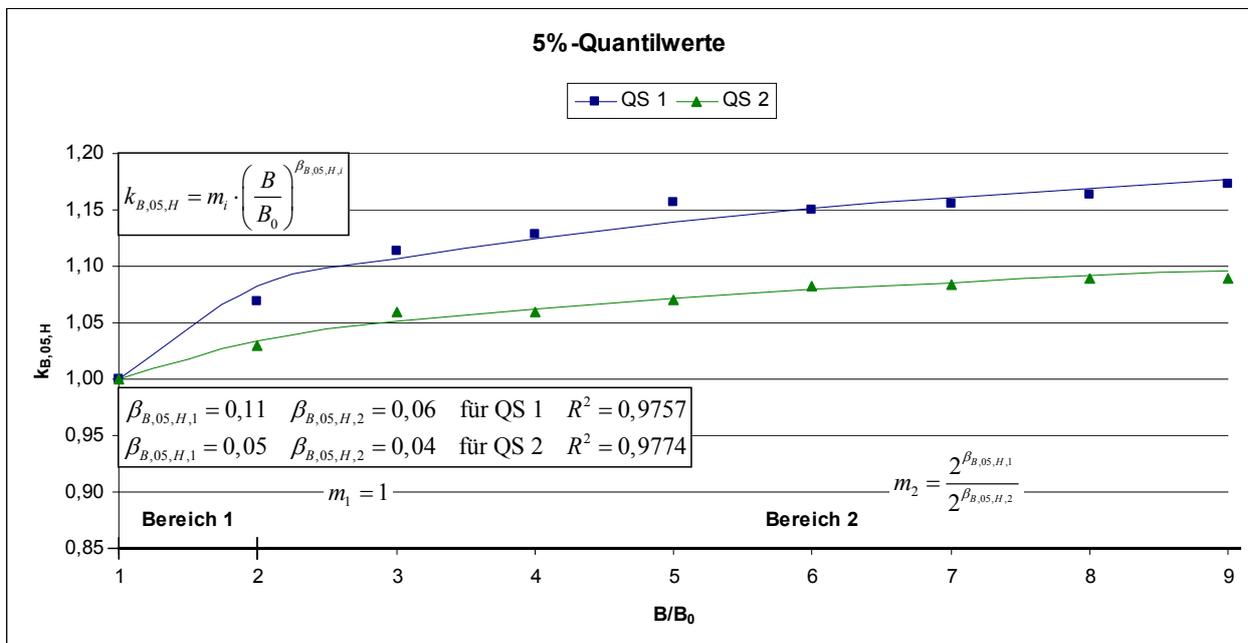


Diagramm 9-9 Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen

Das erste der beiden vorherigen Diagramme zeigt den Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit für Brettsperrholzträger mit Holzversagen, auf das zunächst genauer eingegangen werden soll.

Mit zunehmender Trägerbreite nimmt die mittlere Tragfähigkeit ab. Der Querschnitt mit nur einer faserparallelen Decklage (QS 1) liefert stets kleinere Faktoren als der Querschnitt QS 2. Die Unterschiede fallen jedoch nicht besonders groß aus, so dass näherungsweise für beide Querschnitte der gleiche Verlauf angekommen werden kann. Die Mittlere Bauteilbiegefestigkeit reduziert sich um insgesamt rund 10% bei 9 nebeneinander liegenden Lamellenschichten.

Bei den 5%-Quantilwerten fallen die Faktoren für den Querschnitt mit einer faserparallelen Decklage (QS 1) jeweils deutlich höher aus als für den Querschnitt QS 2 mit zwei faserparallelen Decklagen. Da bei dem Querschnitt mit zwei faserparallelen Decklagen auch der Laminierungseffekt wirksam ist, fällt somit auch die Lastumlagerung infolge mehrerer nebeneinander liegender Lamellenschichten geringer aus. Unabhängig hiervon sich jedoch auch bei diesem Querschnittstyp ein deutlicher Anstieg der Tragfähigkeit mit zunehmender Trägerbreite festzustellen.

### Anmerkungen zum Laminierungseffekt

In Diagramm 9-10 sind für die simulierten Trägerbreiten die Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte und 5%-Quantilwerte dargestellt.

Bei den Laminierungsfaktoren für die mittleren Bauteilbiegefestigkeiten ist kein Unterschied zwischen den beiden Querschnittstypen festzustellen. Sie fallen für alle untersuchten Querschnittsbreiten konstant aus.

Bei den 5%-Quantilwerten hingegen sind deutliche Unterschiede bei den Biegetragfähigkeiten zwischen den beiden Querschnittstypen festzustellen. Am größten fällt der Unterschied bei nur 1 Lamellenschicht aus. Der Laminierungsfaktor nimmt bis zu einer Trägerbreite von 4 nebeneinander liegenden Lamellenschichten ab, ab dann bleibt dieser konstant, fällt mit ca. 3% jedoch nur noch relativ gering aus.

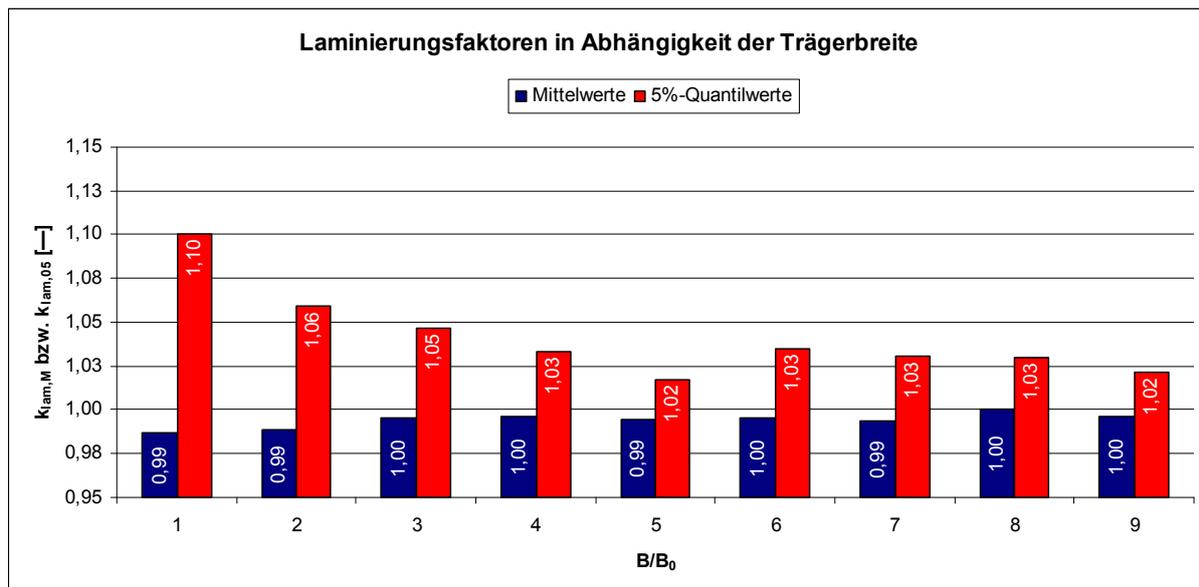


Diagramm 9-10 Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Trägerbreite für Brettsperrholzträger mit Holzversagen

### 9.1.3.3 Einfluss der Belastungslänge

Bei den Simulationen zum Einfluss der Belastungslänge wurde ausschließlich der Abstand der Einzellasten verändert. Die Stützweite wurde unverändert mit  $l_{S,0} = 36 \cdot h_0 = 5400$  mm angenommen. Die Querschnitte hatten für alle Simulationen eine Breite von  $B = 150$  mm, was nur einer nebeneinander liegenden Lamellenschicht entspricht.

Zur Beschreibung des Einflusses der Belastungslänge (Abstand der beiden Einzellasten beim 4-Punkt-Biegeversuch) werden folgende Beziehungen gewählt:

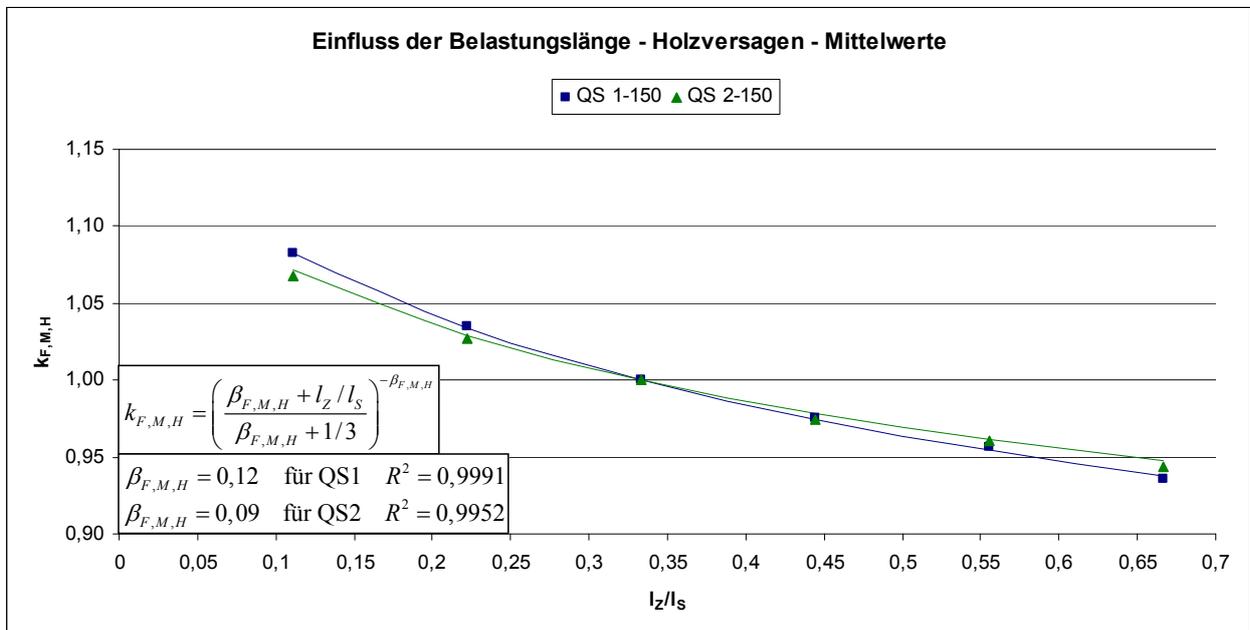
$$k_{F,M,H} = \left( \frac{\beta_{F,M,H} + l_Z/l_S}{\beta_{F,M,H} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,M,H}} \tag{Glg. 9-11}$$

$$k_{F,05,H} = \left( \frac{\beta_{F,05,H} + l_Z/l_S}{\beta_{F,05,H} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,05,H}} \tag{Glg. 9-12}$$

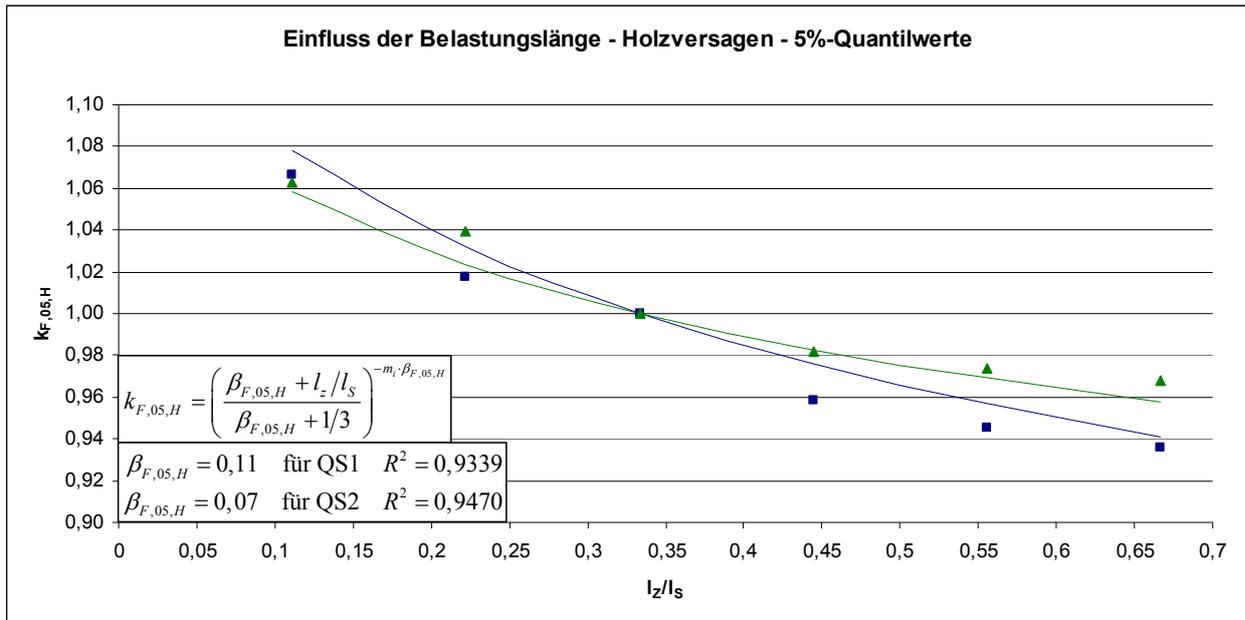
Hierin bedeuten:

- $k_{F,M,H}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Belastungslänge (für Mittelwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $k_{F,05,H}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Belastungslänge (für 5%-Quantilwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $\beta_{F,M,H}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Belastungslänge (für Mittelwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $\beta_{F,05,H}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Belastungslänge (für 5%-Quantilwert der Biegefestigkeit für Träger mit Holzversagen)
- $l_Z$  = Abstand der beiden Einzellasten untereinander
- $l_S$  = Stützweite des Trägers
- $1/3$  = Verhältnis des Lastabstandes  $l_{Z,0}$  zur Stützweite  $l_{S,0}$  des Standardträgers (Belastung in den Drittelpunkten)

Der Verlauf der Faktoren  $k_{F,M,H}$  und  $k_{F,05,H}$  in Abhängigkeit vom Verhältnis  $l_Z/l_S$  ist in Diagramm 9-11 und Diagramm 9-12 dargestellt.



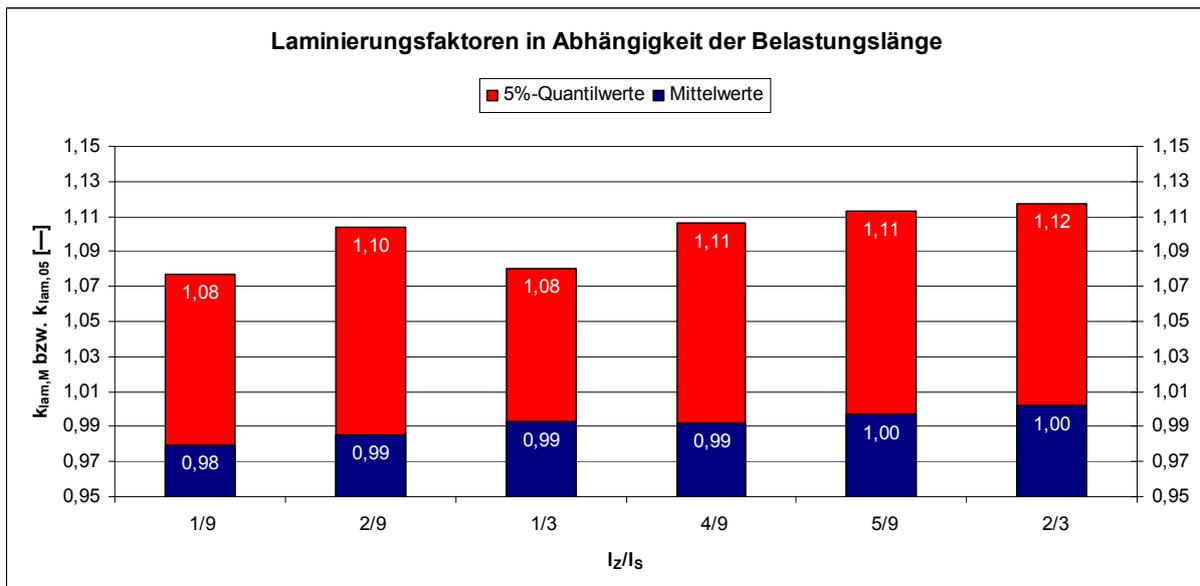
**Diagramm 9-11** Einfluss der Belastungslänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen



**Diagramm 9-12 Einfluss der Belastungslänge auf die 5%-Quantile der Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen**

**Anmerkungen zum Laminierungseffekt**

Der Vergleich der Biegefestigkeiten der beiden untersuchten Querschnitte QS 2 und QS 1 zeigt, dass der Querschnitt QS 2 unabhängig von der Belastungslänge stets größere Festigkeiten aufweist als QS 1. Für die Mittelwerte der Biegefestigkeit ergibt sich ein Verhältnisfaktor von ungefähr 1,04. Bei den 5%-Quantilwerten weist der Querschnitt QS 2 circa 8% höhere Festigkeiten auf als der Querschnitt QS 1 (siehe Diagramm 9-13). Diese Faktoren entsprechen denen, wie sie im Abschnitt 9.1.2.1 für die beiden Querschnittstypen ermittelt wurden.



**Diagramm 9-13 Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Belastungslängen für Brettsperrhölzer mit Holzversagen**

## 9.2 Tragfähigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen

### 9.2.1 Allgemeines

Im Allgemeinen werden Brettsperthölzer mit keilgezinkten Brettern hergestellt, wobei die Güte der verwendeten Keilzinkungen einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit hat. In den folgenden Abschnitten soll der Einfluss der Keilzinkenverbindungen auf die Tragfähigkeit in Abhängigkeit der

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

untersucht werden.

Die Häufigkeit, mit der Keilzinkenverbindungen in Brettspertholzträgern auftreten hängen sowohl von der Trägerlänge wie auch der mittleren Brettlänge ab (siehe hierzu auch COLLING [11]). Eine Verdoppelung der Trägerlänge bedeutet, dass die doppelte Anzahl an Keilzinkenverbindungen in den Trägern vorhanden ist. Umgekehrt gilt aber auch, dass Träger die nur mit halb so langen Brettern hergestellt werden, ebenfalls doppelt so viele Keilzinkungen enthält. Der Einfluss der Auftretenshäufigkeit von Keilzinkenverbindungen wird deshalb im Abschnitt 9.1.3.1 „Einfluss der Trägerlänge“ mit behandelt.

Das Tragverhalten der Standardträger in Abhängigkeit der Keilzinkenzugfestigkeit wird mit folgenden Beziehungen beschrieben:

$$f_{m,c,j,M}^0 = k_1 \cdot \ln(f_{t,0,j,mean}) + k_2 \quad \text{Glg. 9-13}$$

$$f_{m,c,j,05}^0 = k_1 \cdot \ln(f_{t,0,j,mean}) + k_2 \quad \text{Glg. 9-14}$$

$$f_{m,c,j,05}^0 = k_1 \cdot f_{t,0,j,mean} + k_2$$

Hierin bedeuten:

$$f_{m,c,j,M}^0 = \text{Mittelwert der Bauteilbiegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen}$$

$$f_{m,c,j,05}^0 = \text{5\%-Quantilwert der Bauteilbiegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen}$$

$$k_1, k_2 = \text{Faktoren zur Anpassung der Regressionsgleichung}$$

$$f_{t,0,j,mean} = \text{Mittlere Keilzinkenzugfestigkeit}$$

Anmerkung zur Keilzinkenzugfestigkeit:

*„Unter der Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung ist hierbei die Festigkeit zu verstehen, die unter Aufbringung eines ebenen Verformungszustandes ermittelt wurde, weil diese Art der Beanspruchung der eines Brettabschnittes in einem Brettschichtholzträger (Brettspertholzträger a. d. A.) am nächsten kommt.“*  
Zitat aus COLLING [11]

Zur Beschreibung des Tragverhaltens eines Brettspertholzträgers mit beliebiger Trägergröße und Belastungsanordnung wurden folgende Beziehungen gewählt:

$$f_{m,c,j,M} = k_{IS,j,M} \cdot k_{IZ,j,M} \cdot k_{B,j,M} \cdot f_{m,c,j,M}^0 \quad \text{Glg. 9-15}$$

$$f_{m,c,j,05} = k_{IS,j,05} \cdot k_{IZ,j,05} \cdot k_{B,j,05} \cdot f_{m,c,j,05}^0 \quad \text{Glg. 9-16}$$

Hierin bedeuten:

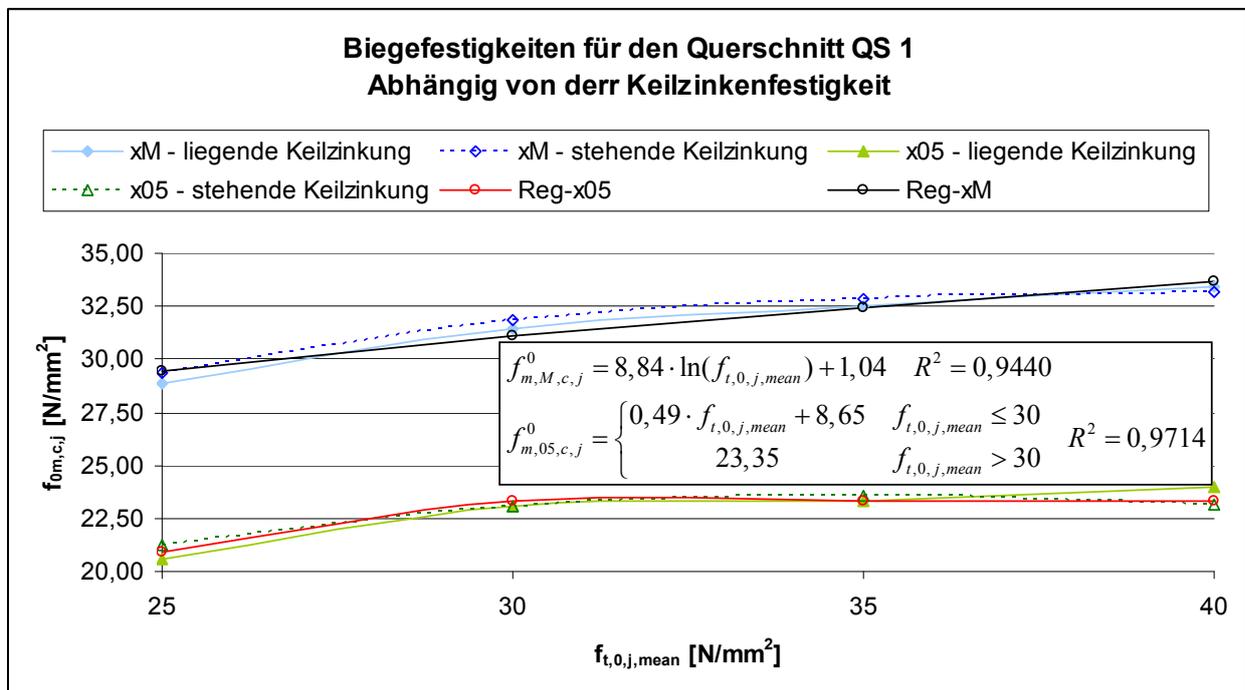
$$f_{m,c,j,M} = \text{Mittelwert der Bauteilbiegefestigkeit eines beliebigen Trägers mit Keilzinkenversagen}$$

- $f_{m,c,j,05}$  = 5%-Quantilwert der Bauteilbiegefestigkeit eines beliebigen Trägers mit Keilzinkenversagen
- $k_{IS,j,M}; k_{IS,j,05}$  = Faktoren (Mittelwert und 5%-Quantilwert) zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge
- $k_{IZ,j,M}; k_{IZ,j,05}$  = Faktoren (Mittelwert und 5%-Quantilwert) zur Beschreibung des Einflusses der Belastungslänge
- $k_{B,j,M}; k_{B,j,05}$  = Faktoren (Mittelwert und 5%-Quantilwert) zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite
- $f_{m,c,j,M}; f_{m,c,j,05}$  = Mittelwert bzw. 5%-Quantilwert der Bauteilbiegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit

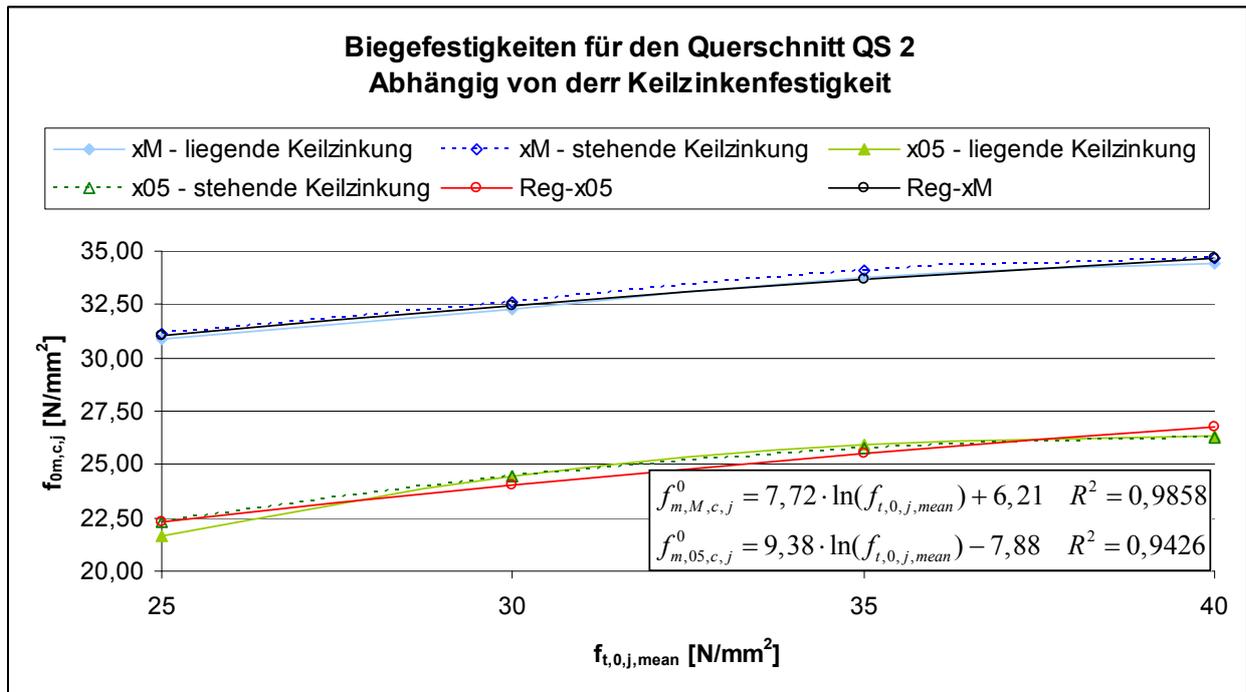
Für die nachfolgenden Berechnungen wurden Bretter der Sortierklasse S10 ( $0,333 \leq KAR \leq 0,50$ ) simuliert. Damit hängt die ermittelte Tragfähigkeit von der definierten Brettqualität und der Keilzinkenfestigkeit ab. Da üblicherweise für Brettspertholz Bretter der Sortierklasse S10 verwendet werden, können damit die ermittelten Festigkeiten auch direkt verwendet werden. Für die Keilzinkenfestigkeiten wurden mit mittleren Zugfestigkeiten von 25, 30, 35 und 40 N/mm<sup>2</sup> gerechnet bei einem Variationskoeffizient von  $v_{t,0,j} = 0,15$ .

### 9.2.2 Einfluss der Keilzinkenzugfestigkeit

Für die beiden Standardträger nach Bild 9-1 und Bild 9-2 werden in diesem Abschnitt die Tragfähigkeiten in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindungen untersucht. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.



**Diagramm 9-14** Biegefestigkeiten für den Querschnitt QS 1 (1 faserparallele Decklage) in Abhängigkeit der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit



**Diagramm 9-15 Biegefestigkeiten für den Querschnitt QS 2 (2 faserparallele Decklagen) in Abhängigkeit der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit**

Anhand der obigen Diagramme ist zu erkennen, dass für beide Querschnitte die Bauteilbiegefestigkeit mit zunehmender Keilzinkenfestigkeit ansteigt und zwar sowohl für die Mittelwerte als auch die 5%-Quantilwerte.

Bei dem Querschnitt QS 1 (1 faserparallele Decklage) ist bei den 5%-Quantilwerten ab einer mittleren Keilzinken zugfestigkeit von  $f_{t,0,j,mean} = 25 \text{ N/mm}^2$  keine Steigerung der Bauteilbiegefestigkeit mehr festzustellen. Für den anderen Querschnitt steigt die Bauteilfestigkeit hingegen für alle untersuchten Keilzinkenfestigkeiten mit zunehmender Keilzinkenqualität an, jedoch wird dieser mit zunehmender Keilzinkenfestigkeit schwächer. Die Tendenz zeigt, dass auch bei einem Querschnitt mit zwei faserparallelen Lagen ab einer gewissen Keilzinkenfestigkeit keine höheren Bauteilbiegefestigkeiten erreicht werden können.

### 9.2.3 Einfluss der Trägerlänge

Bei den nachfolgenden Berechnungen wird von der Trägerlänge und/oder Brettlänge des Standträgers abgewichen. Da bei größeren Trägerlängen und kleineren Brettlängen häufiger Keilzinkenverbindungen in den Hochbeanspruchten Bereichen auftreten ergeben sich somit auch andere Tragfähigkeiten. Somit reduziert sich der Einfluss der Trägerlänge bei Brettsperholzträgern mit Keilzinkenversagen auf die Häufigkeit von Keilzinkenverbindungen.

Zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge wird die von COLLING [11] definierte Kennzahl  $l_S/l_{S,0} \cdot l_B/l_{B,0}$  verwendet.  $l_{S,0}$  und  $l_{B,0}$  entsprechen hierin der Stützweite bzw. mittleren Brettlänge der Standardträger und  $l_S$  und  $l_B$  der Stützweite bzw. mittleren Brettlänge eines beliebigen Trägers.

Bei den Simulationsrechnungen von COLLING [11] zeigte sich, dass sich mit der Häufigkeit, in der Keilzinkenverbindungen in den Trägern vorhanden waren, sowohl die Form der Verteilung als auch der zugehörige Variationskoeffizient veränderlich waren. Somit konnte zur Beschreibung des Längeneffektes die Beziehung nach der Weibull Theorie nicht verwendet werden. Da bei den vorliegenden Simulationen höchst wahrscheinlich die gleichen Effekte vorhanden sind, wird auf die Beziehung, wie sie Colling in seiner Arbeit verwendet hat, zurückgegriffen. Die von ihm ermittelten Ergebnisse zeigten, dass für die Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge die von ihm gewählte Gleichung als geeignet erwies. Aufgrund dieser Erkenntnis, wird daher auch in der vorliegenden Arbeit auf diese Funktion zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge zurückgegriffen. Die Gleichungen zur Beschreibungen des Längeneffektes sind damit wie folgt definiert:

$$k_{l_{S,m,j,c}} = \left( \frac{l}{l_{S,0}} \cdot \frac{l_{B,0}}{l_B} \right)^{-\beta_{l_{S,m,j,c}}} \quad \text{Glg. 9-17}$$

$$k_{l_{S,05,j,c}} = \left( \frac{l}{l_{S,0}} \cdot \frac{l_{B,0}}{l_B} \right)^{-\beta_{l_{S,05,j,c}}} \quad \text{Glg. 9-18}$$

Hierin bedeuten:

- $k_{l_{S,m,j,c}}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge auf die mittlere Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen
- $k_{l_{S,05,j,c}}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart auf den 5%-Quantilwert der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen
- $\beta_{l_{S,m,j,c}}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses für die Mittelwerte
- $\beta_{l_{S,05,j,c}}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses für die 5%-Quantilwerte
- $l_S$  = Beliebige Stützweite
- $l_{S,0}$  = Stützweite des Standardträgers  $l_{S,0} = 5,40 \text{ m}$
- $l_B$  = Brettlänge für einen beliebigen Träger
- $l_{B,0}$  = Brettlänge für den Standardträger  $l_{B,0} = 4,0 \text{ m}$

Über die Exponenten  $\beta_{l_{S,m,j,c}}$  bzw.  $\beta_{l_{S,05,j,c}}$  gehen die Variationskoeffizienten der Keilzinkenverbindungen in die Gleichungen ein. Somit hängen die Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge von der Qualität der Keilzinkenverbindungen ab.

Bei allen Simulationen in diesem Abschnitt wurden nur die Trägerlängen bzw. Brettlängen variiert. Die Belastungsart sowie die Trägerbreite des Standardträgers wurden unverändert beibehalten.

Für die verschiedenen Variationskoeffizienten  $v_{t,0,j}$  der Keilzinkenverbindungen sind die Verläufe der Faktoren für die Mittelwerte  $k_{l_{S,m,j,c}}$  der beiden Querschnittstypen QS 1<sup>1</sup> und QS 2<sup>2</sup> in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

---

<sup>1</sup> QS 1: eine faserparallele Decklage

<sup>2</sup> QS 2: zwei faserparallele Decklagen

9.2.3.1 Querschnitt QS 1 – 1 faserparallele Decklage

Die nachfolgenden Diagramme zeigen den Verlauf der Faktoren für die Mittelwerte  $k_{IS,m,j,c}$  und 5%-Quantilwerte  $k_{IS,05,j,c}$  für die verschiedenen mittleren Keilzinkenzugfestigkeiten  $f_{t,0,j,mean}$  für den Querschnittstyp QS 1 (eine faserparallele Decklage).

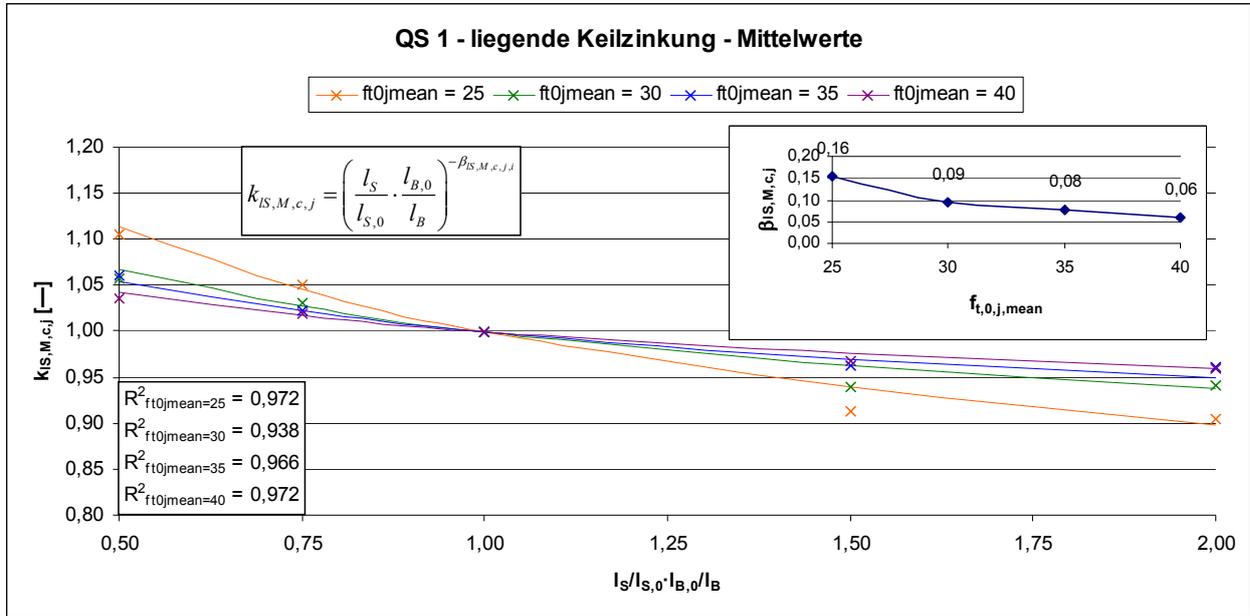


Diagramm 9-16 Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

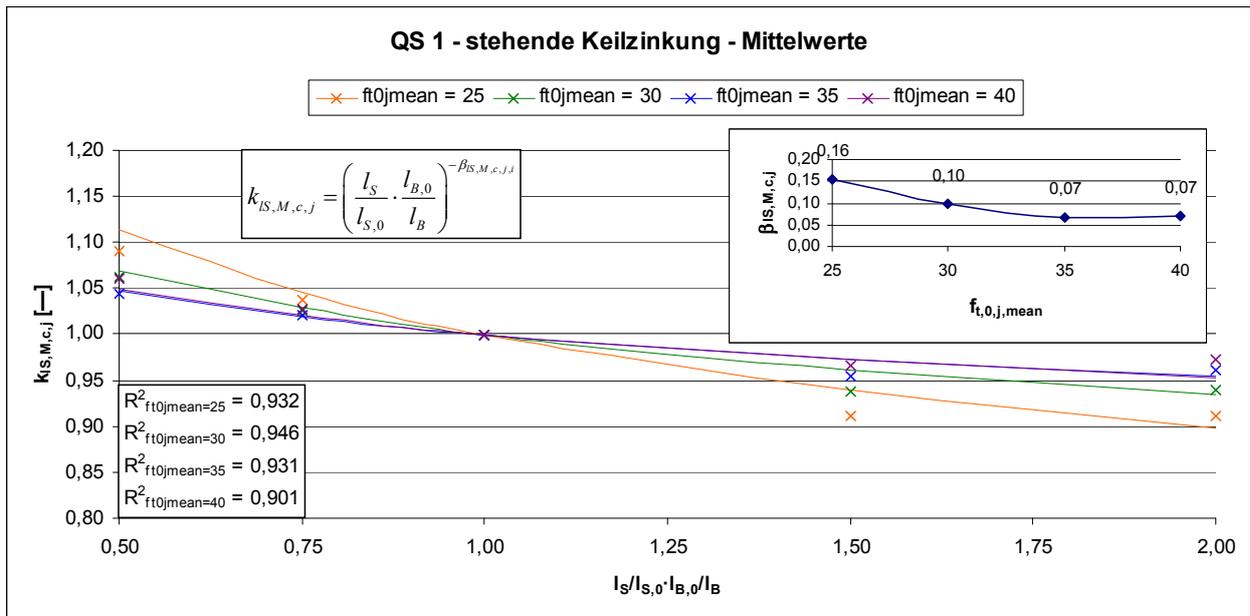
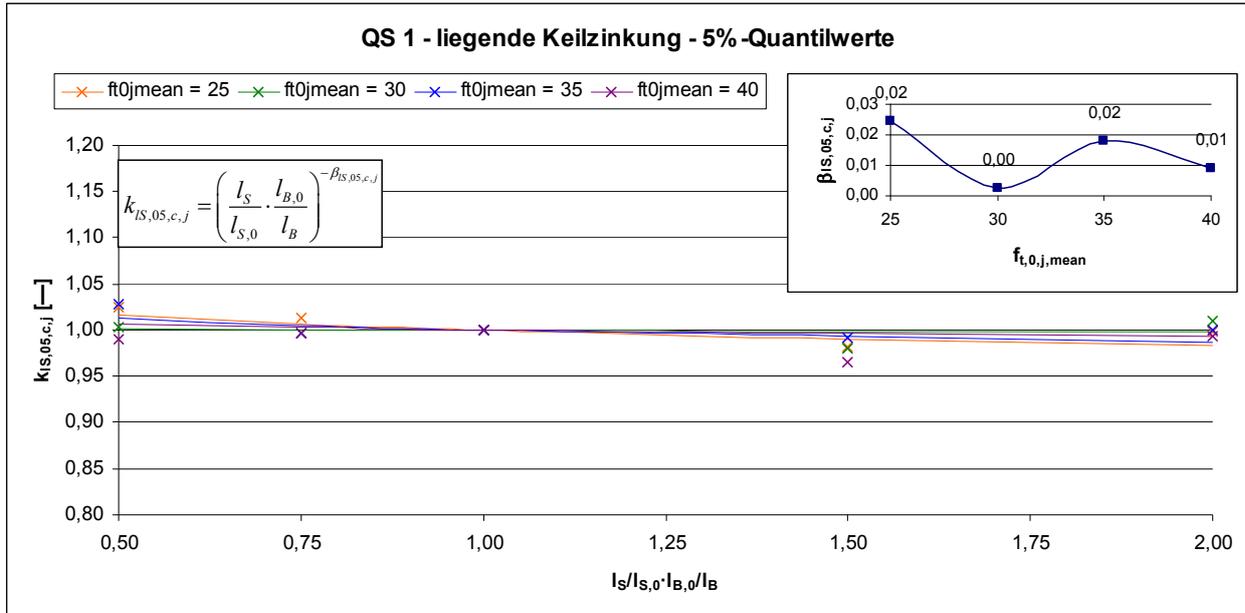


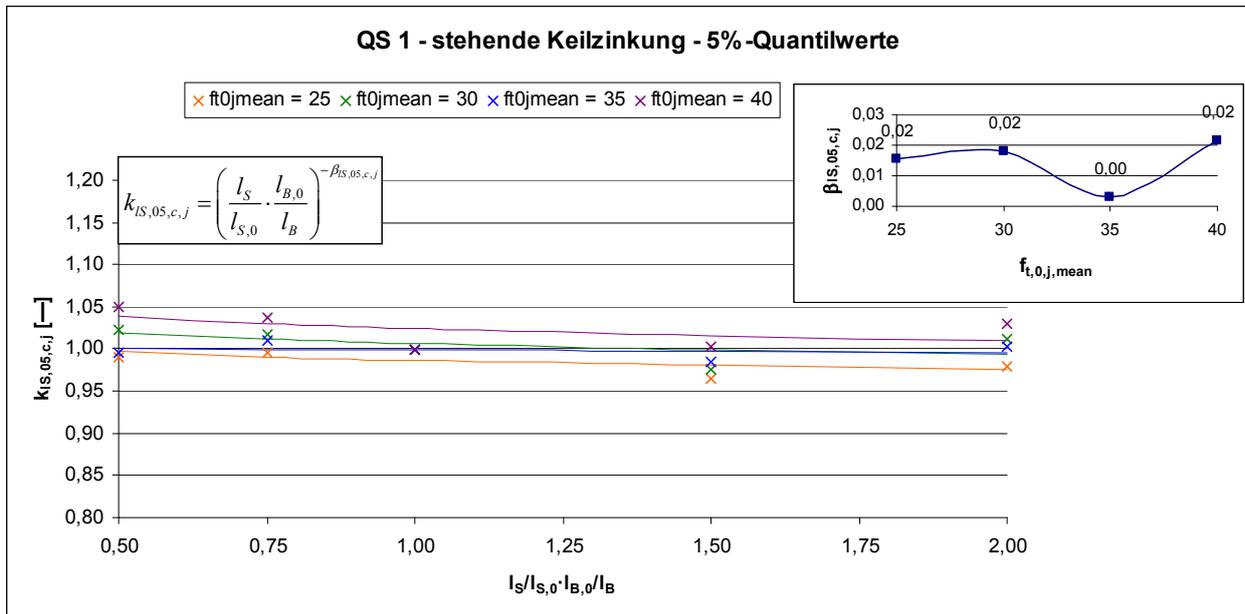
Diagramm 9-17 Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

Anhand der obigen Diagramme ist zu erkennen, dass die Festigkeit in dem Bereich  $(l_S/l_{S,0} \cdot l_{B,0}/l_B) < 1$  ansteigt und in dem Bereich  $(l_S/l_{S,0} \cdot l_{B,0}/l_B) > 1$  abnimmt. Am größten fällt der Einfluss der Trägerlänge für die mittlere Keilzinkenzugfestigkeit von  $f_{t,0,j,mean} = 25 \text{ N/mm}^2$  aus. Sowohl für die liegende Keilzinkung als auch die stehende Keilzinkung ergeben sich annähernd die gleichen Änderungen der Trägerfestigkeiten in Abhängigkeit der Trägerlänge.

Bei den 5%-Quantilwerten hingegen lässt sich kein nennenswerter Einfluss der Trägerlänge auf die Biegetragfähigkeit der Träger feststellen. Dies gilt für alle untersuchten mittleren Keilzinkenzugfestigkeiten. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.



**Diagramm 9-18** Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)



**Diagramm 9-19** Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

Die Ergebnisse für den Querschnitt QS 2 – 2 faserparallele Decklagen werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

9.2.3.2 Querschnitt QS 2 – 2 faserparallele Decklagen

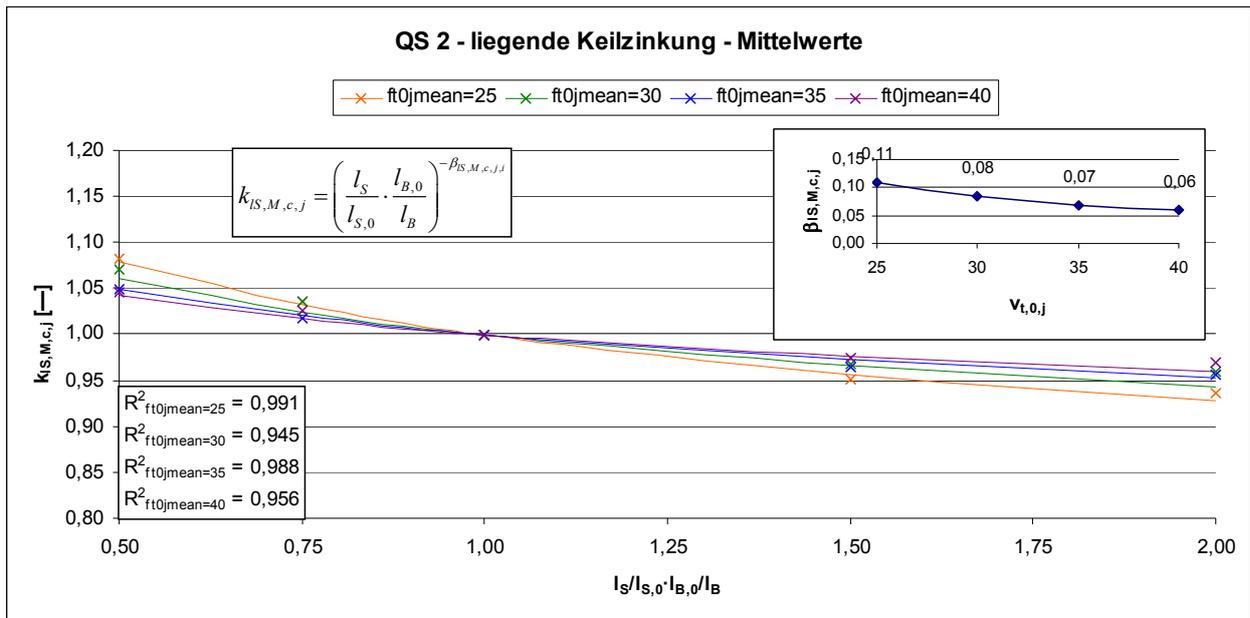


Diagramm 9-20 Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)

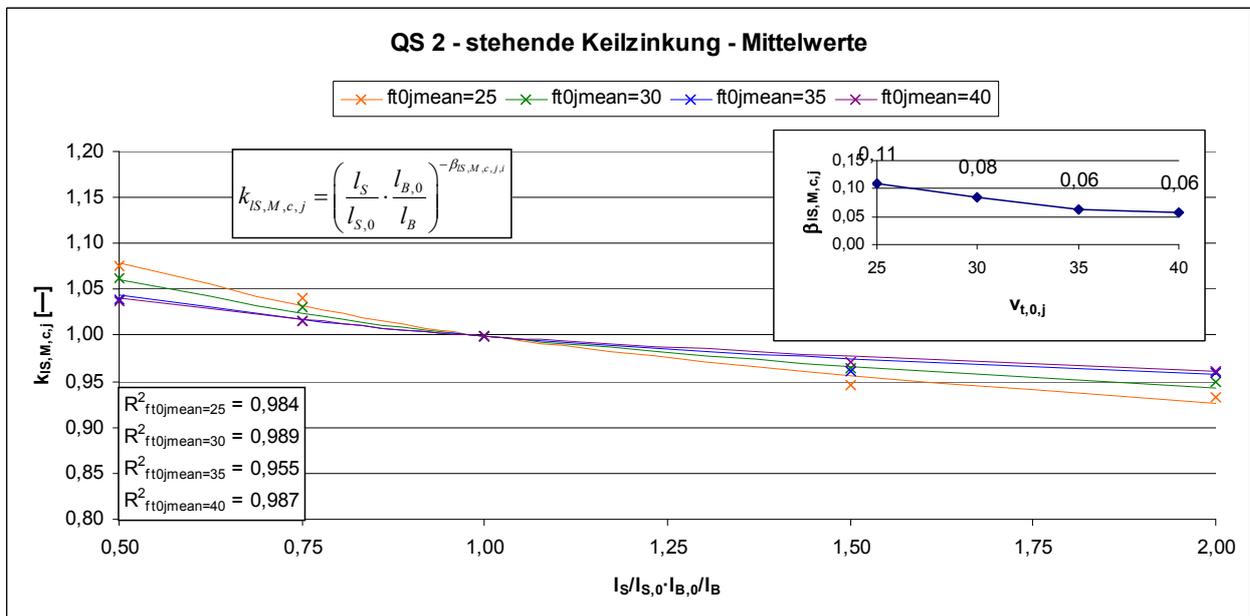
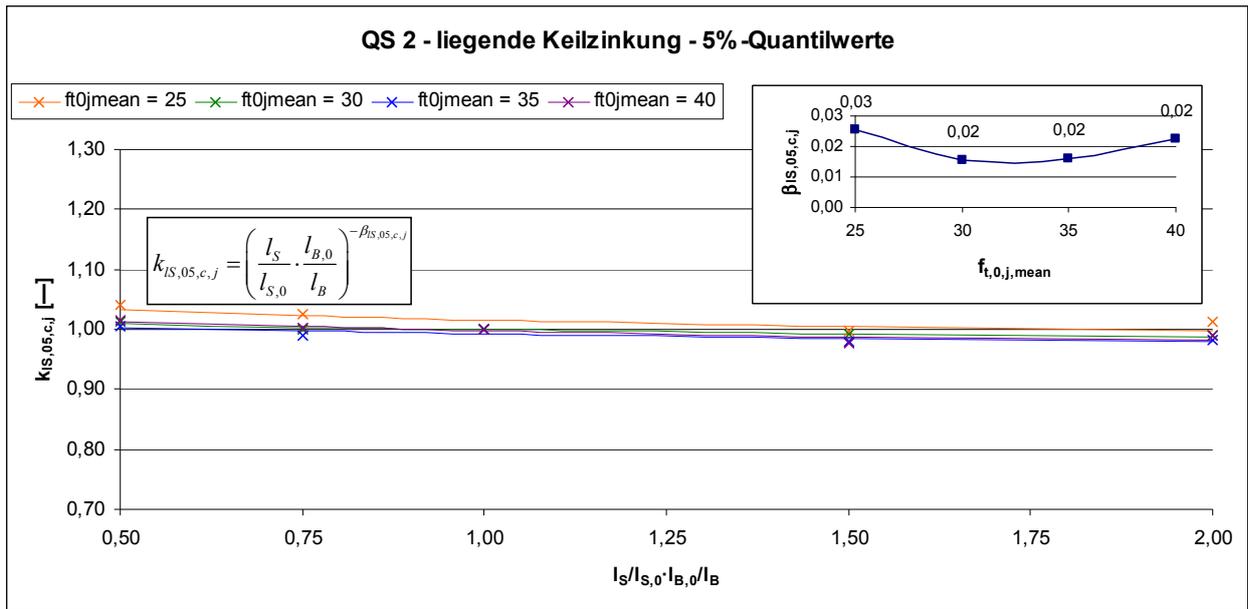


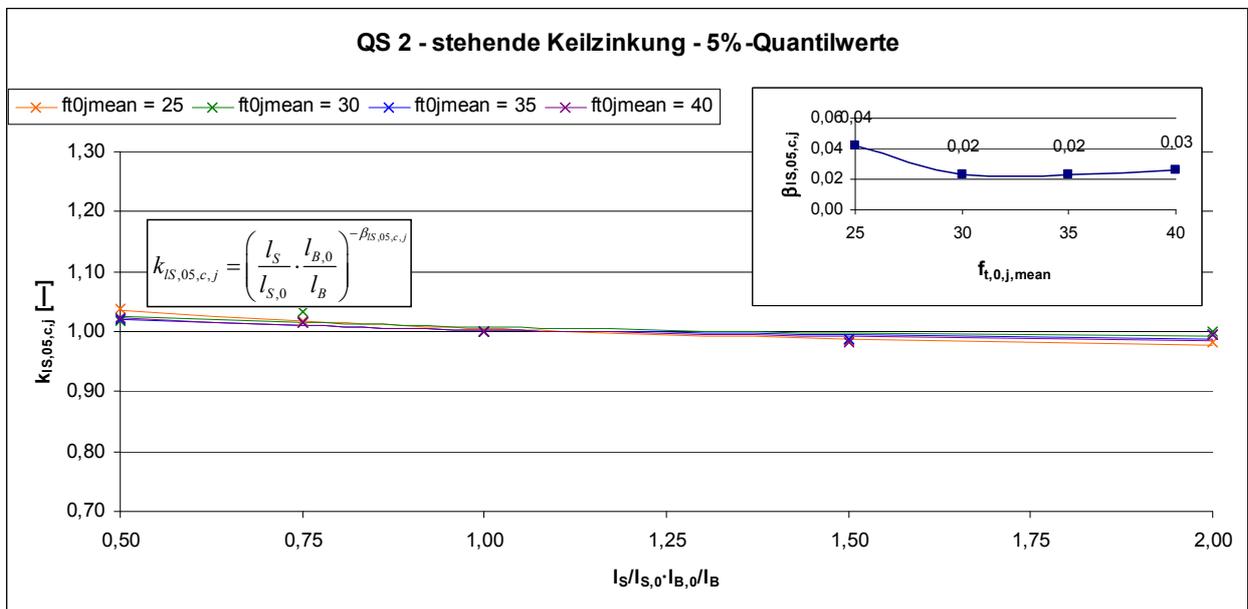
Diagramm 9-21 Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)

Wie bereits bei dem Querschnitt mit einer faserparallelen Decklage (QS 1) lässt sich auch beim Querschnitt mit zwei faserparallelen Decklagen (QS 2) der Verlauf der Mittelwerte ebenfalls mit der Gleichung Glg. 9-17 beschreiben. Die Verhältnisse liegen für die liegende Keilzinkung in der gleichen Größenordnung wie für die stehende Keilzinkung. Im Vergleich zu dem Querschnitt (QS 1) mit einer faserparallelen Decklage fallen die Verhältnisse der Trägerfestigkeiten etwas geringer aus. Die ist auf die zwei parallelen Decklagen zurückzuführen, die zu einer Homogenisierung des Querschnitts und damit auch den Tragfähigkeiten führen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die 5%-Quantilwerte vorgestellt.



**Diagramm 9-22 Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)**



**Diagramm 9-23 Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)**

Wie bei den Querschnitten mit einer faserparallelen Decklage (QS 1) fällt auch bei diesen Trägern (QS 2 zwei parallele Decklagen) der Einfluss der Trägerlänge sehr gering aus, unabhängig von der Art der Keilzinkenverbindung. Der Verlauf kann als näherungsweise konstant angesehen werden.

### 9.2.3.3 Laminierungseffekt

Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden Querschnitte (QS 1 eine faserverparallele Decklage und QS 2 zwei faserverparallele Decklagen) miteinander verglichen. Hierzu werden die Ergebnisse des Querschnitts QS 2 durch die Ergebnisse des Querschnitts QS 1 geteilt. Der Vergleich der Trägerfestigkeiten für die liegende Keilzinkung lässt folgendes erkennen:

Bei den Mittelwerten liegen die Faktoren für den Laminierungseffekt ungefähr bei 1,04. Lediglich bei sehr niedrigen mittleren Keilzinkenzugfestigkeiten und größeren Trägerlängen sind höhere Laminierungsfaktoren (ca. 1,10) festzustellen. Bei den 5%-Quantilwerten fallen die Laminierungsfaktoren für die höheren mittleren Keilzinkenfestigkeiten etwas höher aus, als für die niedrigen Keilzinkenfestigkeiten, unabhängig von der Trägerlänge.

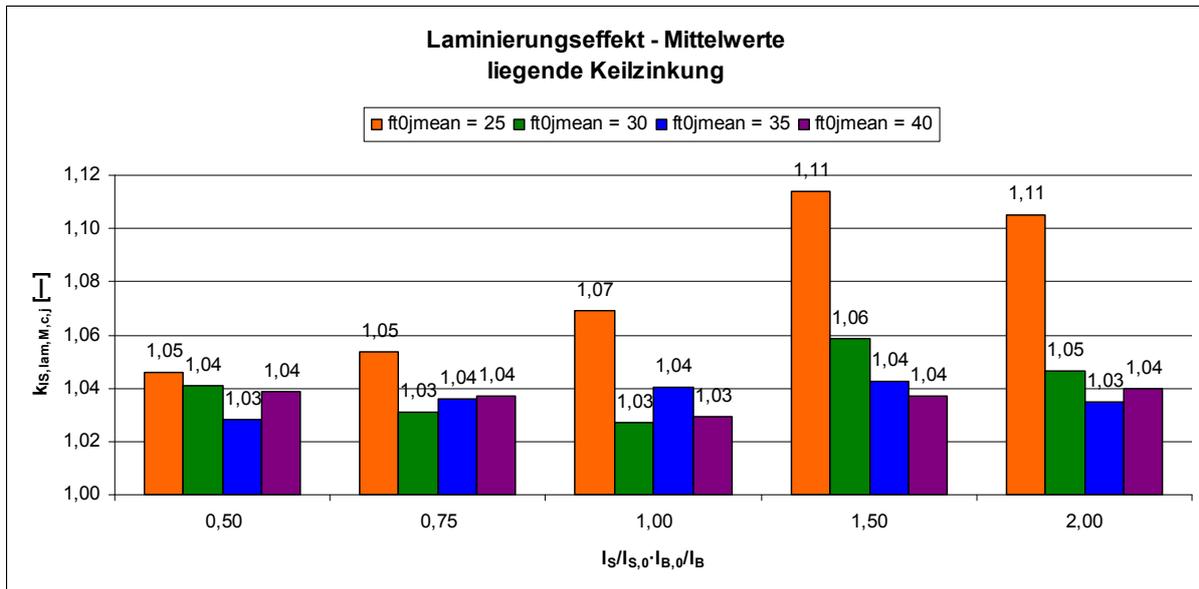


Diagramm 9-24 Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit liegenden Keilzinkungen

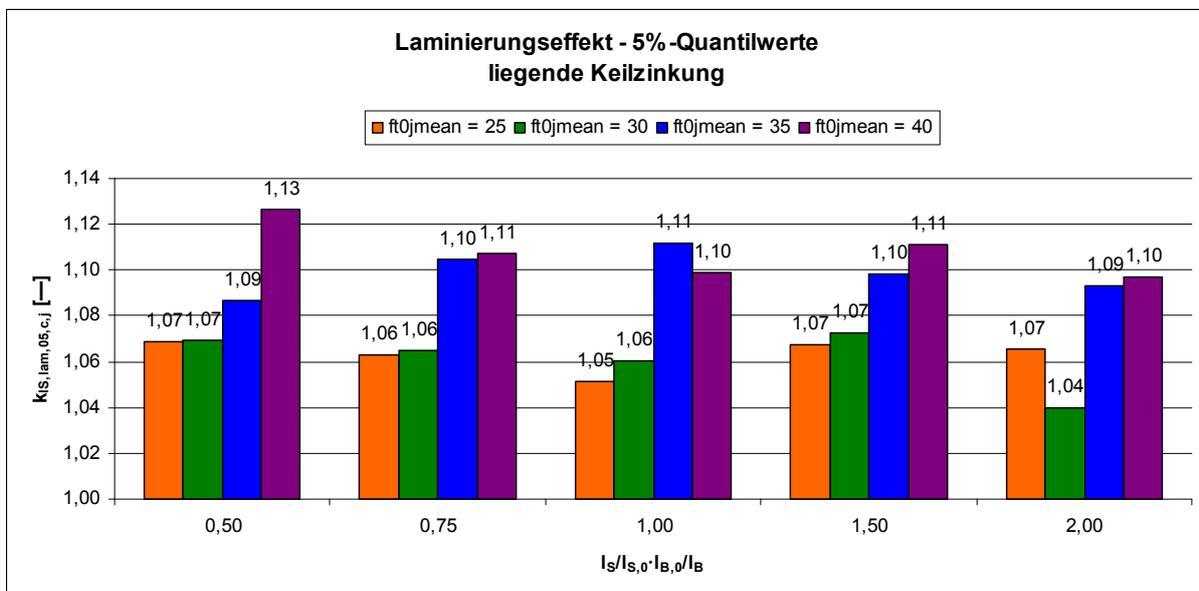


Diagramm 9-25 Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit liegenden Keilzinkungen

Bei den Trägern mit stehenden Keilzinkungen sind die gleichen Tendenzen wie für die Bauteile mit liegenden Keilzinkungen festzustellen. Die Laminierungsfaktoren für die stehende Keilzinkung sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

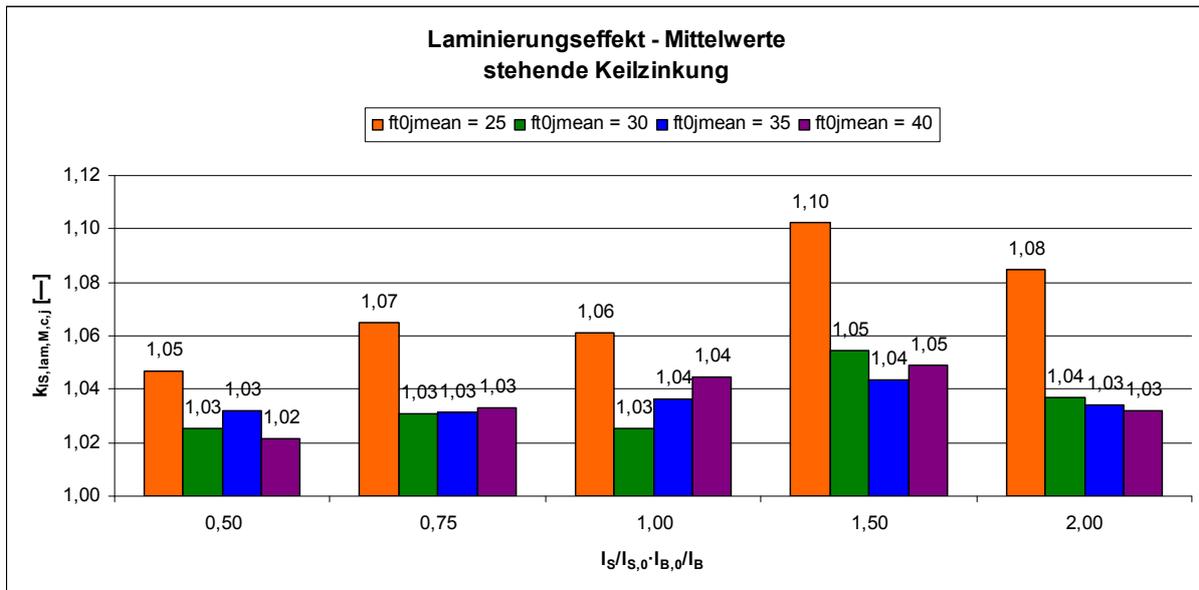


Diagramm 9-26 Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit stehenden Keilzinkungen

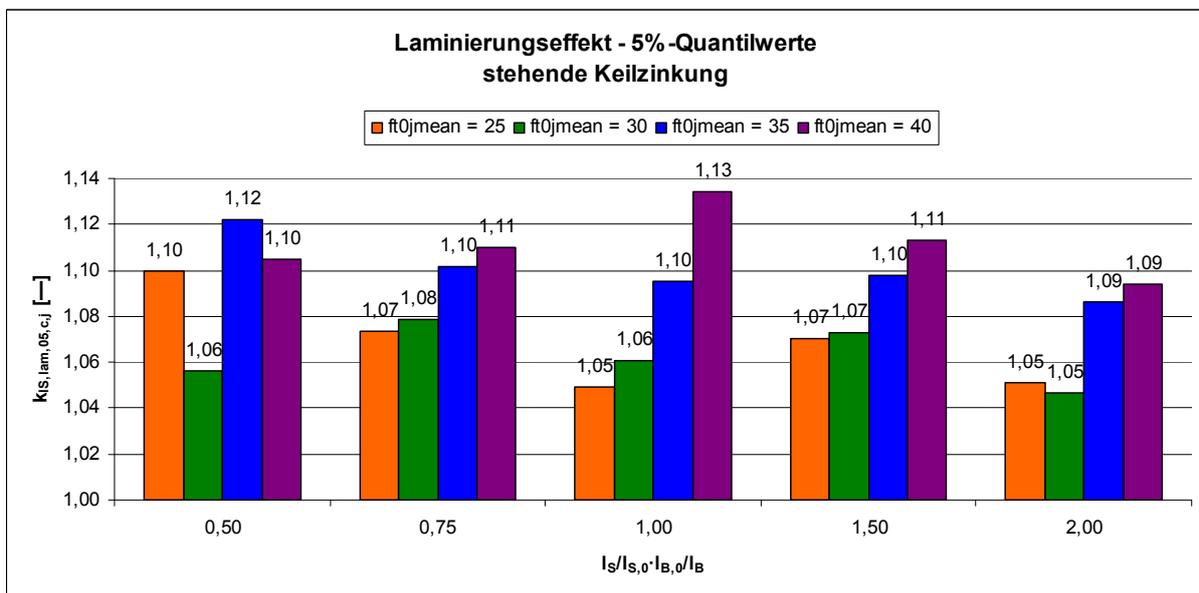


Diagramm 9-27 Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit stehenden Keilzinkungen

### 9.2.4 Einfluss der Belastungsart

Zur Untersuchung des Einflusses der Belastungsart, wird der Abstand der beiden Einzelkräfte  $l_F$  variiert, wodurch sich das beanspruchte Volumen verändert. Wie bei Brettschichtholzträgern hängt auch bei Brettsperrholzträgern die Tragfähigkeit von der Größe des beanspruchten Volumens ab.

Während die Trägerbreite mit  $B = 150$  mm sowie die Trägerlänge  $(l_S/l_{S,0}) \cdot (l_{B,0}/l_B) = 1,0$  konstant gehalten werden, wird der Lastabstand  $l_F$  verändert. Dieser Einfluss wird in Anlehnung an COLLING [11] mit folgenden Gleichungen beschrieben:

$$k_{F,m,j,c} = \left( \frac{\beta_{F,m,j,c} + l_F/l_S}{\beta_{F,m,j,c} + l_{F,0}/l_{S,0}} \right)^{-\beta_{F,m,j,c}} \quad \text{Glg. 9-19}$$

$$k_{F,05,j,c} = \left( \frac{\beta_{F,05,j,c} + l_F/l_S}{\beta_{F,05,j,c} + l_{F,0}/l_{S,0}} \right)^{-\beta_{F,05,j,c}} \quad \text{Glg. 9-20}$$

Hierin bedeuten:

- $k_{F,M,c,j}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart auf die mittlere Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen
- $k_{F,05,c,j}$  = Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen
- $\beta_{F,M,c,j}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses für die Mittelwerte
- $\beta_{F,05,c,j}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses für die 5%-Quantilwerte
- $l_F$  = beliebige Belastungslänge (Abstand der beiden Einzellasten untereinander)
- $l_S$  = beliebige Trägerlänge
- $l_{F,0}$  = Belastungslänge des Standardträgers ( $l_{F,0} = 1/3 \cdot l_{S,0}$ )
- $l_{S,0}$  = Trägerlänge des Standardträgers ( $l_{S,0} = 36 \cdot h$ )

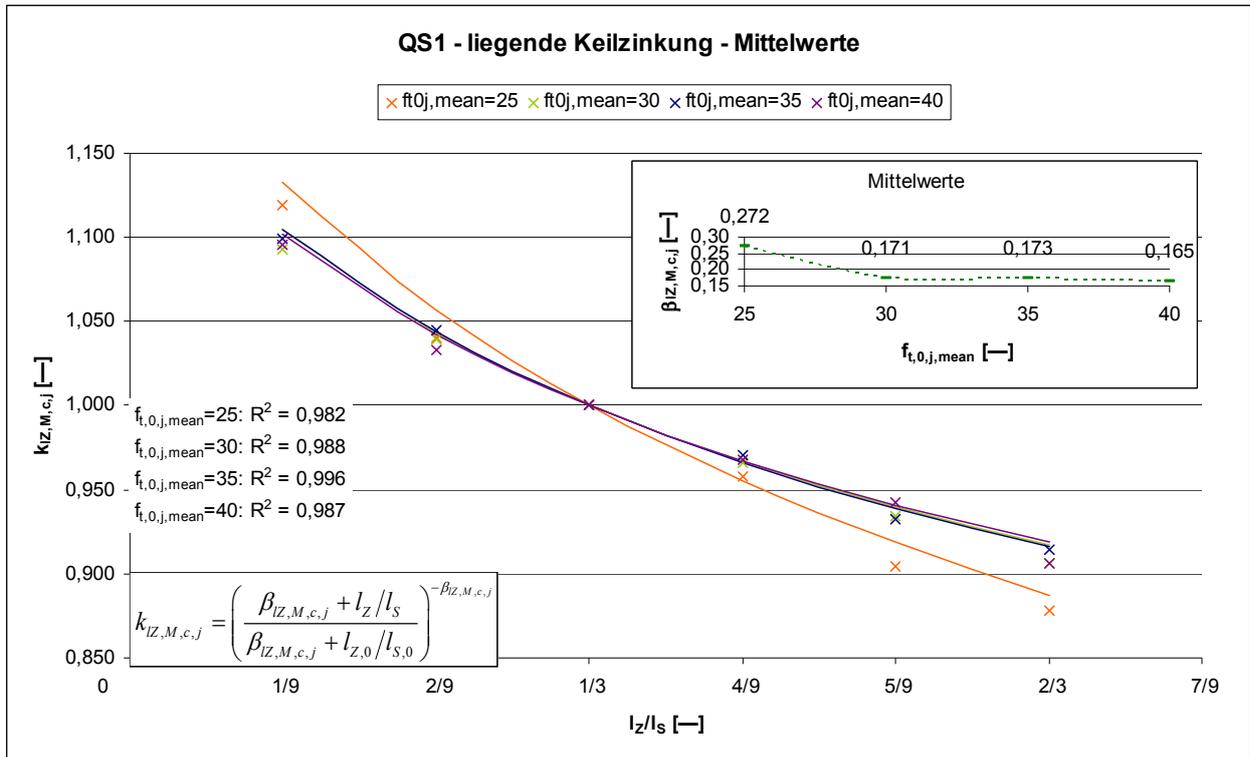
In den obigen Gleichungen entspricht das Verhältnis  $l_F/l_{S,0}$  dem Abstand der beiden Einzellasten zur Trägerlänge des Standardträgers (Belastung in den Drittelpunkten) und das Verhältnis  $l_F/l_S$  einem beliebigen Verhältnis von Lastabstand zu Trägerlänge.

Das Verhältnis  $l_F/l_S$  wurde in dem Bereich von  $1/9$  bis  $6/9$  untersucht jedoch nur für das Verhältnis  $(l_S/l_{S,0}) \cdot (l_{B,0}/l_B) = 1,0$ , was der Länge des Standardträgers entspricht.

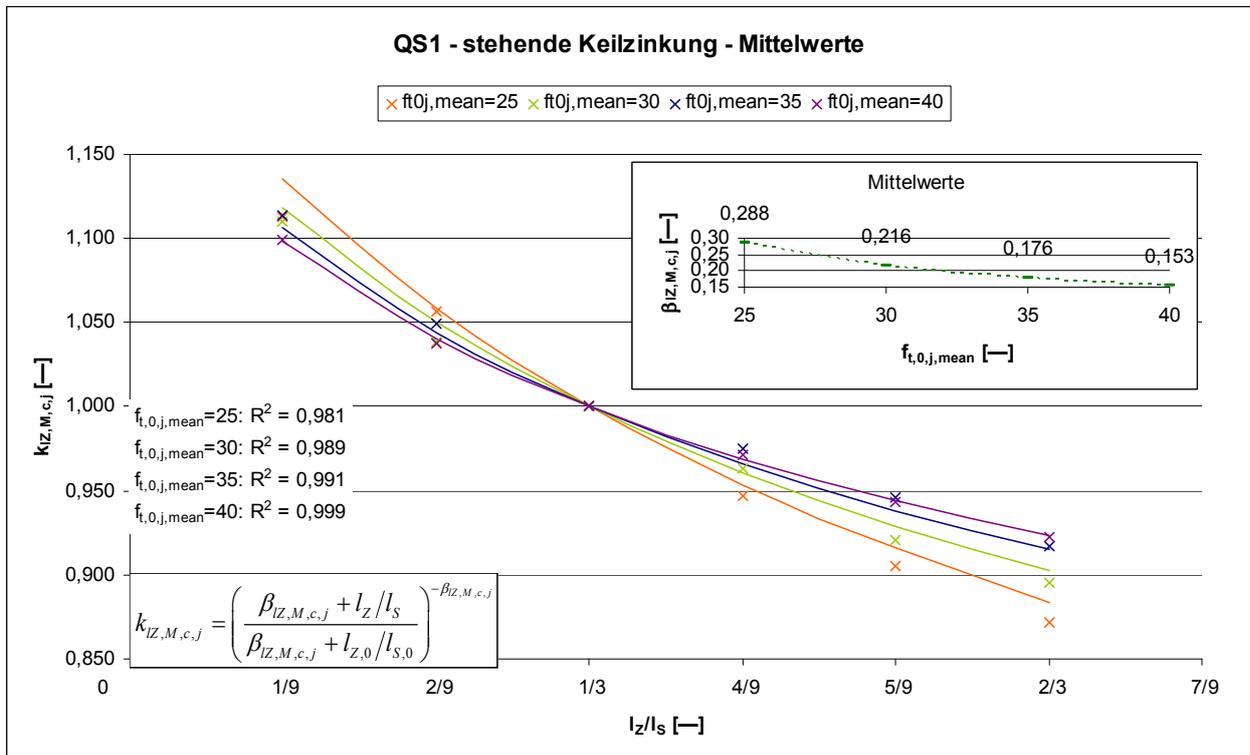
Zunächst werden die Ergebnisse für den Querschnitt QS 1 (1 faserparallele Decklage) vorgestellt. Anschließend wird der Querschnitt QS 2 (2 faserparallele Decklagen) betrachtet.

### 9.2.4.1 Querschnitt QS 1 – 1 faserparallele Decklage

Die Untersuchungen zum Einfluss der Belastungslänge auf die mittlere Biegefestigkeit sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.



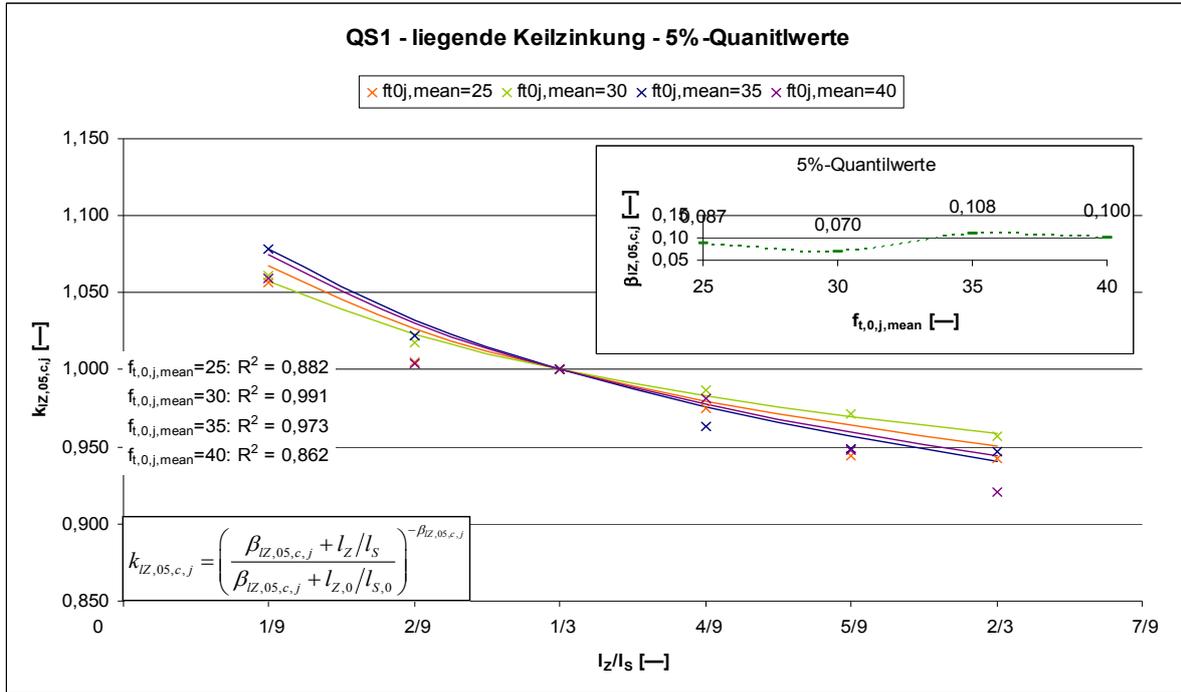
**Diagramm 9-28** Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)



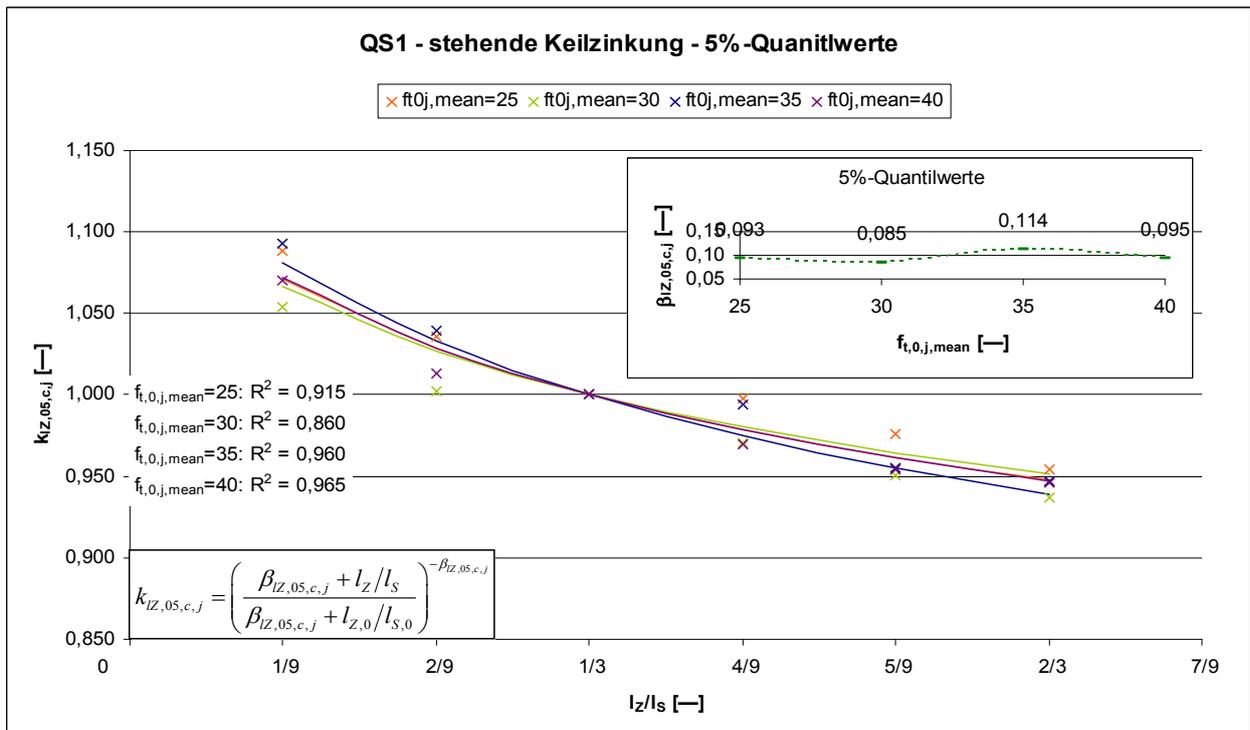
**Diagramm 9-29** Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

Die obigen Diagramme zeigen, dass die Belastungslänge einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit der Träger hat. Der Einfluss ist unabhängig von der Art der Keilzinkenverbindung.

Bei den 5%-Quantilwerten fällt der Einfluss nicht ganz so groß aus wie bei den Mittelwerten, insgesamt jedoch auch so groß, dass er von relevanter Bedeutung ist. Bezüglich der Art der Keilzinkenverbindung ist ebenfalls kein nennenswerter Unterschied festzustellen.



**Diagramm 9-30** Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)



**Diagramm 9-31** Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

Nachfolgend werden die Ergebnisse für den Querschnitt QS 2 (2 faserparallele Decklagen) vorgestellt.

### 9.2.4.2 Querschnitt QS 2 – 2 faserparallele Decklagen

Der Verlauf der mittleren Biegefestigkeiten für den Querschnitt mit zwei faserparallelen Decklagen (QS 2) ist in Diagramm 9-32 dargestellt.

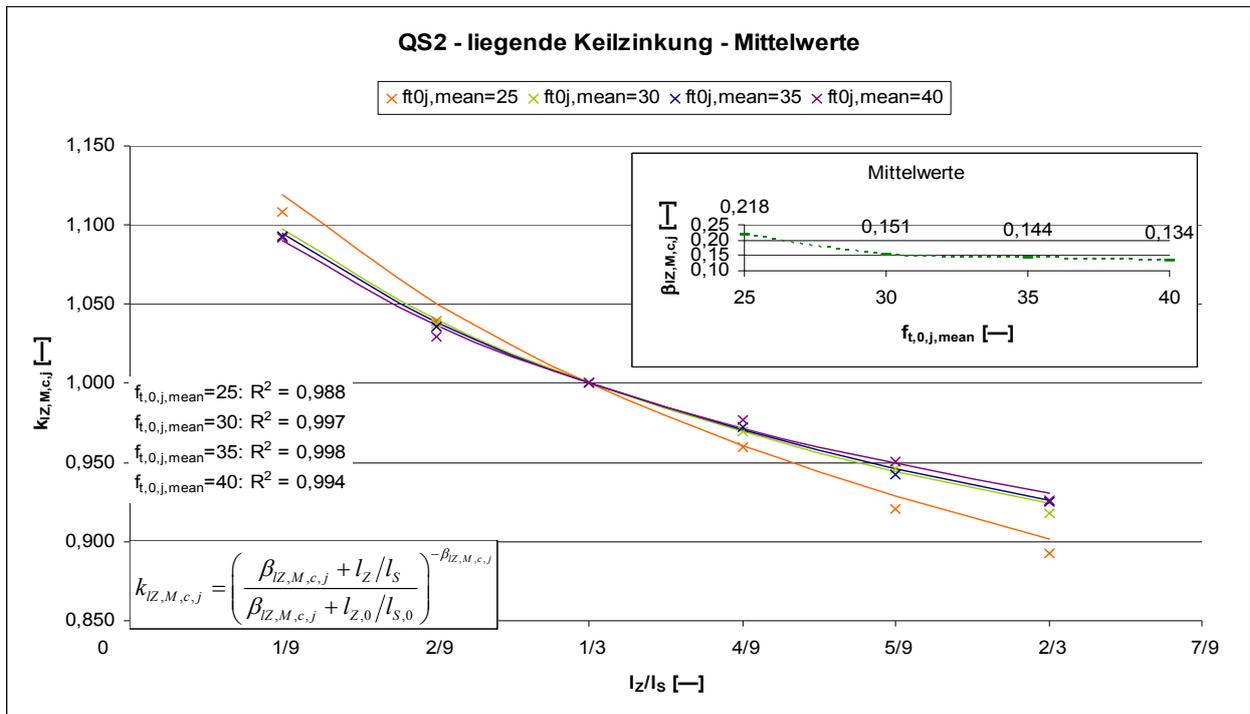


Diagramm 9-32 Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)

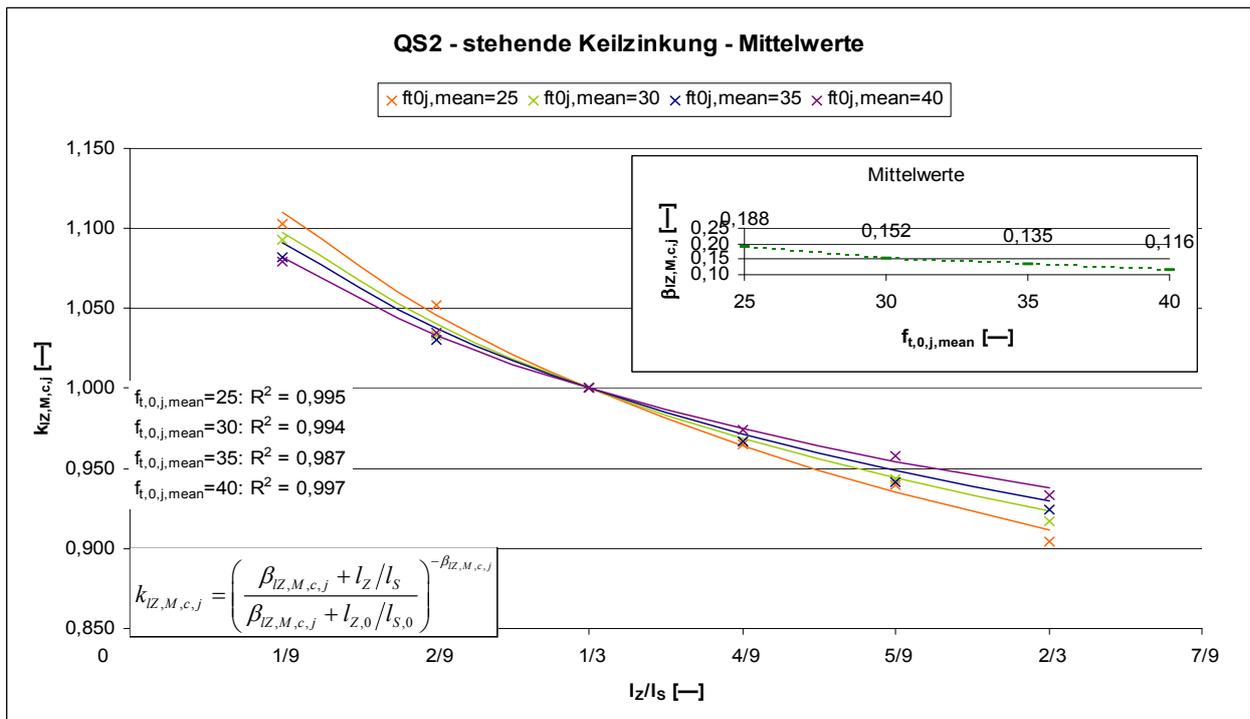


Diagramm 9-33 Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)

Bei dem Querschnitt mit zwei faserparallelen Decklagen (QS 2) zeigen sich für die Mittelwerte der Trägerfestigkeiten dieselben Einflüsse für die Belastungslänge wie bei dem Querschnitt mit nur einer faserparallelen Decklage (QS 1). Im Vergleich zu dem vorherigen Querschnitt (QS 1) fällt der Einfluss

der Belastungslänge hingegen etwas geringer aus. Dies ist wie bereits bei der Trägerlänge festgestellt wurde auf die Homogenisierung des Querschnitts durch die beiden faserparallelen Decklagen zurückzuführen. Für die beiden betrachteten Arten an Keilzinkenverbindung (liegend oder stehend) ist kein relevanter Unterschied bei den Einflussfaktoren festzustellen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die 5%-Quantile der Trägerfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge vorgestellt.

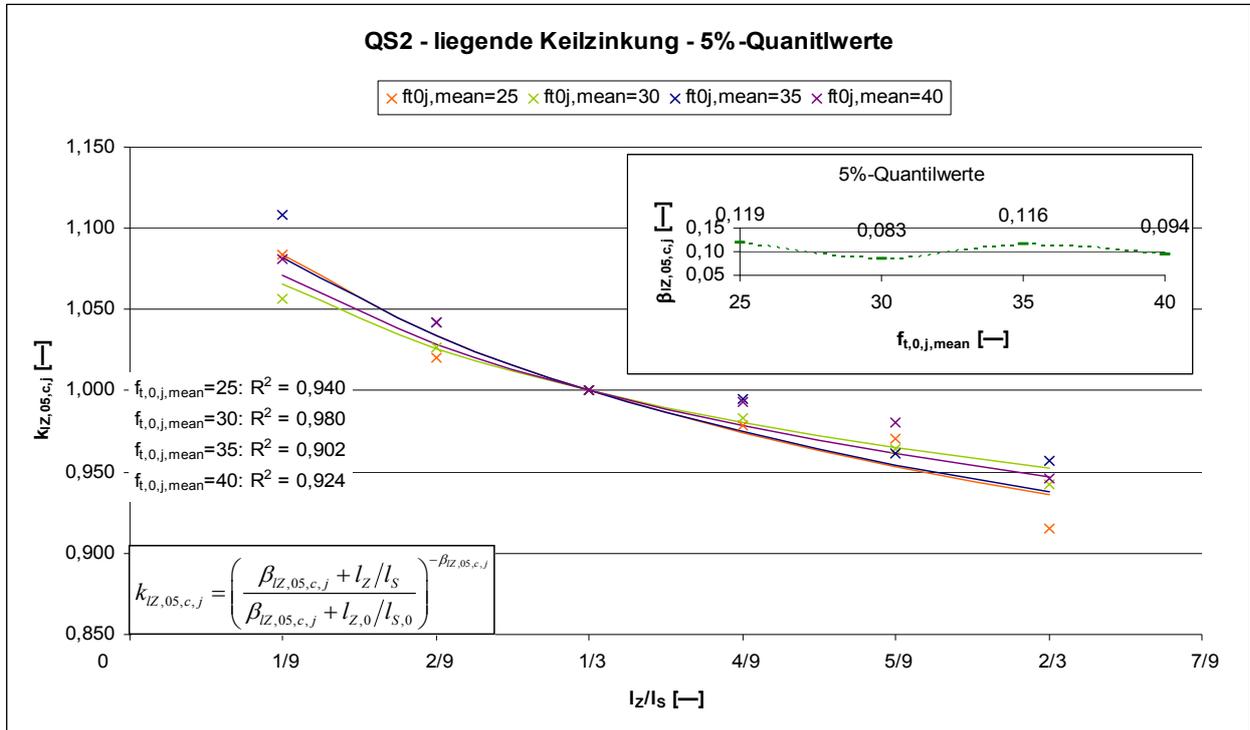


Diagramm 9-34 Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

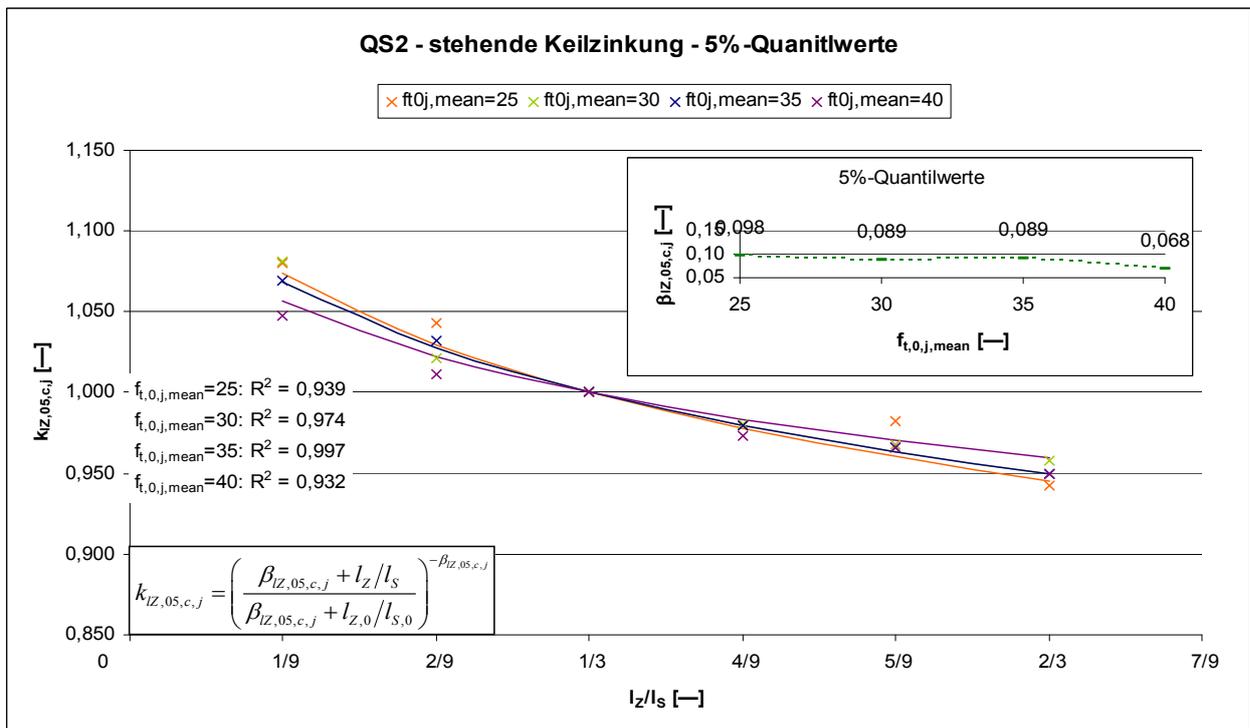


Diagramm 9-35 Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

Der Einfluss der Belastungslänge fällt für die 5%-Quantilwerte geringfügig niedriger aus als für die Mittelwerte. Der Unterschied bezüglich der Keilzinkenart ist hingegen vernachlässigbar. Der Einfluss kann auch als Unabhängig von der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit angesehen werden.

### 9.2.4.3 Laminierungseffekt

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Werte für die beiden Querschnittstypen gegenübergestellt. Aus diesen Diagrammen ist zu erkennen, dass es bei den Trägern mit Keilzinkenverbindungen ebenfalls einen Laminierungseffekt wie bei den Trägern mit Holzversagen gibt.

#### Ergebnisse für Bauteile mit liegenden Keilzinkenverbindungen

Bei den Mittelwerten ergeben sich die geringfügig größere Laminierungsfaktoren für die Bauteile mit der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit von  $f_{t,0,j,mean} = 25 \text{ N/mm}^2$ . Für die übrigen untersuchten Keilzinkenfestigkeiten liegen die Laminierungsfaktoren alle im selben Bereich.

Bei den 5%-Quantilwerten ist hingegen die Tendenz festzustellen, dass sich mit zunehmender Keilzinkenfestigkeit höhere Laminierungsfaktoren ergeben. Im Mittel kann jedoch von einem Laminierungseffekt von ca. 10% ausgegangen werden.

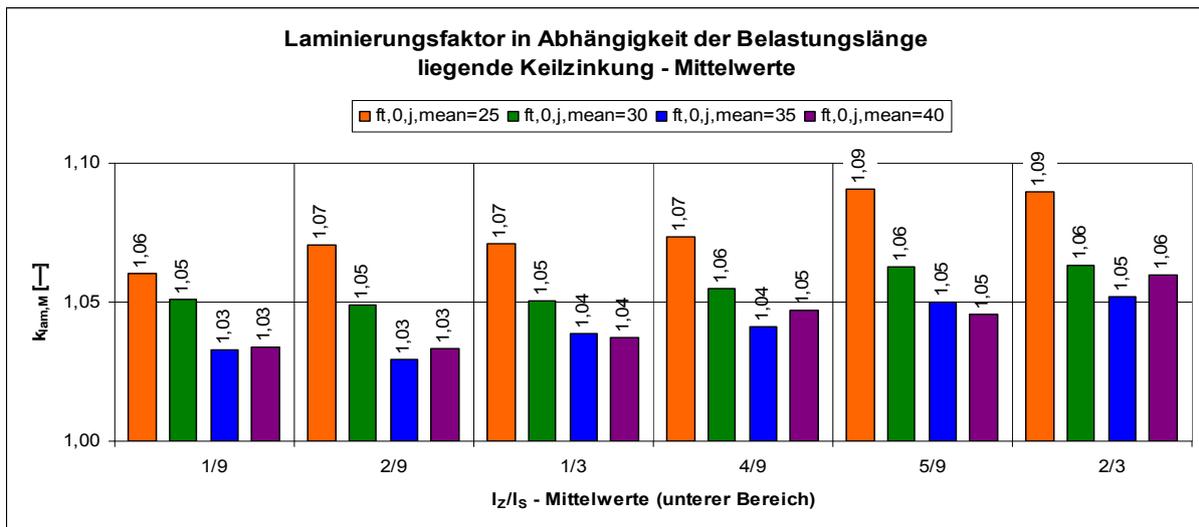


Diagramm 9-36 Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit liegenden Keilzinkenverbindungen

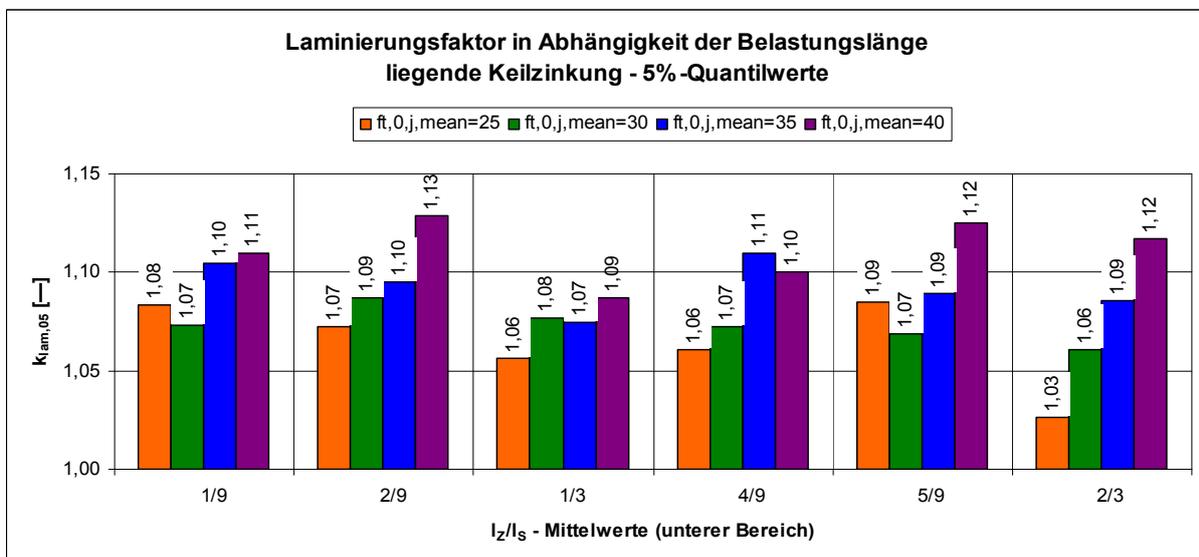


Diagramm 9-37 Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit liegenden Keilzinkenverbindungen

Ergebnisse für Bauteile mit stehenden Keilzinkenverbindungen

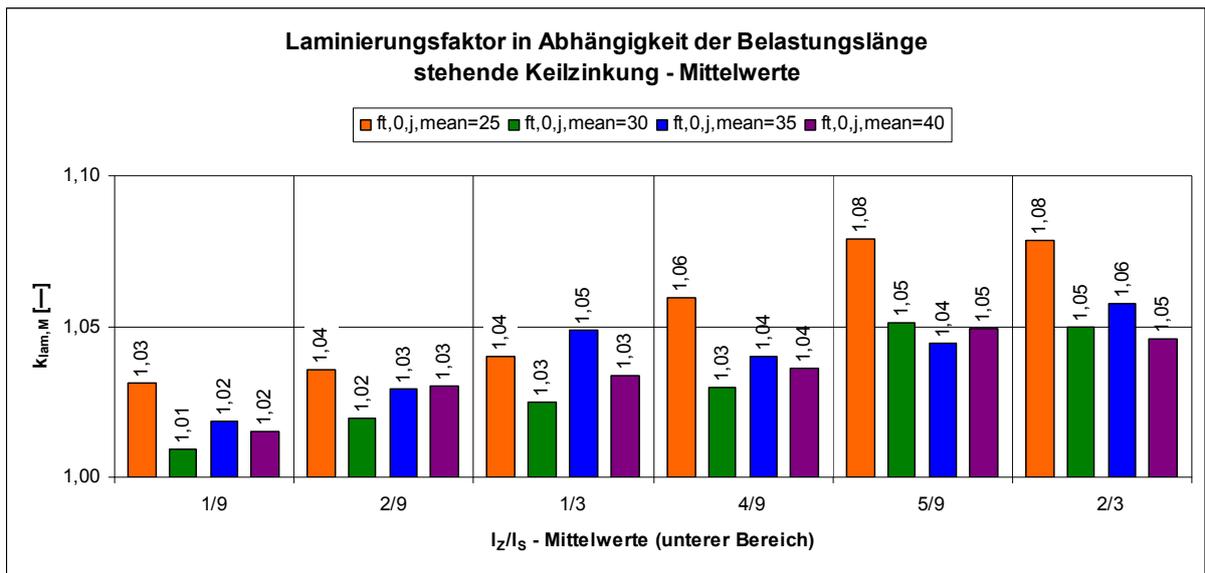


Diagramm 9-38 Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit stehenden Keilzinkenverbindungen

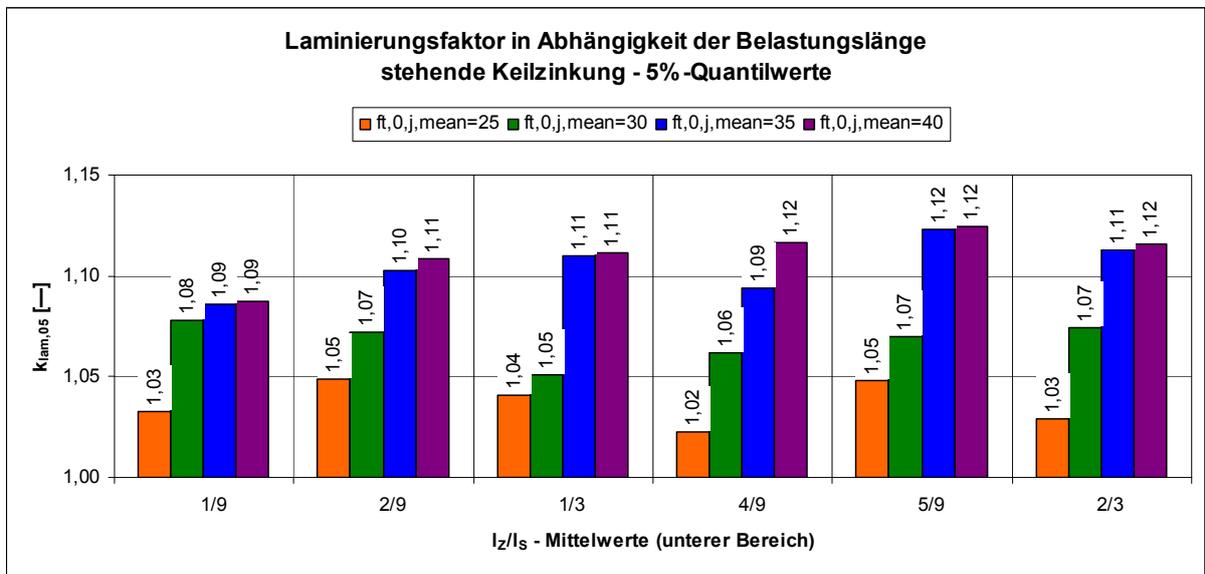


Diagramm 9-39 Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit stehenden Keilzinkenverbindungen

Die obigen Diagramme zeigen, dass sich für die Bauteile mit stehenden Keilzinkungen ähnliche Laminierungsfaktoren sowohl für die Mittelwerte als auch 5%-Quantilwerte ergeben wie für die Bauteile mit liegenden Keilzinkungen.

## 9.2.5 Einfluss der Trägerbreite

Der letzte Parameter, dessen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperthölzern im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden soll ist die Trägerbreite bzw. die Anzahl nebeneinander liegender Bretter. Für diese Untersuchungen wurde die Trägerlänge und Belastungsanordnung der Standardträger konstant gehalten, lediglich die Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter, und somit die Trägerbreite, wurden verändert. Untersucht wurden wie bei den Trägern ohne Keilzinkenverbindungen Trägerbreiten mit 1 nebeneinander liegendem Brett bis hin zu 10 nebeneinander liegenden Brettern.

Für die Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite wurden die Beziehungen in Anlehnung an Abschnitt 9.1.3.2 gewählt.

$$k_{B,M,j,c,i} = m_{B,M,j,c,i} \cdot \left( \frac{B}{B_0} \right)^{-\beta_{B,M,j,c,i}} \quad \text{Glg. 9-21}$$

$$k_{B,05,j,c,i} = m_{B,05,j,c,i} \cdot \left( \frac{B}{B_0} \right)^{-\beta_{B,05,j,c,i}} \quad \text{Glg. 9-22}$$

Hierin bedeuten:

$k_{B,(M/05),j,c,i}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Trägern mit Keilzinkenversagen für die Mittel- und 5%-Quantilwerte

$m_{B,(M/05),j,c,i}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Trägern mit Keilzinkenversagen für die Mittel- und 5%-Quantilwerte

$\beta_{B,(M/05),j,c,i}$  = Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite auf die Biegefestigkeit von Trägern mit Keilzinkenversagen für die Mittel- und 5%-Quantilwerte

$B$  = Breite des Trägers  
(Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter)

$B_0$  = Breite des Standardträgers  
(Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter des Standardträgers = 1)

Der Einfluss der Trägerbreite wurde wieder für die beiden Querschnittstypen QS 1<sup>1</sup> und QS 2<sup>2</sup> untersucht. Zunächst werden die Ergebnisse für den Querschnitt QS 1, anschließend für QS 2 vorgestellt. Im Anschluss daran wird der Laminierungseffekt dargestellt, d.h. es werden die Ergebnisse dieser beiden Querschnitte miteinander verglichen.

---

<sup>1</sup> QS 1: eine faserparallele Decklage

<sup>2</sup> QS 2: zwei faserparallele Decklagen

9.2.5.1 Querschnittstyp QS 1 – 1 faserparallele Decklage

In dem nachfolgenden Diagramm 9-40 ist der Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 dargestellt. Außerdem sind in dem Diagramm 9-40 noch die Funktionsparameter zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite angegeben.

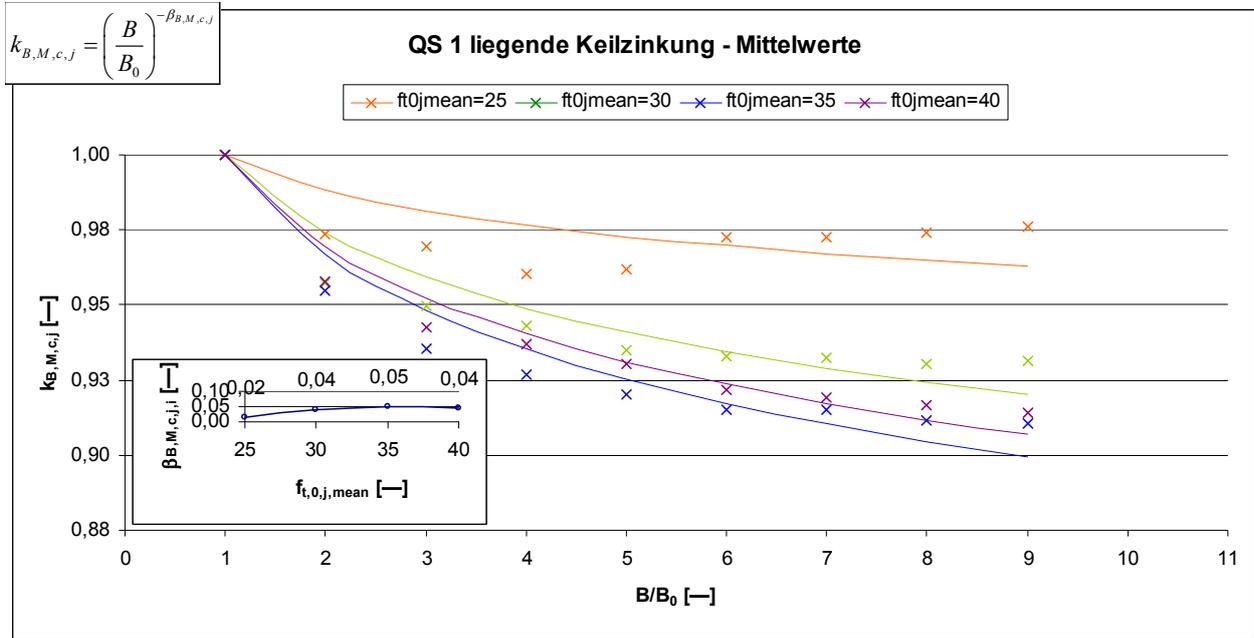


Diagramm 9-40 Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

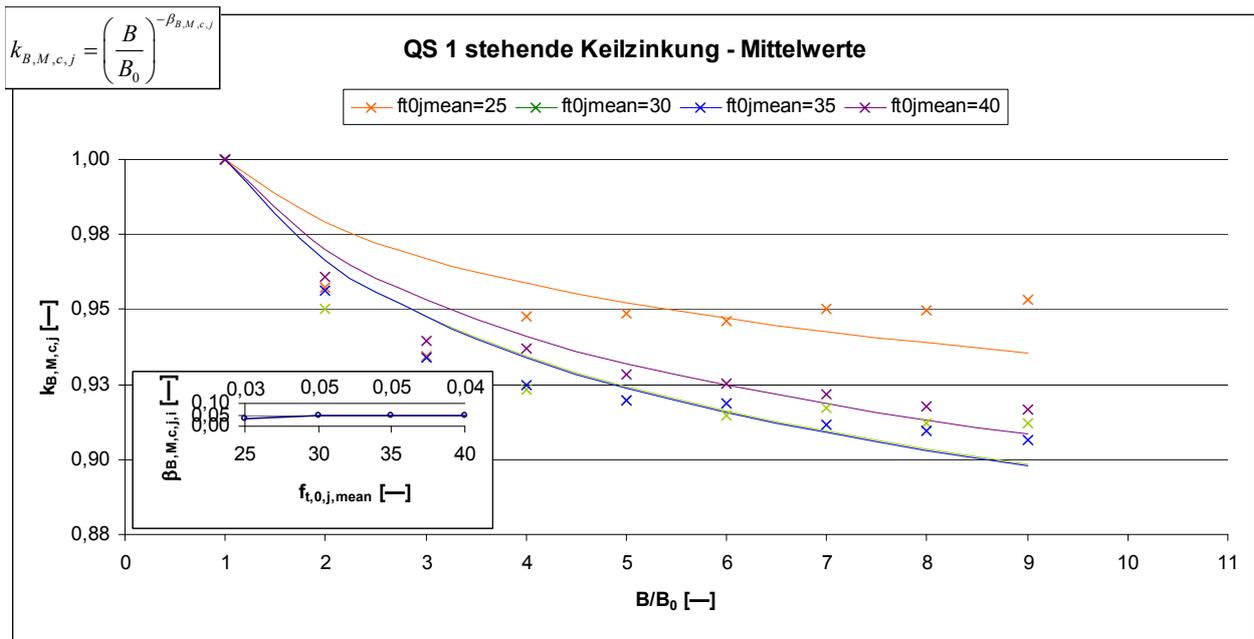
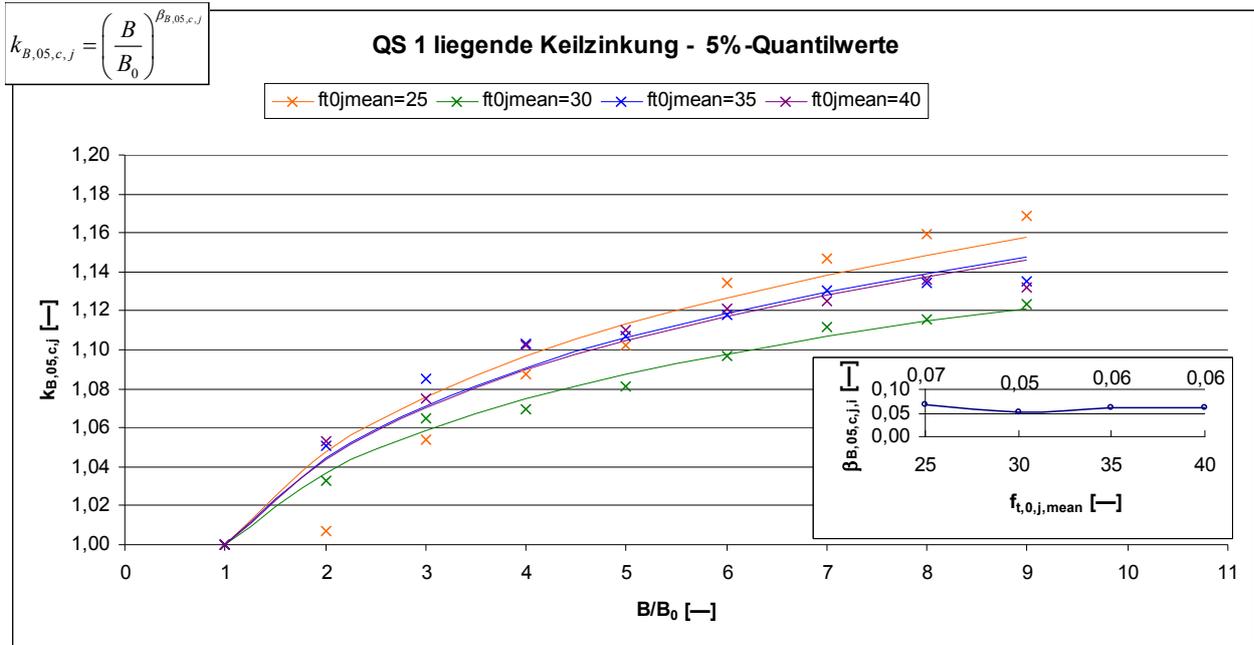


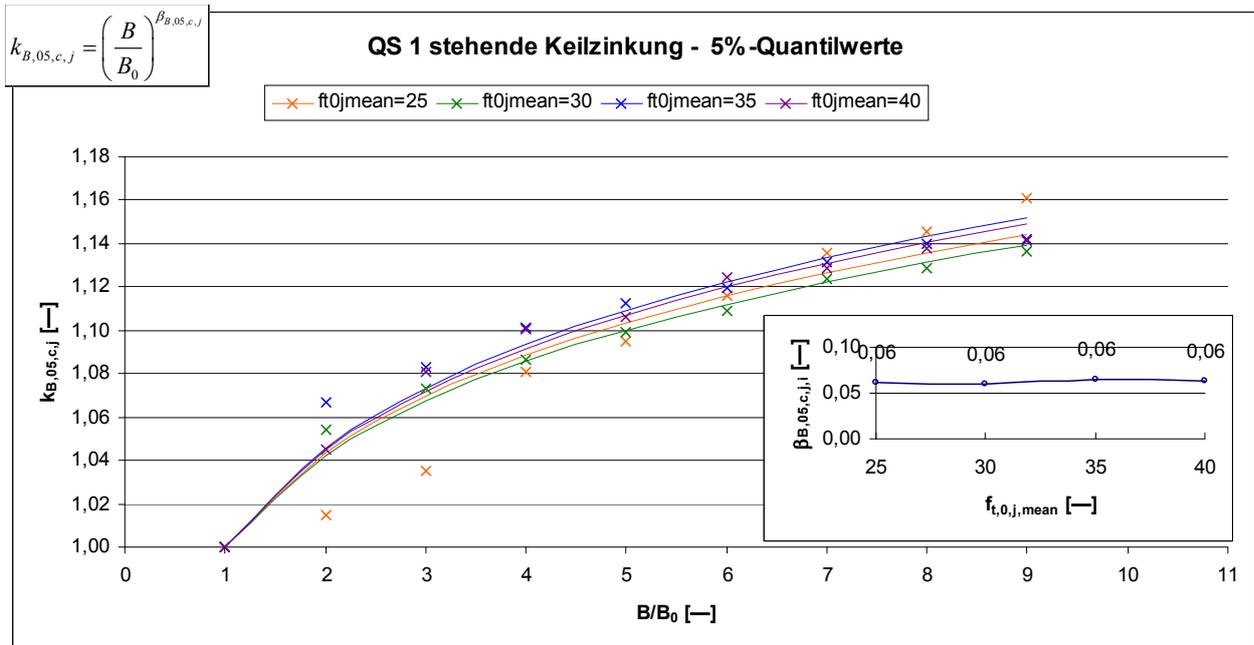
Diagramm 9-41 Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

Anhand von Diagramm 9-40 lässt sich erkennen, dass die mittlere Tragfähigkeit mit zunehmender Anzahl an nebeneinander liegenden Brettern stark abnimmt. Der Einfluss der Trägerbreite wirkt sich bei geringeren Breiten stärker aus als bei Trägern mit einer höheren Anzahl an nebeneinander liegenden Brettern. Ab fünf nebeneinander liegenden Brettern ist keine weitere Abnahme der mittleren Bauteilbiegefestigkeit festzustellen.

Für die 5%-Quantilwerte ist der Verlauf für den Einfluss der Trägerbreite für den Querschnitt QS 1<sup>1</sup> in Diagramm 9-42 dargestellt. Wie bei den Mittelwerten sind zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite die zugehörigen Funktionsparameter in Abhängigkeit der Variationskoeffizienten der Keilzinkenverbindungen in dem Diagramm mit angegeben.



**Diagramm 9-42** Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)



**Diagramm 9-43** Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)

Anders als bei den Mittelwerten ist bei den 5%-Quantilwerten eine deutliche Zunahme der Biegefestigkeiten mit zunehmender Trägerbreite festzustellen. Bei den stehenden Keilzinkungen sind geringfügig höhere Einflussfaktoren festzustellen.

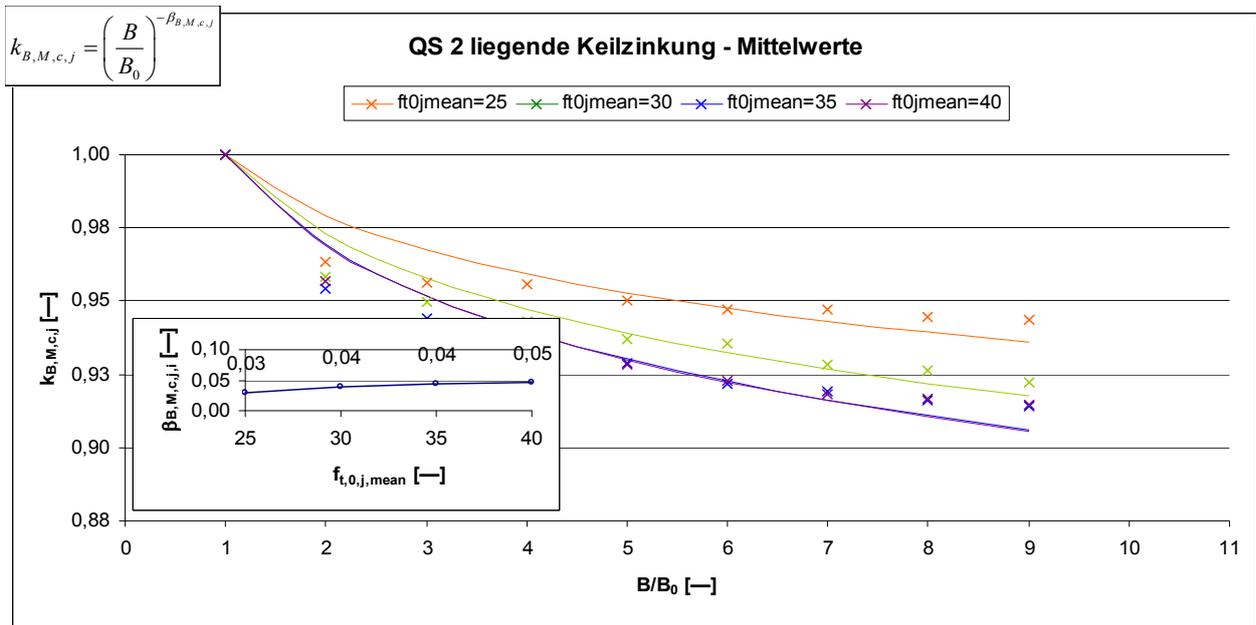
<sup>1</sup> QS 1: eine faserparallele Decklage (30-30-30-30-30)

### 9.2.5.2 Querschnittstyp QS 2 – 2 faserparallele Decklagen

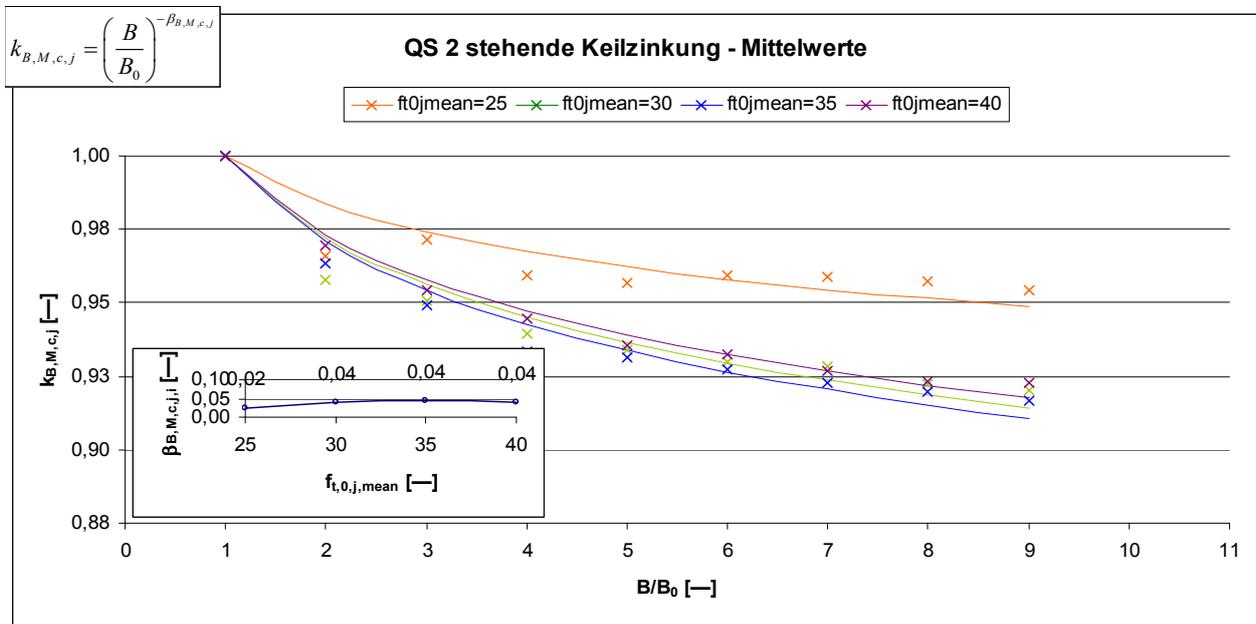
Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt, die sich für unterschiedliche Trägerbreiten für den Querschnitt QS 2 ergeben.

Das Diagramm 9-44 zeigt den Verlauf der Mittelwerte der Biegefestigkeiten für die Brettspertholzträger mit Keilzinkenversagen für unterschiedliche Trägerbreiten, inklusive der hierfür erforderlichen Funktionsparameter.

Wie bei dem zuvor untersuchten Querschnitt QS 1 mit einer faserparallelen Decklagen nimmt die Trägerbiegefestigkeit auch bei zwei faserparallelen Decklagen bis zur 3fachen Bauteilbreite erheblich ab. Im Unterschied zum vorherigen Querschnitt beträgt die Abnahme der Festigkeit bis zur 3-fachen Breite des Standardträgers nur ca. 20% und nicht 30%. Ab dann nimmt die Festigkeit, wie bei dem vorherigen Querschnitt jedoch ebenfalls nochmals um ca. 10% ab.

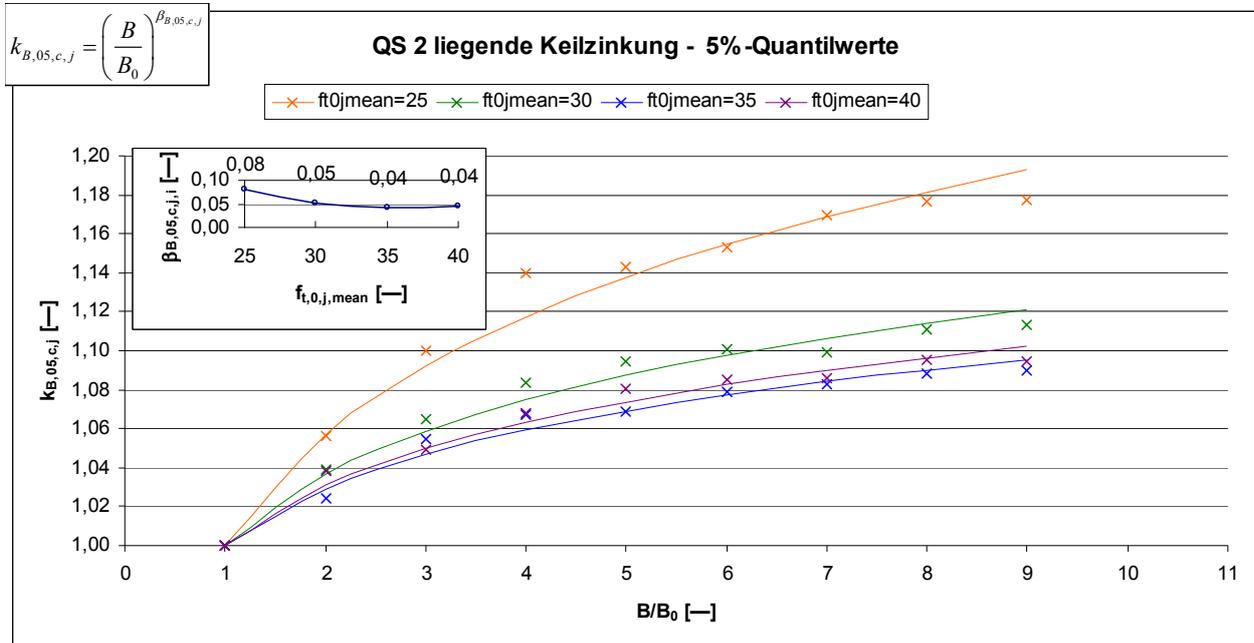


**Diagramm 9-44** Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)

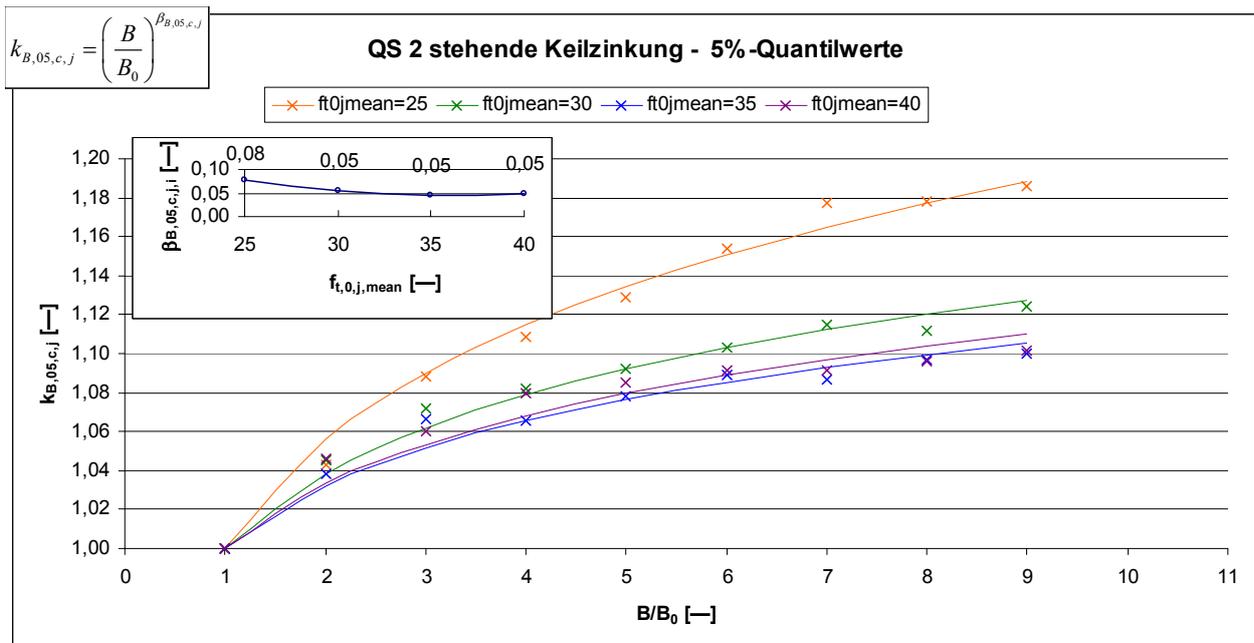


**Diagramm 9-45** Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)

Der Verlauf der 5%-Quantilwerte mit den ermittelten Funktionsparametern ist in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt. Auch bei den Trägern mit zwei faserparallelen Decklagen nimmt die Festigkeit mit zunehmender Trägerbreite ab. Auch hier ist die Abnahme bis zu 3 nebeneinander liegenden Brettern am stärksten ausgeprägt. Wie jedoch schon bei den Mittelwerten dieses Querschnitts festgestellt wurde, ist auch die Reduzierung der 5%-Quantilwerte bis zu einer Trägerbreite von 3 nebeneinander liegenden Brettern nicht so stark, wie bei dem Querschnitt mit nur einer faserparallelen Decklage.



**Diagramm 9-46 Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)**



**Diagramm 9-47 Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)**

Somit kann folgendes festgehalten werden:

Unabhängig vom Querschnitt nimmt die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen mit zunehmender Breite für den Mittelwert ab. Für den 5%-Quantilwert hingegen steigt die Bauteilbiegefestigkeit deutlich an.

Für den Querschnitt QS 1 reduziert sich die Festigkeit der Mittelwerte um bis zu ca. 8%. Beim Querschnitt QS 2 reduzieren sich die mittleren Biegefestigkeiten ebenfalls um bis zu ca. 8%. Je geringer die mittlere Keilzinkenfestigkeit ist, desto niedriger fällt die Abnahme der mittleren Bauteilbiegefestigkeit aus.

Bei den 5%Quantilwerten erhöht sich die Festigkeit für beide Querschnittstypen um bis zu ca. 15%. Aufgrund der zwei faserparallelen Decklagen des Querschnitts QS 2 wirkt sich der Breiteneinfluss nicht so stark aus wie bei den Trägern mit nur einer faserparallelen Decklage.

### 9.2.5.3 Laminierungseffekt

Abschließend werden die Tragfähigkeiten für die verschiedenen Trägerbreiten der beiden Querschnitte miteinander verglichen. Das Verhältnis der mittleren Biegefestigkeiten des Querschnitts QS 2 zu QS 1 ist in Diagramm 9-48 (liegende Keilzinkung) und Diagramm 9-49 (stehende Keilzinkung) angegeben; die Verhältniswerte für die 5%-Quantilwerte in Diagramm 9-50 und Diagramm 9-51.

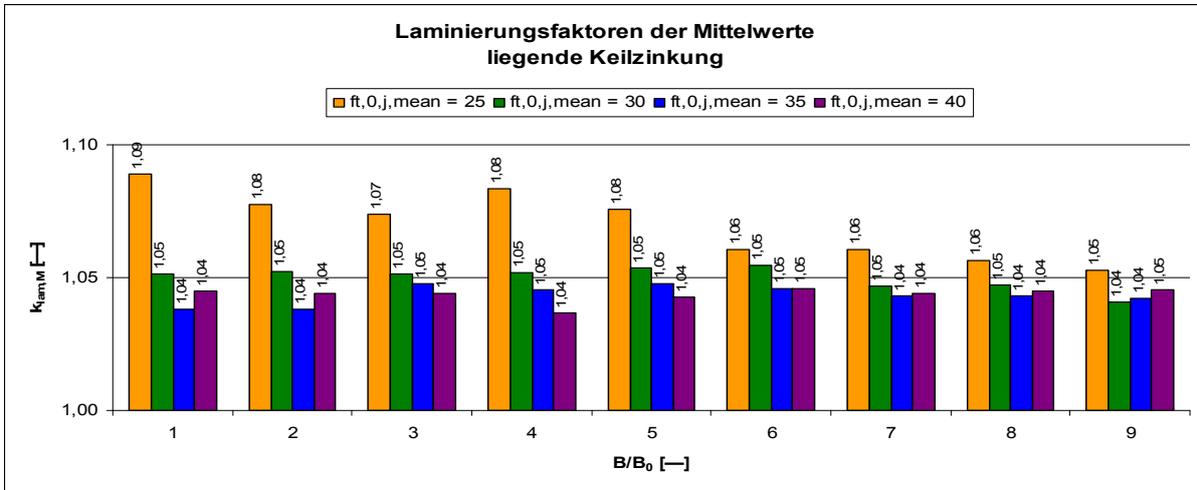


Diagramm 9-48 Verhältniswerte der Mittelwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit liegenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1

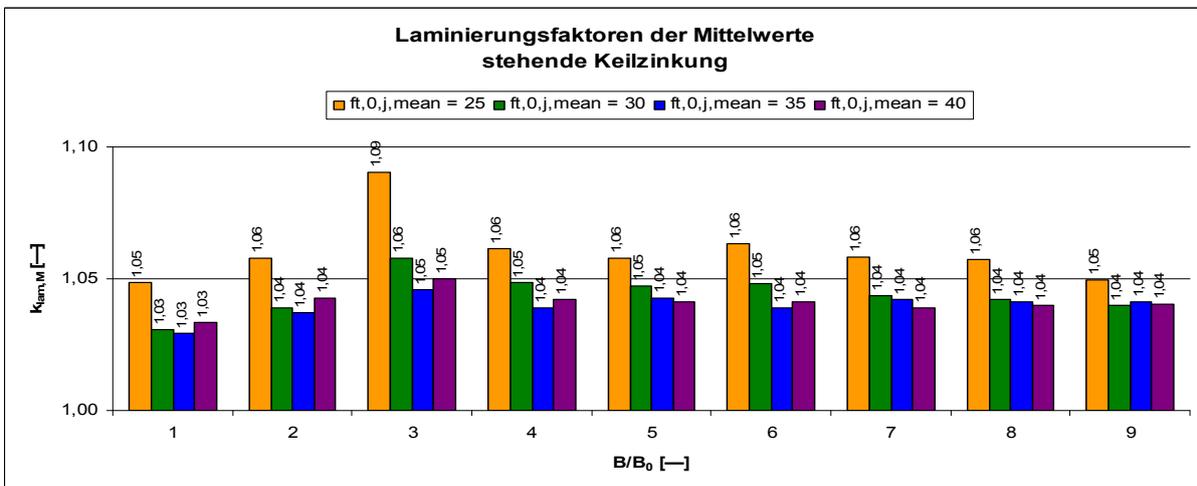
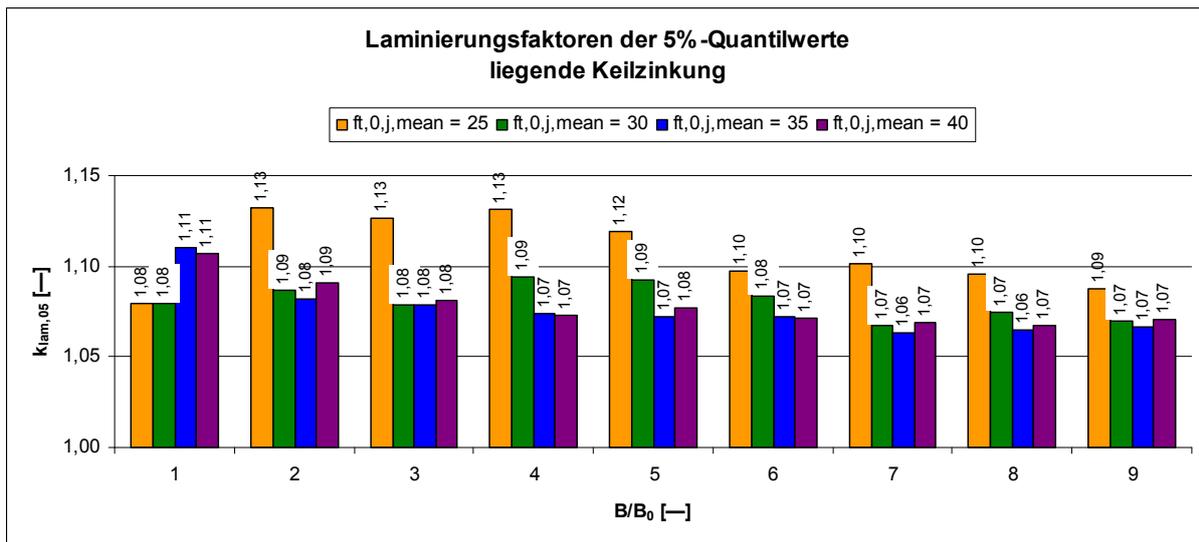
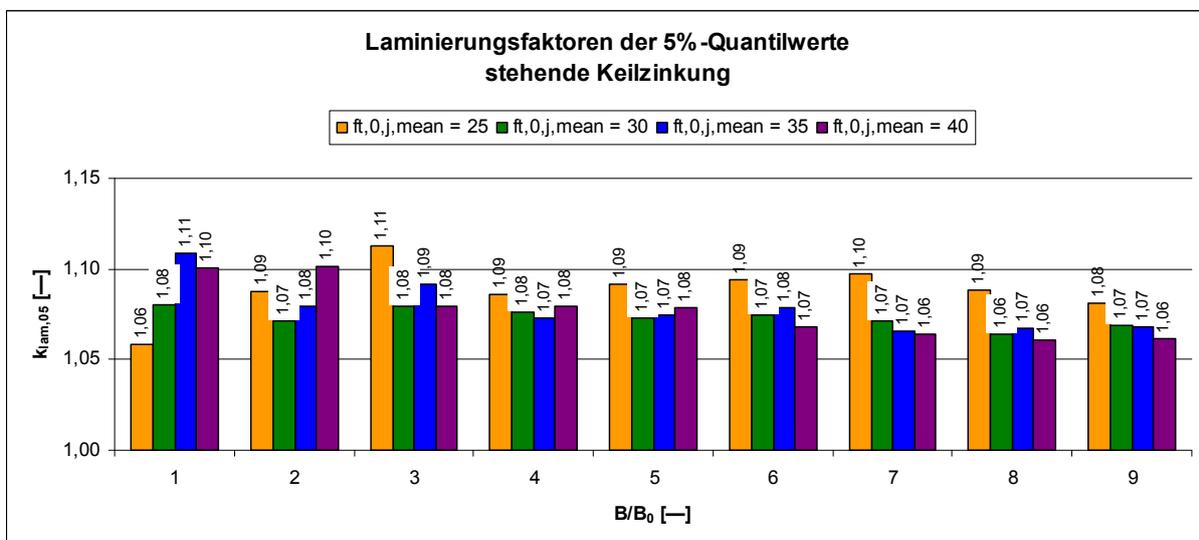


Diagramm 9-49 Verhältniswerte der Mittelwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit stehenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1



**Diagramm 9-50** Verhältniswerte der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit liegenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1



**Diagramm 9-51** Verhältniswerte der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit stehenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1

Aus diesen Diagrammen lässt sich erkennen, dass eine „Vergütung“ infolge der zwei faserparallelen Decklagen des Querschnitts QS 2, wie sie bei den Trägern mit Holzversagen zu beobachten war (siehe 9.1.3.2), auch bei den Trägern mit Keilzinkenversagen vorhanden ist. Bei den höheren Keilzinkenfestigkeiten fallen die Verhältnisfaktoren geringer aus.

## 9.2.6 Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen in Abhängigkeit von den Holzeigenschaften

Mit den bisherigen Simulationen kann die Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen in Abhängigkeit der Keilzinkenzugfestigkeit und den geometrischen Einflussfaktoren (Trägerlänge, Trägerbreite und Belastungsart) angegeben werden. Diese Ergebnisse sind jedoch beschränkt auf mittlere Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindung von 25, 30, 35 und 40 N/mm<sup>2</sup>. Diese Festigkeiten wurden bewusst so gewählt, da es um typische Größenordnungen der Festigkeiten für Keilzinkenverbindungen handelt.

Aufgrund der Abhängigkeit der Keilzinkenzugfestigkeit von Holzeigenschaften der Bretter, kann diese nicht direkt, sondern nur für verschiedene Holzeigenschaften angegeben werden. Mit Hilfe der Gleichungen Glg. 7-4, Glg. 7-8, Glg. 7-11 und Glg. 7-14 wurden für verschiedene Bereiche der Darr-Rohdichte und Elastizitätsmodulen der Bretter die Keilzinkenzugfestigkeiten ermittelt. Für jeden Bereich wurden die Festigkeiten anhand von 2000 simulierten Keilzinkungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-11 und Tabelle 9-12 angegeben.

**Tabelle 9-11 Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm<sup>2</sup>] in Abhängigkeit von der Darr-Rohdichte  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>]**

$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	340 ±15	370 ±15	400 ±15	430 ±15	460 ±15	490 ±15	520 ±15
$f_{t,0,M,j}$	30,44	32,15	34,24	36,18	38,71	41,86	45,46
$f_{t,0,05,j}$	21,04	22,02	23,39	24,9	26,05	27,71	30
$v_{t,0,j}$	18,8	19,2	19,3	18,9	19,9	20,6	20,7

**Tabelle 9-12 Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm<sup>2</sup>] in Abhängigkeit von dem mittleren Brett-Elastizitätsmodul E**

$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	9000 ±1000	11000 ±1000	13000 ±1000	15000 ±1000	17000 ±1000	19000 ±1000
$f_{t,0,M,j}$	30,33	32,34	36,42	40,35	44,63	49,85
$f_{t,0,05,j}$	20,82	22,25	24,59	26,89	29,76	32,37
$v_{t,0,j}$	19,1	19	19,7	20,3	20,3	21,3

Von besonderem Interesse sind jedoch Keilzinkenzugfestigkeiten für bestimmte Festigkeitsklassen wie sie in DIN 1052 [N1] angegeben sind. Für die darin angegebenen Festigkeitsklassen sind jedoch keine zugehörigen Holzeigenschaften angegeben. Die DIN 4074-1 [N2] enthält Sortierklassen mit Angaben zu zulässigen Holzeigenschaften. Mit Hilfe dieser Sortierklassen und der DIN EN 338 [N4] erfolgt dann die Einstufung der Sortierklasse in die jeweilige Festigkeitsklasse nach DIN 1052 [N1]. Die DIN 4074-1 [N2] gilt jedoch nur für visuell sortiertes Holz.

Für visuell sortierte Bretter nach DIN 4074-1 [N2] können zur Ermittlung der charakteristischen Keilzinkenzugfestigkeit die Sortierkriterien für die Äste verwendet werden. Nach DIN 4074-1 [N2] wird die Ästigkeit anders ermittelt, als die Ästigkeit, wie sie in den Gleichungen Glg. 7-4, Glg. 7-5, Glg. 7-11 und Glg. 7-12 verwendet wird. In der Arbeit von GÖRLACHER [32] wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Art, wie die Ästigkeit ermittelt wird, keinen nennenswerten Einfluss hat. Daher erscheint es durchaus gerechtfertigt, die Keilzinkenzugfestigkeit von visuell sortierten Brettern für die Sortierklassen S10 und S13 der DIN 4074-1 [N2] mit Hilfe der Gleichungen aus Abschnitt 7.1.6 und 7.1.7 und der Ästigkeit sowie den zugehörigen Sortiergrenzen der jeweiligen Sortierklasse, zu ermitteln.

Für Bretter die maschinell sortierte werden gibt GÖRLACHER [32] in seiner Arbeit Grenzwerte zur Einstufung in verschiedene Festigkeitsklassen an. Die Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen für visuell sortiertes Holz sind in Tabelle 9-13 und für maschinell sortiertes Holz in Tabelle 9-14 angegeben. In dieser Tabelle sind außerdem noch die Kriterien der Holzeigenschaften angegeben, nach denen die jeweilige Sortierklasse simuliert wurde. Es wurden wiederum die Keilzinkenzugfestigkeiten für jeweils 2000 Simulationen ermittelt.

**Tabelle 9-13 Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm<sup>2</sup>] in Abhängigkeit von verschiedenen Sortierklassen für visuell sortierte Bretter**

Sortierklasse	S7	S7+	S10	S10+	S13
Festigkeitsklasse	C18		C24		C30
Sortierkriterium	$0,50 \leq \text{KAR} \leq 0,67$	$\text{KAR} \leq 0,67$	$0,33 \leq \text{KAR} \leq 0,50$	$\text{KAR} \leq 0,50$	$\text{KAR} \leq 0,33$
$f_{t,0,M,j}$	34,94	34,78	35,08	35,19	35,17
$f_{t,0,05,j}$	23,22	23,36	23,25	23,47	23,17
$v_{t,0,j}$	20,4	20	20,5	20,2	20,7

**Tabelle 9-14 Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [N/mm<sup>2</sup>] in Abhängigkeit von verschiedenen Sortierklassen für maschinell sortierte Bretter**

Sortierklasse	MS10	MS13	MS17
Festigkeitsklasse	C24	C30	C40
Sortierkriterium	$9000 \leq E \leq 12500$	$12500 \leq E \leq 14500$	$14500 \leq E$ und $\text{KAR} \leq 0,33$
$f_{t,0,M,j}$	32,76	37,07	42,11
$f_{t,0,05,j}$	22,32	25,07	27,4
$v_{t,0,j}$	19,4	19,7	21,2

Aus den obigen Tabellen ist zu erkennen, dass bei visuell sortierten Brettern die Festigkeiten der Keilzinkenverbindungen, sowohl was den Mittelwert angeht als auch den 5%-Quantilwert, unabhängig von den Sortierklassen und den damit verbunden Sortierkriterien sind. Die mittlere Keilzinkenzugfestigkeit liegt bei rund 35 N/mm<sup>2</sup>, die charakteristische bei ca. 23,4 N/mm<sup>2</sup>. Dies entspricht exakt den Werten einer rein visuellen Holzsortierung wie sie auch von EHLBECK et al. [21] angegeben wird.

Für die maschinell sortierten Bretter hingegen ergeben sich für die unterschiedlichen Sortierklassen signifikante Unterschiede. In der Regressionsgleichung zur Ermittlung der Keilzinkenzugfestigkeit nach Glg. 7-14 geht der Elastizitätsmodul der Keilzinkenverbindung direkt ein. Da bei der maschinellen Sortierung, anders als bei der visuellen Sortierung, der Elastizitätsmodul der Bretter als Sortierkriterium verwendet wird, ergeben sich somit auch mit den zunehmenden Anforderungen der einzelnen Sortierklassen an den Elastizitätsmodul höhere Festigkeiten für die Keilzinkenverbindungen.

## 9.3 Zusammenstellung der Simulationsergebnisse

Die nachfolgenden Abschnitte fassen die bisherigen Ergebnisse der Simulationsberechnung ohne weitere Bewertung und Diskussion zusammen.

### 9.3.1 Träger mit Holzversagen

Will man den Mittelwert  $f_{m,M,c}$  und den 5%-Quantilwert  $f_{m,05,c}$  der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen berechnen gelten folgende Beziehungen:

$$f_{m,M,c} = k_{IS,M,c} \cdot k_{F,M,c} \cdot k_{B,M,c} \cdot f_{m,M,c}^0 \quad \text{Glg. 9-23}$$

$$f_{m,05,c} = k_{IS,05,c} \cdot k_{F,05,c} \cdot k_{B,05,c} \cdot f_{m,05,c}^0 \quad \text{Glg. 9-24}$$

Hierin bedeuten:

$f_{m,M,c}^0 / f_{m,05,c}^0$  = Mittelwert und charakteristische Biegefestigkeit des Standardträgers mit Holzversagen

$k_{IS,M,c} / k_{IS,05,c}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge

$k_{F,M,c} / k_{F,05,c}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart

$k_{B,M,c} / k_{B,05,c}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite

Der zugehörige Variationskoeffizient  $v_{m,c}$  ergibt sich unter der Annahme, dass die Festigkeitswerte normal verteilt sind, wie folgt:

$$v_{m,c} = \frac{1 - f_{m,05,c} / f_{m,M,c}}{1,645} \quad \text{Glg. 9-25}$$

Die einzelnen Faktoren  $k_i$  der Glg. 9-23 und Glg. 9-24 errechnen sich nach den Folgenden Gleichungen:

Mittelwert		5%-Quantilwert	
$k_{IS,M,c} = \left( \frac{l_S}{l_{S,0}} \right)^{-\beta_{IS,M,c}}$	<b>Glg. 9-26</b>	$k_{IS,05,c} = \left( \frac{l_S}{l_{S,0}} \right)^{-\beta_{IS,05,c}}$	<b>Glg. 9-27</b>
$k_{F,M,c} = \left( \frac{\beta_{F,M,c} + l_Z / l_S}{\beta_{F,M,c} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,M,c}}$	<b>Glg. 9-28</b>	$k_{F,05,c} = \left( \frac{\beta_{F,05,c} + l_Z / l_S}{\beta_{F,05,c} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,05,c}}$	<b>Glg. 9-29</b>
$k_{B,M,c} = m_{B,M,c,i} \cdot \left( \frac{B}{B_0} \right)^{-\beta_{B,M,c,i}}$	<b>Glg. 9-30</b>	$k_{B,05,c} = m_{B,05,c,i} \cdot \left( \frac{B}{B_0} \right)^{\beta_{B,05,c,i}}$	<b>Glg. 9-31</b>
$m_{B,M,c,i} = \begin{cases} 1 & B / B_0 \leq 2 \\ \frac{2^{\beta_{B,M,c,2}}}{2^{\beta_{B,M,c,1}}} & B / B_0 > 2 \end{cases}$	<b>Glg. 9-32</b>	$m_{B,05,c,i} = \begin{cases} 1 & B / B_0 \leq 2 \\ \frac{2^{\beta_{B,05,c,2}}}{2^{\beta_{B,05,c,1}}} & B / B_0 > 2 \end{cases}$	<b>Glg. 9-33</b>

Die Zahlenwerte für die Berechnung der einzelnen Faktoren sind in Tabelle 9-15 und Tabelle 9-16 angegeben.

**Tabelle 9-15 Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen**

	Mittelwert		
	$\beta_{IS,M,c}$	$\beta_{F,M,c}$	$\beta_{B,M,c,i}$
QS 1	0,10	0,12	0,05
QS 2	0,06	0,09	0,05

**Tabelle 9-16 Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen**

	5%-Quantilwert					
	$\beta_{IS,05,c}$	$\beta_{F,05,c}$	$\beta_{B,05,c}$		$m_{B,05,c,i}$	
			B/B <sub>0</sub> ≤ 2	B/B <sub>0</sub> > 2	B/B <sub>0</sub> ≤ 2	B/B <sub>0</sub> > 2
QS 1	0,05	0,11	0,11	0,06	1	1,04
QS 2	0,02	0,07	0,05	0,04	1	1,01

### 9.3.2 Träger mit Keilzinkenversagen

Will man den Mittelwert  $f_{m,M,c,j}$  und den 5%-Quantilwert  $f_{m,05,c,j}$  der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen berechnen gelten folgende Beziehungen:

$$f_{m,M,c,j} = k_{IS,M,c,j} \cdot k_{F,M,c,j} \cdot k_{B,M,c,j} \cdot f_{m,M,c,j}^0 \quad \text{Glg. 9-34}$$

$$f_{m,05,c,j} = k_{IS,05,c,j} \cdot k_{F,05,c,j} \cdot k_{B,05,c,j} \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{Glg. 9-35}$$

Hierin bedeuten:

$$f_{m,M,c,j}^0 / f_{m,05,c,j}^0 = \text{Mittelwert und charakteristische Biegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen}$$

- $k_{IS,M,c,j} / k_{IS,05,c,j}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerlänge
- $k_{F,M,c,j} / k_{IS,05,c,j}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart
- $k_{B,M,c,j} / k_{B,05,c,j}$  = Faktoren zur Beschreibung des Einflusses der Trägerbreite

Der zugehörige Variationskoeffizient  $v_{m,c,j}$  ergibt sich unter der Annahme, dass die Festigkeitswerte normal verteilt sind, wie folgt:

$$v_{m,c,j} = \frac{1 - f_{m,05,c,j} / f_{m,M,c,j}}{1,645} \tag{Glg. 9-36}$$

Die Festigkeitswerte des Standardträgers mit Keilzinkenversagen hängen von den Zugfestigkeiten der Keilzinkenverbindungen ab und können wie folgt berechnet werden:

$$f_{m,c,j,M}^0 = k_1 \cdot \ln(f_{t,0,j,mean}) + k_2 \tag{Glg. 9-37}$$

$$f_{m,c,j,05}^0 = k_1 \cdot \ln(f_{t,0,j,mean}) + k_2 \tag{Glg. 9-38}$$

$$f_{m,c,j,05}^0 = k_1 \cdot f_{t,0,j,mean} + k_2$$

Hierin bedeuten:

- $f_{m,M,c,j}^0 / f_{m,05,c,j}^0$  = Mittelwert und 5%-Quantilwert der Biegefestigkeit des Standardträgers mit Keilzinkenversagen
- $k_1, k_2$  = Faktoren zur Anpassung der Regressionsgleichung
- $f_{t,0,j,meanj}$  = Mittelwert der Keilzinkenzugfestigkeit

Zur Ermittlung der restlichen Faktoren in Gleichungen Glg. 9-34 und Glg. 9-35 können die folgenden Gleichungen verwendet werden:

Mittelwert	5%-Quantilwert
$k_{IS,M,c,j} = m_i \cdot \left( \frac{l_S}{l_{S,0}} \cdot \frac{l_{B,0}}{l_B} \right)^{-\beta_{IS,M,c,j}} \tag{Glg. 9-39}$	$k_{IS,05,c,j} = \left( \frac{l_S}{l_{S,0}} \cdot \frac{l_{B,0}}{l_B} \right)^{-\beta_{IS,05,c,j}} \tag{Glg. 9-40}$
$k_{F,M,c,j} = \left( \frac{\beta_{F,M,c,j} + l_F / l_S}{\beta_{F,M,c,j} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,M,c,j}} \tag{Glg. 9-41}$	$k_{F,05,c,j} = \left( \frac{\beta_{F,05,c,j} + l_F / l_S}{\beta_{F,05,c,j} + 1/3} \right)^{-\beta_{F,05,c,j}} \tag{Glg. 9-42}$
$k_{B,M,c,j} = \left( \frac{B}{B_0} \right)^{-\beta_{B,M,c,j}} \tag{Glg. 9-43}$	$k_{B,05,c,j} = \left( \frac{B}{B_0} \right)^{\beta_{B,05,c,j}} \tag{Glg. 9-44}$

Zur Ermittlung der mittleren Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen sind die notwendigen Werte in der Tabelle 9-17 angegeben.

**Tabelle 9-17 Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)**

$f_{t,0,j,mean}$	$k_1 \cdot \ln(f_{t,0,j,mean}) + k_2$		liegende Keilzinkung			stehende Keilzinkung		
	$k_1$	$k_2$	$\beta_{IS,M,c,j}$	$\beta_{F,M,c,j}$	$\beta_{B,M,c,j}$	$\beta_{IS,M,c,j}$	$\beta_{F,M,c,j}$	$\beta_{B,M,c,j}$
25	8,84	1,04	0,16	0,27	0,02	0,16	0,29	0,03
30			0,09	0,17	0,04	0,10	0,22	0,05
35			0,08	0,17	0,05	0,07	0,18	0,05
40			0,06	0,17	0,04	0,07	0,15	0,04

**Tabelle 9-18 Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)**

		$k_1 \cdot f_{t,0,j,\text{mean}} + k_2 \leq 23,35$			liegende Keilzinkung			stehende Keilzinkung		
$f_{t,0,j,\text{mean}}$	$k_1$	$k_2$	$\beta_{IS,05,c,j}$	$\beta_{F,05,c,j}$	$\beta_{B,M,c,j}$	$\beta_{IS,05,c,j}$	$\beta_{F,05,c,j}$	$\beta_{B,M,c,j}$		
25	0,49	8,65	0,02	0,09	0,07	0,02	0,09	0,06		
30			0,0	0,07	0,05	0,02	0,09	0,06		
35			0,02	0,11	0,06	0	0,11	0,06		
40			0,01	0,10	0,06	0,02	0,10	0,06		

**Tabelle 9-19 Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)**

		$k_1 \cdot \ln(f_{t,0,j,\text{mean}}) + k_2$			liegende Keilzinkung			stehende Keilzinkung		
$f_{t,0,j,\text{mean}}$	$k_1$	$k_2$	$\beta_{IS,M,c,j}$	$\beta_{F,M,c,j}$	$\beta_{B,M,c,j}$	$\beta_{IS,M,c,j}$	$\beta_{F,M,c,j}$	$\beta_{B,M,c,j}$		
25	7,72	6,21	0,11	0,22	0,03	0,11	0,19	0,02		
30			0,08	0,15	0,04	0,08	0,15	0,04		
35			0,07	0,14	0,04	0,06	0,14	0,04		
40			0,06	0,13	0,05	0,06	0,12	0,04		

**Tabelle 9-20 Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)**

		$k_1 \cdot \ln(f_{t,0,j,\text{mean}}) + k_2$			liegende Keilzinkung			stehende Keilzinkung		
$f_{t,0,j,\text{mean}}$	$k_1$	$k_2$	$\beta_{IS,05,c,j}$	$\beta_{F,05,c,j}$	$\beta_{B,05,c,j}$	$\beta_{IS,05,c,j}$	$\beta_{F,05,c,j}$	$\beta_{B,05,c,j}$		
25	9,38	-7,88	0,03	0,12	0,08	0,04	0,10	0,08		
30			0,02	0,08	0,05	0,02	0,09	0,05		
35			0,02	0,12	0,04	0,02	0,09	0,05		
40			0,02	0,09	0,04	0,03	0,07	0,05		

Die Zusammenstellung der Simulationsergebnisse zeigt, dass die Art der Keilzinkung keinen nennenswerten Einfluss auf die verschiedenen Verläufe der Bauteilbiegefestigkeit in Abhängigkeit der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit hat. Da die Simulationsberechnungen für beide Keilzinkentypen mit denselben mittleren Keilzinkenzugfestigkeiten durchgeführt wurden, ist es somit auch nachvollziehbar, dass sich die Ergebnisse nicht gravierend unterscheiden. Die unterschiedlichen Keilzinkenbiegefestigkeiten der beiden Keilzinkungen (Aufgrund der unterschiedlichen Verhältnisfaktoren  $f_{m,j}/f_{t,0,j}$ ) haben keinen bedeutenden Einfluss auf die Bauteilbiegefestigkeit. Für die beiden untersuchten Querschnittstypen QS 1 (1 faserparallele Decklage) und QS 2 (zwei faserparallele Decklagen) ergeben sich hingegen deutlich Unterschiede. Somit lassen sich die Ergebnisse insofern vereinfachen, dass lediglich nach der Art des untersuchten Querschnitts (eine oder zwei faserparallele Decklagen) zu unterscheiden ist.

## 10 Theoretisches Modell zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Brettsperrholz

Aus den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts können jetzt die Biegetragfähigkeiten für beliebig aufgebaute Brettsperrholzträger in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen ermittelt werden und zwar getrennt für Träger mit reinem *Holzversagen* sowie für Träger mit reinem *Keilzinkenversagen*. Da sich in der Praxis jedoch nie ein reines *Holz-* oder *Keilzinkenversagen* bei Brettsperrholzträgern einstellen wird, ist es deshalb erforderlich die Festigkeit zu ermitteln, die sich aus einer Mischung dieser beiden Versagen ergibt.

COLLING [11] hat in seiner Arbeit ein theoretisches Modell vorgestellt, mit dessen Hilfe die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften der beiden unabhängigen „Materialien“ *Holz* bzw. den Brettern und den *Keilzinkenverbindungen* bestimmt werden kann. Mit diesem Modell kann auch die Tragfähigkeit von Brettsperrhölzern in Abhängigkeit der beiden „Materialien“ *Holz* und *Keilzinkenverbindungen* ermittelt werden. Da das Modell als Eingangsparameter lediglich die Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ *Holz* und *Keilzinkenverbindung* benötigt, ist es deshalb unerheblich, ob diese Verteilung von Brettschichtholzträgern oder von Brettsperrholzträgern stammt.

Zur Überprüfung des theoretischen Modells hat COLLING [11] zahlreiche Biegeversuche in Bauteilgröße durchgeführt. Die Versuche haben das von ihm vorgestellte Modell als zutreffend bestätigt. Da wie bereits oben erwähnt lediglich Verteilungen von Festigkeiten für das Modell benötigt werden, die im vorherigen Abschnitt ermittelt wurden, werden die Ergebnisse, die sich nach diesem theoretischen Modell für Brettsperrholzträger ergeben nicht mittels Biegeprüfungen an Bauteil überprüft.

Da das theoretische Modell nach COLLING [11] für die Bestimmung der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern eine entscheidende Rolle spielt, wird es deshalb nachfolgend zum besseren Verständnis des Gesamtzusammenhangs in verkürzter Form wiedergegeben.

## 10.1 Aufteilung des Endproduktes Brettsperrholz in die beiden „Materialien“ Keilzinkenverbindungen und Holz

Anhand der drei folgenden, rein hypothetischen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Trägertypen wird das von COLLING [11] vorgestellte theoretische Modell näher erläutert:

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

Die Träger vom Typ I weisen ausschließlich Holzversagen als Bruchursache auf, da in dem Träger keine Keilzinkenverbindungen vorhanden sind. Die Festigkeitsverteilung dieser Brettsperrholzträger ergibt somit die Festigkeitsverteilung für das „Material“ *Holz*. Diese Festigkeitsverteilung gilt jedoch nur für die gegebene Lastanordnung, Trägergröße und Holzqualität, für die die Festigkeiten dieser Versuchsreihe ermittelt wurden. Die im Weiteren verwendete Bezeichnung „Material“ *Holz* bezeichnet somit einen Brettsperrholzträger, der ausschließlich Aufgrund eines Holzversagens zu Bruch gingen.

Die Träger vom Typ II (durchschnittliche Keilzinkenfestigkeit) weisen i. d. R. sowohl *Holz-* (Versagen im Bereich von Ästen) als auch *Keilzinkenversagen* auf. Bei diesem Trägertyp können die hohen Tragfähigkeiten von fehlerfreien Brettabschnitten nicht ausgenutzt werden, da vorher die Keilzinkenverbindungen versagen, weshalb die Festigkeiten des Trägers vom Typ II geringer sind als die des vorherigen Trägertyps. Die Festigkeitsverteilung dieses Trägertyps entspricht somit einer Mischung aus den Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ *Holz* und *Keilzinkenverbindungen*.

Bei dem Träger vom Typ III (geringe Keilzinkenfestigkeit) geht in der überwiegenden Zahl der Fälle das Versagen von den *Keilzinkenverbindungen* aus, weshalb diese Träger die geringsten Tragfähigkeiten aufweisen. Die Festigkeitsverteilung dieser Träger entspricht damit näherungsweise der „wirklichen“ Verteilung des „Materials“ *Keilzinkenverbindungen*.

Die nachfolgende Aufstellung zeigt nochmals, welcher Trägertyp die Festigkeitsverteilung für die beiden „Materialien“ liefert.

- Typ I liefert Festigkeitsverteilung für das „Material“ *Holz*
- Typ II liefert Festigkeitsverteilung für die Mischung der beiden „Materialien“ *Holz* und *Keilzinkenverbindung*
- Typ III liefert Festigkeitsverteilung für das „Material“ *Keilzinkenverbindung*

Die obigen Ausführungen zeigen, dass neben den absoluten Festigkeiten der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen die Festigkeitseigenschaften des Endproduktes Brettsperrholz auch entscheidend von Verhältnissen der Festigkeiten der beiden „Materialien“ abhängt. Das schwächere der beiden „Materialien“ tritt umso häufiger als Versagensursache auf, je größer der Unterschied zwischen den Festigkeiten der „Materialien“ ist, wodurch sich die Tragfähigkeit der Brettsperrholzträger immer mehr der Tragfähigkeit des schwächeren „Materials“ annähert.

Der nachfolgende Abschnitt erläutert, wie auf statischem Wege die Tragfähigkeit des Endproduktes Brettsperrholz ermittelt werden kann, wenn die Festigkeitsverteilungen der beiden beeinflussenden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen bekannt sind.

Eine versuchstechnische Bestimmung der „wirklichen“ Festigkeitsverteilungen der beiden „Materialien“ ist äußerst schwierig. Anhand von Trägern ohne Keilzinkenverbindungen kann zwar prinzipiell die Festigkeitsverteilung des „Materials“ Holz ermittelt werden, sobald jedoch die Festigkeit in Abhängigkeit der Trägergröße bestimmt werden soll, müssen ab einer bestimmten Trägergröße die Bretter aufgrund der begrenzten Brettlängen zwangsläufig keilgezinkt werden. Damit können Keilzinkenversagen als Bruchursache nicht mehr ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund kann die Festigkeitsverteilung für das „Material“ Holz nur an Trägern mit begrenzten Abmessungen ermittelt werden.

Um die Festigkeitsverteilung des „Materials“ Keilzinkenverbindung in Versuchen zu ermitteln müssten Träger mit sehr schlechten Keilzinkenverbindungen bei gleichzeitig sehr hoher Holzqualität (Festigkeit) geprüft werden. Da die Keilzinkenfestigkeit jedoch mit steigender Holzqualität ebenfalls zunimmt, ist es deshalb nicht möglich die Festigkeitsverteilung des „Materials“ Keilzinkenverbindung mittels Versuchen zu bestimmen.

Mit dem in Abschnitt 7 vorgestellten Simulations- und Rechenprogramm ist es jedoch möglich, die Holzqualität und die Keilzinkenfestigkeit so zu simulieren, dass die gewünschte Bruchursache (Holz- oder Keilzinkenversagen) erzwungen werden kann. Damit ist es also möglich, für die beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen die jeweiligen Festigkeitsverteilungen zu ermitteln. Diese wurden für die beiden „Materialien“ im vorherigen Abschnitt ermittelt.

## 10.2 Bestimmung der Tragfähigkeit von Brettsperrholzträgern in Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen

Die Ausführungen des vorherigen Abschnittes zeigen, dass sich die Tragfähigkeit von Brettsperrholzträgern an der geringeren Tragfähigkeit der beiden „Materialien“ orientiert. Der Brettsperrholzträger wird somit in dem „Material“ mit der geringsten Tragfähigkeit versagen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Brettsperrholzträger eine bestimmte Spannung  $\sigma$  „überlebt“, entspricht somit der Wahrscheinlichkeit, dass bei dieser Spannung weder ein Holz- noch ein Keilzinkenversagen eintritt COLLING [11]. Dieser Zusammenhang kann mit der aus der Statistik bekannten Zuverlässigkeitstheorie auch rechnerisch erfasst werden (siehe z. B. STOYAN [51]).

Die Überlebens- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit des Brettsperrholzträgers ergibt sich wie folgt:

Überlebenswahrscheinlichkeit

$$1 - H_{BSP}(\sigma) = (1 - H_{Holz}(\sigma)) \cdot (1 - H_{KZV}(\sigma)) \quad \text{Glg. 10-1}$$

Versagenswahrscheinlichkeit

$$H_{BSP}(\sigma) = H_{Holz}(\sigma) + H_{KZV}(\sigma) - H_{Holz}(\sigma) \cdot H_{KZV}(\sigma) \quad \text{Glg. 10-2}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 H_{BSP}(\sigma) &= \text{Versagenswahrscheinlichkeit des Brettsperrholzträgers bei der Spannung } \sigma \\
 H_{Holz}(\sigma) &= \text{Versagenswahrscheinlichkeit des „Materials“ Holz bei der Spannung } \sigma \\
 H_{KZV}(\sigma) &= \text{Versagenswahrscheinlichkeit des „Materials“ Keilzinkenverbindung bei der} \\
 &\quad \text{Spannung } \sigma
 \end{aligned}$$

$H$  bezeichnet dabei die Verteilungsfunktion der Biegefestigkeit für das jeweils zugehörige „Material“.

Die Beziehung der Glg. 10-1 zeigt, dass der Quantilwert der Brettsperrholzverteilung höchstens den kleineren Wert der beiden Verteilungen annehmen kann. Damit liegen die Quantilwerte der Brettsperrholzverteilung immer unterhalb des kleineren Wertes der beiden „Materialien“.

Aus diesem Grund werden die Festigkeitswerte der Brettsperrholzträger auf die entsprechenden Werte des „Materials“ mit dem kleineren 5%-Quantilwert bezogen, auch wenn der Mittelwert über dem des anderen „Materials“ liegt. Das „Material“ mit dem kleineren 5%-Quantilwert wird nachfolgend als das „schwächere“ „Material“ bezeichnet. Außerdem wird zur Unterscheidung bei den charakteristischen Werten der beiden „Materialien“ für das „schwächere“ der Index 1 und für das „stärkere“ der Index 2 verwendet.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird außerdem aus Gründen der Vereinfachung ebenfalls davon ausgegangen, dass die Verteilungsfunktionen  $H_{Holz}$  und  $H_{KZV}$  der beiden „Materialien“ jeweils Gauß-Normalverteilt sind mit den zugehörigen bekannten Mittelwerten  $M$  und Variationskoeffizienten  $v$ .

Mit der bekannten Standardtransformation (siehe z. B. PAPULA [45]) kann die Versagenswahrscheinlichkeit eines Brettsperrholzträgers (Glg. 10-2) auch mit Hilfe der Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung  $\Phi$  angegeben werden.

Für die charakteristische Biegefestigkeit  $f_{m,05,BSP}$  (5%-Quantilwert) und den Medianwert  $f_{m,50,BSP}$  der Brettsperrholzträger ergeben sich dann folgende Beziehung:

$$f_{m,05,BSP} = \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,05}}{f_{m,M_1}} - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,05}}{f_{m,M_2}} - 1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,05}}{f_{m,M_1}} - 1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,05}}{f_{m,M_2}} - 1}{v_2}\right) \quad \text{Glg. 10-3}$$

$$f_{m,50,BSP} = \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,50}}{f_{m,M_1}} - 1}{v_1}\right) + \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,50}}{f_{m,M_2}} - 1}{v_2}\right) - \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,50}}{f_{m,M_1}} - 1}{v_1}\right) \cdot \Phi\left(\frac{\frac{f_{m,50}}{f_{m,M_2}} - 1}{v_2}\right) \quad \text{Glg. 10-4}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned}
 \Phi &= \text{Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung} \\
 f_{m,05,BSP} &= \text{5\%-Quantilwert der Biegefestigkeit des Brettsperrholzträgers} \\
 f_{m,50,BSP} &= \text{Medianwert der Biegefestigkeit des Brettsperrholzträgers} \\
 f_{m,M_1}, v_1 &= \text{Mittelwert und Variationskoeffizient der Biegefestigkeit des „schwächeren“} \\
 &\quad \text{Materials} \\
 f_{m,M_2}, v_2 &= \text{Mittelwert und Variationskoeffizient der Biegefestigkeit des „stärkeren“} \\
 &\quad \text{Materials}
 \end{aligned}$$

Je nachdem, wie eng die Verteilungsfunktionen der beiden „Materialien“ beieinander liegen und wie groß der Überschneidungsbereich ist, ergibt sich hiervon abhängig auch jeweils eine andere Verteilungsfunktion für die Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger. Zur Beschreibung dieses Einflusses werden als beschreibende Größen das Verhältnis  $f_{m,05,1}/f_{m,05,2}$  der beiden 5%-Quantilwerte, das Verhältnis  $f_{m,M_1}/f_{m,M_2}$  der beiden Mittelwerte sowie der Variationskoeffizient  $v_1$  des schwächeren „Materials“ gewählt.

Mit den Beziehung der Gleichungen Glg. 10-5 und Glg. 10-6 für die 5%-Quantilwerte der beiden „Materialien“ *Holz* und *Keilzinkenverbindungen*

$$f_{m,05,1} = f_{m,M,1} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1) \quad \text{Glg. 10-5}$$

$$f_{m,05,2} = f_{m,05,2} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_2) \quad \text{Glg. 10-6}$$

ergeben sich dann für den 5%-Quantilwert und den Medianwert der Brettsperrholzbiegefestigkeit dieselben Gleichungen wie sie in COLLING [11] angegeben sind. Diese lauten:

$$f_{m,05,BSP} = \Phi \left( \frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_{05} - 1}{f_{m,05,1} \cdot v_1} \right) + \Phi \left( 1,645 \cdot \frac{\frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot f_{m,M,1} \cdot \sigma_{05} - 1}{f_{m,05,1}}}{1 - \frac{f_{m,M,1}/f_{m,M,2}}{f_{m,05,1}/f_{m,05,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)} \right) - \Phi \left( \frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot \sigma_{05} - 1}{f_{m,05,1} \cdot v_1} \right) \cdot \Phi \left( 1,645 \cdot \frac{\frac{(1 - 1,645 \cdot v_1) \cdot f_{m,M,1} \cdot \sigma_{05} - 1}{f_{m,05,1}}}{1 - \frac{f_{m,M,1}/f_{m,M,2}}{f_{m,05,1}/f_{m,05,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)} \right) \quad \text{Glg. 10-7}$$

$$f_{m,50,BSP} = \Phi \left( \frac{\frac{\sigma_{50}}{f_{m,M,1}} - 1}{v_1} \right) + \Phi \left( 1,645 \cdot \frac{\frac{\sigma_{05} \cdot f_{m,M,1}}{f_{m,M,1}} - 1}{1 - \frac{f_{m,M,1}/f_{m,M,2}}{f_{m,05,1}/f_{m,05,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)} \right) - \Phi \left( \frac{\frac{\sigma_{50}}{f_{m,M,1}} - 1}{v_1} \right) \cdot \Phi \left( 1,645 \cdot \frac{\frac{\sigma_{50} \cdot f_{m,M,1}}{f_{m,M,1}} - 1}{1 - \frac{f_{m,M,1}/f_{m,M,2}}{f_{m,05,1}/f_{m,05,2}} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_1)} \right) \quad \text{Glg. 10-8}$$

Der Verlauf der Verhältnisswerte  $f_{m,05,BSP}/f_{m,05,1}$  und  $f_{m,50,BSP}/f_{m,M,1}$  sind in COLLING [11] angegeben.

Die wichtigsten Feststellungen, die sich aus diesen Diagrammen ergeben, werden nachfolgend stichpunktartig aufgeführt. Eine ausführliche Erläuterung der Diagramme ist ebenfalls in COLLING [11] zu finden.

- 5%-Quantil- und Medianwert des BSP orientiert sich stark am „schwächeren“ Material
- Verhältnisswert  $f_{m,05,BSP}/f_{m,05,1}$  bzw.  $f_{m,50,BSP}/f_{m,50,1}$  ergibt sich für  $f_{m,05,1}/f_{m,05,2} < 0,5$  praktisch zu 1, d. h. Biegefestigkeit des Brettsperrholzes entspricht der Biegefestigkeit des „schwächeren“ Materials
- 5%-Quantil- und Medianwert des BSP ist unempfindlich bezüglich der Eingangswerte  $f_{m,05,1}/f_{m,05,2}$ ,  $f_{m,M,1}/f_{m,M,2}$  und  $v_1$

Sind die Kenngrößen der Festigkeitsverteilungen für die beiden „Materialien“ *Holz* und *Keilzinkenverbindungen* bekannt, so lassen sich mit diesem Verfahren auch die 5%-Quantil- und Medianwerte des Endproduktes Brettsperrholz bestimmen.

## 10.3 Bestimmung der Auftretenshäufigkeit einer bestimmten Versagensart

Neben der Ermittlung der Festigkeitswerte für das Endprodukt Brettsperrholz kann auch die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, mit der eines der beiden „Materialien“ *Holz* und *Keilzinkenverbindungen* versagt. COLLING [11] gibt hierfür folgende Gleichung an:

$$P_2 = \Phi \left( \frac{f_{m,M,1} - f_{m,M,2}}{\sqrt{s_1^2 - s_2^2}} \right) \quad \text{Glg. 10-9}$$

Hierin bedeuten:

- $P_2$  = Wahrscheinlichkeit für das Versagen des „stärkeren“ Materials 2
- $\Phi$  = Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung
- $f_{m,M,1}, s_1$  = Mittelwert und Standardabweichung des „schwächeren“ Materials
- $f_{m,M,2}, s_2$  = Mittelwert und Standardabweichung des „stärkeren“ Materials

## 10.4 Zahlenbeispiel

Das nachfolgende Zahlenbeispiel soll helfen, das in den vorherigen Abschnitten in gekürzter Form vorgestellte Modell von COLLING [11] besser zu verstehen.

Ausgehend von dem Standardträger mit dem Querschnitt QS 1 mit einer Holzqualität von S 10 und einer mittleren Keilzinkenzugfestigkeit von  $f_{t,0j,mean} = 25 \text{ N/mm}^2$  bei einem Variationskoeffizienten von  $v_{t,0j} = 0,15$  ergibt sich für das „Material“ Holz nach Tabelle 9-10 und für das „Material“ Keilzinkenverbindung nach Diagramm 9-14 und Diagramm 9-15 folgende Eingangskennwerte:

**Tabelle 10-1** Eingangswerte für das Zahlenbeispiel zur Erläuterung des theoretischen Modells

Material	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	5%-Quantilwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Variationskoeffizient v [—]	Standardabweichung s <sup>1</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
Holz	$f_{m,mean,c} = 30,6$	$f_{m,05,c} = 22,5$	$v_{Holz} = 0,14$	$s_{Holz} = 4,28$
Keilzinkenverbindung	$f_{m,mean,c,j} = 29,0$	$f_{m,05,c,j} = 20,5$	$v_{KZV} = 0,15$	$s_{KZV} = 4,35$

<sup>1</sup>  $s = v \cdot m$

In diesem Beispiel ist die Keilzinkung das „schwächere“ Material, womit sich folgende Eingangswerte für das Modell ergeben:

$$x_{05,1}/x_{05,2} = 20,5/22,5 = 0,91 \quad m_1/m_2 = 29,0/30,6 = 0,95 \quad v_1 = 0,15$$

Mit den Diagrammen aus COLLING [11] ergeben sich damit folgende Kennwerte für die Biegefestigkeit des Brettsperrholzträgers:

$$f_{m,05} = 0,98 \cdot 20,5 = 20,1 \quad f_{m,50} = 0,94 \cdot 29,0 = 27,3$$

Nach Glg. 10-9 ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Holzversagens zu:

$$P_2 = \Phi \left( \frac{29,0 - 30,6}{\sqrt{4,28^2 + 4,35^2}} \right) = \Phi(-0,262) = 0,40$$

Damit tritt in ca. 40% der Fälle ein Holzversagen ein, in den restlichen 60% der Fälle ist die Bruchursache das Versagen einer Keilzinkenverbindung.

Obwohl die beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindung relativ eng beieinander liegen orientiert sich die Biegefestigkeit des Brettsperrholzes hauptsächlich an dem „schwächeren“ Material Keilzinkenverbindung.

## 11 Bemessungsvorschlag

Bei allen Trägerversuchen, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wurden, liegen die Tragfähigkeiten der Träger mit Keilzinkenversagen jeweils unter den Festigkeitswerten der Träger mit Holzversagen (siehe Abschnitt 9). Dies gilt sowohl für die 5%-Quantilwerte als auch die zugehörigen Mittelwerte. Wie bei Brettschichtholzträgern hängt auch dies mit der größeren Streuung der Biegefestigkeit bei den Trägern mit Keilzinkenversagen zusammen. COLLING [11] gibt hierfür in seiner Arbeit folgende Erklärung:

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

Aufgrund dieser Aussage und der Tatsache, dass die Festigkeiten von Trägern mit Keilzinkenversagen stets kleinere Festigkeitswerte aufweisen als Träger mit Holzversagen, kann die charakteristische Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger ausschließlich in Abhängigkeit der 5%-Quantilwerte des „Materials“ Keilzinkenverbindung beschrieben werden.

Aufbauend auf den in den vorherigen Abschnitten ermittelten Ergebnissen wird ein Konzept zur Bemessung von Brettsperrholzträgern vorgestellt. Hierbei wird zwischen Anforderungen an die Berücksichtigung der Einflussparameter für beliebige Brettsperrholzträger ausgehend von der Tragfähigkeit des Standardträgers, die Qualität der Brettsperrholzträger und der Ermittlung der relevanten Bemessungsspannung unterschieden. Zunächst wird auf die Tragfähigkeit des Standardbrettsperrholzträgers eingegangen.

### 11.1 Tragfähigkeit des Standardbrettsperrholzträgers

Anhand der Simulationsrechnungen aus Abschnitt 9 ergibt sich die charakteristische Biegefestigkeit  $f_{m,05}^0$  für die Standardträger (siehe Bild 9-1 und Bild 9-2) in Abhängigkeit der Keilzinkenzugfestigkeit in Anlehnung an Glg. 9-38 und aus Tabelle 9-18 und Tabelle 9-20 zu:

$$QS1: f_{m,05}^0 = 0,49 \cdot f_{t,0,j,mean} + 8,65 \leq 23,35 \quad \text{Glg. 11-1}$$

$$QS2: f_{m,05}^0 = 9,38 \cdot \ln(f_{t,0,j,mean}) - 7,88 \quad \text{Glg. 11-2}$$

Hierin bedeuten:

$$\begin{aligned} f_{m,05}^0 &= \text{charakteristische Biegefestigkeit des Standardträgers} \\ f_{t,0,j,meanj} &= \text{Mittelwert der Keilzinkenzugfestigkeit mit einem Variationskoeffizienten von} \\ & \quad v_{t,0,j} = 15\% \end{aligned}$$

Der oben angegebene Variationskoeffizient von  $v_{t,0,j} = 0,15$  für die Keilzinkenzugfestigkeit wurde auch bei den Simulationsrechnungen von Abschnitt 9.2.6 gewählt und liegt i. A. auch von geprüften Keilzinkenverbindungen in dieser Größenordnung. Mit der Gleichung Glg. 11-1 bzw. Glg. 11-2 und einer gegebenen Keilzinkenzugfestigkeit kann die Biegefestigkeit für den Standardbrettsperrholzträger angegeben werden.

## 11.2 Einflussparameter für beliebige Brettsperrholzträger

Mit der Glg. 9-38 und den zugehörigen Gleichungen Glg. 9-40, Glg. 9-42 und Glg. 9-44 für die einzelnen Faktoren ergibt sich folgende Beziehung zur Ermittlung der charakteristischen Biegefestigkeit  $f_{m,k,c}$  eines beliebigen Brettsperrholzträgers:

$$f_{m,k,c} = k_{IS,05,c,j} \cdot k_{F,05,c,j} \cdot k_{B,05,c,j} \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{Glg. 11-3}$$

Für die einzelnen Faktoren der Glg. 11-3 sind noch die zugehörigen Exponenten  $\beta_{IS,05,c,j}$ ,  $\beta_{F,05,c,j}$ ,  $\beta_{B,05,c,j}$  aus Tabelle 9-18 und Tabelle 9-20 zu ermitteln. In Abschnitt 9.3.2 wurde festgestellt, dass die Faktoren unabhängig von der Art der Keilzinkenverbindung sind. Sie liegen für beide Keilzinkentypen in der gleichen Größenordnung, so dass für die weitere Betrachtung nicht zwischen liegender oder stehender Keilzinkenverbindung zu unterscheiden ist. Die nachfolgend verwendeten Exponenten sind wie folgt:

Für QS 1:  $\beta_{IS,05,c,j} = 0,02$  /  $\beta_{F,05,c,j} = 0,11$  /  $\beta_{B,05,c,j} = 0,06$

Für QS 2:  $\beta_{IS,05,c,j} = 0,02$  /  $\beta_{F,05,c,j} = 0,12$  /  $\beta_{B,05,c,j} = 0,04$

Mit diesen Exponenten, den Gleichungen Glg. 9-40, Glg. 9-42 und Glg. 9-44 sowie den Werten  $l_{S,0} = 5400$  mm,  $l_{B,0} = 4000$  mm und  $B_0 = 150$  mm, die dem Standardträger entsprechen, ergibt sich dann für die charakteristische Biegefestigkeit  $f_{m,k,c}$  eines beliebigen Brettsperrholzträgers:

$$f_{m,k,c} = \left( \frac{l_S}{5400} \cdot \frac{4000}{l_B} \right)^{-0,02} \cdot k_F \cdot \left( \frac{B}{150} \right)^{0,06} \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{für QS 1}$$

$$f_{m,k,c} = \left( \frac{l_S}{5400} \cdot \frac{4000}{l_B} \right)^{-0,02} \cdot k_F \cdot \left( \frac{B}{150} \right)^{0,04} \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{für QS 2}$$

**Glg. 11-4**

In der obigen Gleichung entspricht  $l_S$  der Stützweite,  $B$  der Breite des betrachteten Trägers. Für  $l_B$  ist die mittlere Brettlänge der eingebauten Bretter einzusetzen. Während die Länge des Trägers sowie die Breite zum Zeitpunkt der Bemessung bekannt sind, ist der Wert für die mittlere Brettlänge jedoch meistens nicht bekannt. Dieser Faktor hat jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit des Trägers. Werden die Bretter in dem Herstellenden Betrieb maschinell sortiert, werden diese ungekürzt verarbeitet, weshalb in diesem Fall mit einem Faktor von  $l_{B,0}/l_B = 1$  gerechnet werden darf. Werden die Bretter hingegen visuell sortiert, so werden große Äste herausgeschnitten und an diesen Stellen mittels Keilzinkungen wieder verbunden. Damit enthält ein Träger, der aus visuell sortierten Brettern besteht mehr Keilzinkungen als ein Träger gleicher Länge, der mit maschinell sortierten Brettern hergestellt wurde. Für Träger mit visuell sortierten Brettern kann mit einem pauschalen Abminderungsfaktor von z.B. ( $l_{B,0}/l_B \approx 4/3^{-0,02} = 0,99$ ) für den Querschnittstyp QS<sup>1</sup> und den Querschnitt QS2<sup>2</sup> gerechnet werden.

Bei Brettsperrholzträgern ist liegt die Stützweite sehr häufig in dem Bereich von 5,40 m. I. d. R. weisen Brettsperrholzträger die flachkant auf Biegung beansprucht werden, wie z. B. bei Decken, mehrere nebeneinander liegende Lamellen/Bretter auf. Ausgehend von diesen typischen Randbedingungen ergibt sich dann die Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern wie folgt:

<sup>1</sup> QS1 – 1 faserparallele Decklage

<sup>2</sup> QS2 – 2 faserparallele Decklagen

$$f_{m,k,c} = \left( \frac{5,4}{5,4} \cdot \frac{4}{3} \right)^{-0,02} \cdot k_F \cdot \left( \frac{3 \cdot 150}{150} \right)^{0,06} \cdot f_{m,05}^0 = 1,06 \cdot k_F \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{für QS1}$$

**Glg. 11-5**

$$f_{m,k,c} = \left( \frac{5,4}{5,4} \cdot \frac{4}{3} \right)^{-0,02} \cdot k_F \cdot \left( \frac{3 \cdot 150}{150} \right)^{0,04} \cdot f_{m,05}^0 = 1,03 \cdot k_F \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{für QS2}$$

Der Faktor  $k_F$  zur Beschreibung des Einflusses der Belastungsart aus Abschnitt 9.2.4 gilt lediglich für eine Belastung von zwei Einzellasten mit einem beliebigen Abstand der Lasten  $l_F$ . Sollen jedoch Lastanordnungen anderer Art erforderlich sein, so kann die Ermittlung des Faktors  $k_F$  über einen Völligkeitsbeiwert  $\lambda$ , wie er in COLLING [9] und COLLING [10] angegeben ist, bestimmt werden. Für eine konstante Streckenlast mit parabelförmiger Momentenverteilung ergibt sich der Faktor  $k_F$  zu:

$$k_F = \left( \frac{0,345 + \beta - 0,027/\beta + 0,0013/\beta^2}{\beta + 1/3} \right)^{-\beta} \quad \text{Glg. 11-6}$$

Die zu der obigen Gleichung zugehörigen Exponenten für die beiden Querschnittstypen QS1<sup>1</sup> und QS2<sup>2</sup> betragen  $\beta_{F,05,c,j} = 0,11$  bzw.  $\beta_{F,05,c,j} = 0,14$ . Mit diesen Exponenten ergeben sich dann folgende Einflussfaktoren für Träger, die mit einer konstanten Linienlast beansprucht werden:

$$k_F = \left( \frac{0,345 + 0,11 - 0,027/0,11 + 0,0013/0,11^2}{0,11 + 1/3} \right)^{-0,11} = 1,04 \quad \text{für QS1}$$

**Glg. 11-7**

$$k_F = \left( \frac{0,345 + 0,12 - 0,027/0,12 + 0,0013/0,12^2}{0,12 + 1/3} \right)^{-0,12} = 1,04 \quad \text{für QS2}$$

Unabhängig vom gewählten Exponenten  $\beta_{F,05,c,j}$  ergibt sich der Faktor  $k_F$  zu 1,04. Träger, die mit einer konstanten Linienlast beansprucht werden, haben somit eine um ca. 4% höhere charakteristische Biegefestigkeit als ein vergleichbarer Träger mit einer Belastung in den Drittelpunkten.

Mit den bisherigen Ausführungen von oben, kann nun die charakteristische Biegefestigkeit eines beliebigen Brettsperrholzträgers aus visuell sortierten Brettern, mit einer üblichen Trägerlänge von 5,40 m und 3 nebeneinander liegenden Brettern unter zu Hilfenahme der charakteristischen Biegefestigkeit des Bezugsträgers ermittelt werden. Für einen Träger unter konstanter Linienlast ergibt sich somit folgende Gleichung:

$$f_{m,k,c} = \underbrace{1,00}_{k_{IS}} \cdot \underbrace{0,95}_{k_{IB}} \cdot \underbrace{1,04}_{k_F} \cdot \underbrace{1,07}_{k_B} \cdot f_{m,05}^0 = 1,06 \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{für QS1}$$

**Glg. 11-8**

$$f_{m,k,c} = \underbrace{1,00}_{k_{IS}} \cdot \underbrace{0,95}_{k_{IB}} \cdot \underbrace{1,04}_{k_F} \cdot \underbrace{1,04}_{k_B} \cdot f_{m,05}^0 = 1,03 \cdot f_{m,05,c,j}^0 \quad \text{für QS2}$$

<sup>1</sup> QS1 – 1 faserparallele Decklage

<sup>2</sup> QS2 – 2 faserparallele Decklagen

### 11.3 Anforderungen an die Keilzinkenfestigkeit

Die charakteristische Biegefestigkeit des Standardträgers wird aus der mittleren Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen ermittelt.

Bei der Produktion von Brettspertholz werden, wie bereits vorher erwähnt, zurzeit überwiegend visuell sortierte Bretter mit einer Ästigkeit kleiner gleich 0,5 verwendet. Für visuell sortierte Bretter beträgt die mittlere Keilzinkenzugfestigkeit  $f_{t,0,j,mean} = 35 \text{ N/mm}^2$ . Siehe hierzu auch Abschnitt 9.2.6.

Mit dieser mittleren Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung ergibt sich die charakteristische Biegefestigkeit für die beiden Standardträger zu:

$$f_{m,05,c,j}^0 = 23,35 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS1} \quad (f_{t,0,j,mean} > 30 \text{ N/mm}^2) \quad \text{Glg. 11-9}$$

$$f_{m,05,c,j}^0 = 9,38 \cdot \ln(f_{t,0,j,mean}) - 7,88 = 9,38 \cdot \ln(35) - 7,88 = 25,5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS2}$$

Soll jedoch umgekehrt die charakteristische Biegefestigkeit des Bezugsträgers festgelegt werden, kann mittels der Gleichung Glg. 11-10 die mindestens erforderliche mittlere Keilzinkenzugfestigkeit ermittelt werden. Soll die charakteristische Biegefestigkeit des Standardträgers beispielsweise  $f_{m,k,c}^0 = 24 \text{ N/mm}^2$  betragen muss die mittlere Keilzinkenzugfestigkeit mindestens folgende Festigkeiten aufweisen:

$$f_{t,0,j,mean} \geq \frac{f_{m,05,c,j}^0 - 8,65}{0,49} = \frac{24 - 8,65}{0,49} = 31,3 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS1} \quad \text{Glg. 11-10}$$

$$f_{t,0,j,mean} \geq \exp\left(\frac{f_{m,05,c,j}^0 + 7,88}{9,38}\right) = \exp\left(\frac{24 + 7,88}{9,38}\right) = 29,9 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS2}$$

In den Zulassungen von Brettspertholz (siehe z.B. [Z2]) werden im Rahmen der werkseitigen Produktionskontrolle und der zuständigen Fremdüberwachung kontinuierliche Keilzinkenbiegeprüfungen verlangt, um sicherzustellen, dass die in den Zulassungen geforderten Werte auch eingehalten werden.

Da es für die Betriebe jedoch deutlich aufwändiger und schwieriger ist, die charakteristische Keilzinkenzugfestigkeit direkt zu ermitteln als die charakteristische Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen, wird vorgeschlagen, die Zugfestigkeit über einen Verhältniswert zwischen Biegefestigkeit und Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung zu ermitteln. Dieses Vorgehen haben auch COLLING [11] und EHLBECK/COLLING [19] in ihren Arbeiten vorgeschlagen.

Im Abschnitt 3.7 ergaben sich für die beiden geprüften Keilzinkentypen – liegende und stehende – folgende Verhältnisfaktoren zwischen Keilzinkenbiegefestigkeit und Keilzinkenzugfestigkeit:

**Tabelle 11-1 Verhältnis zwischen Keilzinkenbiegefestigkeit und Keilzinkenzugfestigkeit für die geprüften Keilzinkentypen „liegend“ und „stehend“ aus Abschnitt 3.7**

Verhältnis	Biegefestigkeit zu Zugfestigkeit		Zugfestigkeit zu Biegefestigkeit	
	$f_{m,j} / f_{t,0,j}$		$f_{t,0,j} / f_{m,j}$	
Keilzinkung	liegend	stehend	liegend	stehend
Mittelwert	1,31	1,60	0,76	0,63

Diese Werte gelten jedoch nur für den sehr geringen Stichprobenumfang der Keilzinkungen. Mit diesen Verhältnisfaktoren lässt sich nun die mindestens erforderliche mittlere Keilzinkenbiegefestigkeit für eine gewünschte Bauteilbiegefestigkeit angeben. Die zugehörigen Gleichungen lauten mit den Verhältnisfaktoren für den Mittelwert somit:

$$f_{m,j,mean} \geq 1,31 \cdot \frac{f_{m,05,c,j}^0 - 8,65}{0,49} \quad \text{für QS1}$$

liegende **Glg. 11-11**

$$f_{m,j,mean} \geq 1,31 \cdot \exp\left(\frac{f_{m,05,c,j}^0 + 7,88}{9,38}\right) \quad \text{für QS2}$$

$$f_{m,j,mean} \geq 1,60 \cdot \frac{f_{m,05,c,j}^0 - 8,65}{0,49} \quad \text{für QS1}$$

stehende **Glg. 11-12**

$$f_{m,j,mean} \geq 1,60 \cdot \exp\left(\frac{f_{m,05,c,j}^0 + 7,88}{9,38}\right) \quad \text{für QS2}$$

Mit den bisherigen Gleichungen kann die mindestens erforderliche mittlere Keilzinkenbiegefestigkeit, für eine vorgegebene Bauteilbiegefestigkeit ermittelt. Im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle wird jedoch keine Anforderung an die mindestens erforderliche mittlere Keilzinkenbiegefestigkeit gestellt, sondern an den 5%-Quantilwert der Keilzinkenbiegefestigkeit. Die erforderliche charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit kann nach Glg. 11-13 in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten ermittelt werden.

$$f_{m,j,05} = f_{m,j,mean} \cdot (1 - 1,645 \cdot v_{m,j}) \quad \text{Glg. 11-13}$$

Bei Keilzinkenbiegefestigkeiten liegt der Variationskoeffizient i. A. im Bereich von ca. 20%. Mit diesem Variationskoeffizienten ergibt sich dann folgende Gleichung:

$$f_{m,j,05} = f_{m,j,mean} \cdot (1 - 1,645 \cdot 0,20) = f_{m,j,mean} \cdot 0,671 \quad \text{Glg. 11-14}$$

Mit diesen Gleichungen kann nun die mindestens erforderliche Keilzinkenbiegefestigkeit ermittelt werden, wenn eine gewünschte Bauteilbiegefestigkeit für den Standardträger erreicht werden soll. Wenn die gewünschte Biegefestigkeit des Standardträgers  $f_{m,05,c,j}^0 = 24 \text{ N/mm}^2$  betragen soll, sind folgende 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten erforderlich:

Für die liegende Keilzinkung muss der 5%-Quantilwert mindestens folgende Bedingung erfüllen:

$$f_{m,j,05} \geq 0,671 \cdot 1,31 \cdot \frac{f_{m,05,c,j}^0 - 8,65}{0,49} = 27,5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS1}$$

$$f_{m,j,05} \geq 0,671 \cdot 1,31 \cdot \exp\left(\frac{f_{m,05,c,j}^0 + 7,88}{9,38}\right) = 26,3 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS2}$$
**Glg. 11-15**

Für die stehende Keilzinkung muss der 5%-Quantilwert mindestens folgende Bedingung erfüllen

$$f_{m,j,05} \geq 0,671 \cdot 1,60 \cdot \frac{f_{m,05,c,j}^0 - 8,65}{0,49} = 33,6 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS1}$$

$$f_{m,j,05} \geq 0,671 \cdot 1,60 \cdot \exp\left(\frac{f_{m,05,c,j}^0 + 7,88}{9,38}\right) = 32,1 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für QS2}$$
**Glg. 11-16**

Betrachtet man die Versuchswerte zu den Keilzinkenbiegefestigkeiten aus Abschnitt 3.7, so zeigt sich, dass die mindestens erforderliche Keilzinkenbiegefestigkeit von den stehenden Keilzinkungen leichter zu gewährleisten ist, als von den liegenden Keilzinkungen. Werden im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle bessere Keilzinkungen mit höheren Keilzinkenfestigkeiten hergestellt, können somit auch höhere Bauteilbiegefestigkeiten erzielt werden.

Setzt man noch die Vergütungsfaktoren aus Abschnitt 0 an, kann in der obigen Gleichung der Wert für  $f_{m,05,c,j}^{\theta}$  mit dem Wert nach Glg. 11-8 modifiziert werden, so dass die erforderlichen Keilzinkenbiegefestigkeiten nochmals reduziert werden.

## 11.4 Ermittlung der relevanten Bemessungsspannung

Agrund unterschiedlichster Querschnittsaufbauten von Brettsperrholzträgern ist zunächst der „Plattenaufbaufaktor“  $k_m$  wie folgt zu ermitteln:

$$k_m = \frac{EI_{ef}}{EI} \quad \text{Glg. 11-17}$$

Hierin bedeuten:

- $k_m$  = Plattenaufbaufaktor
- $EI_{ef}$  = Effektive Biegesteifigkeit des Brettsperrholzträgers unter Berücksichtigung des Querschnittsaufbau und den Elastizitätsmodulen der einzelnen Lagen
- $EI$  = Biegesteifigkeit eines Vollquerschnitts mit homogenem Elastizitätsmodul

Die effektive Biegesteifigkeit aus Glg. 11-17 berechnet sich in Anlehnung an die Theorie der Verbundquerschnitte aus dem Anteil der Eigenbiegesteifigkeit der einzelnen Lagen und den zugehörigen Steineranteilen. Die Formel hierfür lautet:

$$EI_{ef} = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot I_i) + \sum_{i=1}^n (E_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad \text{Glg. 11-18}$$

Hierin bedeuten:

- $EI_{ef}$  = Effektive Biegesteifigkeit des Brettsperrholzträgers unter Berücksichtigung des Querschnittsaufbau und den Elastizitätsmodulen der einzelnen Lagen
- $(E_i \cdot I_i)$  = Eigenbiegesteifigkeit der Lage  $i$
- $(E_i \cdot A_i \cdot a_i^2)$  = Steineranteil der Biegesteifigkeit der Lage  $i$
- $E_i$  = Elastizitätsmodul der Lage  $i$
- $I_i$  = Flächenträgheitsmoment der Lage  $i$
- $A_i$  = Querschnittsfläche der Lage  $i$
- $a_i$  = Abstand des Schwerpunktes der Lage  $i$  vom elastischen Schwerpunkt  $z_S$  des Gesamtquerschnitts

Mittels des Plattenaufbaufaktors  $k_m$  nach Glg. 11-17 kann die vorhandene Biegerandspannung in der äußersten Lage des Querschnitts wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{R,m} = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} \cdot k_m \quad \text{Glg. 11-19}$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_{R,m}$  = Biegerandspannung in der äußersten Lage des Querschnitts
- $M$  = vorhandenes Biegemoment
- $I$  = Flächenträgheitsmoment des Vollquerschnitts ( $b \cdot h^2 / 12$ )
- $h$  = Gesamthöhe des Querschnitts
- $k_m$  = Plattenaufbaufaktor nach Glg. 11-17

In der Arbeit von COLLING [11] wird zur Bemessung von Brettschichtholzträgern ebenfalls die Biegerandspannung ermittelt. Bei Brettschichtholzträgern sind Querschnittshöhen von 300 mm und mehr üblich, die Höhe von Brettsperrholzträgern ist hingegen auf ca. 300 mm begrenzt. In der Regel liegen die Höhen jedoch deutlich unter 300 mm. Bei Trägern mit diesen geringen Querschnittshöhen fällt der Anteil der Schwerpunktspannung in der äußersten Lage zur gesamten Biegerandspannung wesentlich kleiner aus, als bei Trägern mit größeren Querschnittshöhen. In Abschnitt 2.2 wurde bereits darauf eingegangen.

Dieser Sachverhalt wurde bei dem Simulationsprogramm berücksichtigt. Zur Ermittlung der Tragfähigkeit wurde das kombinierte Bruchkriterium aus Schwerpunktspannung und Biegespannungsanteil herangezogen. Mit der so ermittelten Bruchkraft wurde die Biegerandspannung in der äußersten Lage berechnet, die die simulierte Biegefestigkeit des Trägers darstellt. Da sich die ermittelten Festigkeiten auf die Biegerandspannung beziehen ist daher auch der Nachweis mit der vorhandenen Biegerandspannung in der äußersten Lage zu führen. Daraus ergibt sich folgende Grenzbedingung.

$$\sigma_{R,m} \leq f_{m,k,c} \quad \text{Glg. 11-20}$$

Nach dem Bemessungskonzept der DIN 1052 [N1] sind noch die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte mit einzubeziehen. Damit ergibt sich dann folgende Bemessungsgleichung:

$$\sigma_{R,max,d} \leq \underbrace{k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k,c}}{\gamma_M}}_{f_{m,d,c}} \quad \text{Glg. 11-21}$$

Hierin bedeuten:

- $\sigma_{R,max,d}$  = Bemessungswert der Biegerandspannung in der äußersten Lage im Grenzzustand der Tragfähigkeit
- $k_{mod}$  = Modifikationsbeiwert zur Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse und der Klasse der Lasteinwirkungsdauer
- $f_{m,k,c}$  = charakteristische Biegefestigkeit des betrachteten Trägers nach Glg. 11-8
- $\gamma_M$  = Sicherheitsbeiwert für das Material Holz
- $f_{m,d,c}$  = Bemessungswert der Biegefestigkeit des betrachteten Trägers

## 12 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Einflüsse auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholzträgern experimentell und numerisch untersucht. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden insgesamt 200 Bauteilbiegeversuche, 120 Keilzinkenbiegeversuche sowie 40 Keilzinkenzugversuche durchgeführt.

Von den 200 Bauteilbiegeversuchen wurde die Bauteilbiegefestigkeit sowohl an Prüfkörpern ohne als auch mit Keilzinkenverbindungen getestet. Außerdem wurden verschiedene Querschnittsaufbauten untersucht. Die Querschnitte unterschieden sich zum einen in der Anzahl der faserparallelen Decklagen und der Anzahl nebeneinander liegender Lamellenschichten.

Bei den Bauteilen mit Keilzinkenverbindungen wurden zwei Arten von Keilzinkentypen untersucht: liegendes Keilzinkenprofil und stehendes. Die Bauteile ohne Keilzinkenverbindungen hatten die höchsten Bauteilbiegefestigkeiten. Bei den Bauteilprüfkörpern mit Keilzinkungen lagen die Festigkeitswerte der Bauteile mit stehendem Keilzinkenprofil über den Festigkeiten der Bauteile mit liegenden Keilzinkungen.

Bei den Versuchen mit den Bauteilen ohne Keilzinkenverbindungen zeigte sich, dass sowohl die Anzahl der nebeneinander liegenden Lamellenschichten als auch die Anzahl der faserparallelen Decklagen zu einer Steigerung der Tragfähigkeit im Vergleich zu einem Prüfkörper mit nur einer faserparallelen Decklage und einer Lamellenschicht (Bauteilbreite = 1 Brettbreite) führt. Somit konnte im Rahmen der Versuche gezeigt werden, dass bei Brettsperrholzträgern neben dem Laminierungseffekt auch ein Systemfaktor vorhanden ist.

Bei den Bauteilen mit Keilzinkenverbindungen zeigten sich ebenfalls derartige Einflüsse, die jedoch deutlich geringer ausfallen als bei den Bauteilen ohne Keilzinkenverbindungen. Hierbei zeigte sich,

dass sich der Einfluss mit zunehmender Keilzinkenhäufigkeit abschwächt. Somit sind Bauteile mit Keilzinkenverbindungen i. d. R. das schwächere der beiden Materialien „Holz“ und „Keilzinkenverbindung“<sup>1</sup>.

Anhand einzelner Keilzinkenprüfungen konnte gezeigt werden, dass die Tragfähigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenverbindungen entscheidend von der Qualität der Keilzinkenverbindungen abhängt. Mit zunehmender Keilzinkenqualität und damit auch höheren Keilzinkenfestigkeiten nimmt auch die Bauteilfestigkeit von Brettsperrholzträgern zu.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden auch numerische Betrachtungen zu den relevanten Einflussgrößen auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrholzträgern durchgeführt. Hierfür wurde ein eigenes Simulationsmodell entwickelt, mit dem die verschiedenen Einflussfaktoren systematisch untersucht werden konnten. Das Simulationsmodell wurde anhand der Versuchswerte kalibriert und abgeglichen. Darauf aufbauend konnte ein Berechnungsmodell für die Ermittlung der charakteristischen Biegetragfähigkeit von Brettsperrholzträgern in Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit und der Trägergröße entwickelt werden.

Der Vergleich der simulierten Festigkeitswerte mit den Versuchswerten zeigte, dass das vorgestellte Berechnungsmodell geeignet ist, die Tragfähigkeit von beliebig aufgebauten Brettsperrholzträgern auf numerischem Weg zu ermitteln.

Somit ist es nun möglich, für eine geforderte Bauteilbiegefestigkeit die zugehörige erforderliche Keilzinkenbiegefestigkeit zu ermitteln. Für die herstellenden Betriebe bedeutet dies, dass sie anhand ihrer werkseigenen Produktionskontrolle für die Keilzinkenbiegefestigkeiten die maximal möglichen Bauteilbiegefestigkeiten von Brettsperrholzbiegeträgern angeben können.

Die vorliegenden Ergebnisse der Arbeit zeigen deutlich, dass biegebeanspruchte Brettsperrholzträger ein hohes Potential an Lastumlagerungen haben und damit auch erhöhte Tragfähigkeiten, als die bisherigen Bemessungsmodelle berücksichtigen. In den aktuellen Zulassungen findet man häufig folgende Formulierung:

*„Bei der Bemessung ... sind für die Einzelschichten die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte für Vollholz in den entsprechenden Sortier- bzw. Festigkeitsklassen anzusetzen. Je Brettlage darf ein Anteil von bis zu 10% der Bretter der nächstniedrigeren Sortierklasse unberücksichtigt bleiben.“*

Die Möglichkeit in einer Brettlage Brett mit einem Anteil von bis zu 10% der nächstniedrigeren Sortierklasse zu verwenden, ohne dies bei der Berechnung zu berücksichtigen wurde bisher noch nicht systematisch untersucht. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen jedoch, dass aufgrund der hohen Vergütungseffekte dieser Passus gerechtfertigt ist und sogar noch auf der konservativen Seite liegt.

Die ermittelten Vergütungseffekte von Brettsperrholzträgern können beispielsweise dazu benutzt werden, die rechnerische Biegefestigkeit zu erhöhen. Da in der Praxis jedoch i. d. R. nicht der Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebend ist, sondern die Durchbiegungen, also der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, ist es somit auch nicht erforderlich, höhere Biegefestigkeiten zu erreichen. Stattdessen könnten die Vergütungseffekte von Brettsperrholzträgern, wie nachfolgend beschrieben, genutzt werden.

In den bisherigen Brettsperrholzzulassungen gibt es die Möglichkeit in einer Brettlage Bretter mit einem Anteil von bis zu 10% der nächstniedrigeren Sortierklasse zu verwenden (siehe oben), ohne dies bei der Bemessung zu berücksichtigen. Mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit und dem entwickelten Simulationsprogramm kann man den maximal möglichen Anteil der nächstniedrigeren

---

<sup>1</sup> Unter dem Material „Holz“ ist Brettsperrholz zu verstehen das Aufgrund eines Holzversagens zu Bruch geht; unter dem Material „Keilzinkung“ ist Brettsperrholz zu verstehen des Aufgrund eines Keilzinkenversagens zu Bruch geht.

Sortierklasse in einer Brettlage ermitteln, ohne dass sich hierdurch die Biegefestigkeit des Trägers reduziert.

Im Normalfall werden Bretter der Sortierklasse C24 bei Brettsperrholzträgern verwendet. Die charakteristische Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Brettern dieser Sortierklasse beträgt  $24 \text{ N/mm}^2$ . Der oben erwähnte Passus aus einer Brettsperrholzulassung bedeutet nun, dass beispielsweise in der untersten Brettlage bis zu 10% Bretter der Sortierklasse C16 vorhanden sein dürfen. Für die Bemessung der Tragfähigkeit darf dennoch mit einer charakteristischen Biegefestigkeit von  $24 \text{ N/mm}^2$  gerechnet werden.

Mit dieser Herangehensweise könnte mit Hilfe des Simulationsprogramms ein höherer Anteil schlechterer Brettware im Endprodukt verarbeitet werden. Dadurch müssten weniger Äste ausgekappt werden und somit auch weniger Keilzinkungen ausgeführt werden. Insgesamt kann damit die Rohware mit weniger Verlust verarbeitet werden. Dies ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil bei Brettsperrholz das Material der höchste Kostenfaktor ist.

Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich auf Brettsperrholzträger mit geschlitzten Brettern ohne Seitenverklebung. Inwieweit ungeschlitzte Bretter und eine Seitenverklebung der Bretter Einfluss auf die Biegetragfähigkeit haben ist mit weiteren Untersuchungen zu ermitteln.

Diese Arbeit zeigt, dass es sich bei Brettsperrholz um einen Baustoff handelt, der sehr hohe Vergütungseffekte aufweist. Brettsperrholz ist ein hoch redundantes System, was sich äußerst positiv bei einem evtl. Verlust der Tragfähigkeit einzelner Lamellen auswirkt und somit ein großes Maß an Sicherheit bietet.

## 13 Literaturverzeichnis

- [1] Bakht, B.; Jaeger, L. G.:  
Load sharing in timber bridge design.  
Canadian Journal of Civil Engineering (1991), Vo. 18, Seiten: 312-319
- [2] Bergfelder, J.:  
Näherungsverfahren zur Berechnung allgemeiner zusammengesetzter hölzerner Biegeträger mit elastischem Verbund  
In: Bauingenieur 49, 1974, S. 350-356
- [3] Bosl, R.:  
Zum Nachweis des Trag- und Verformungsverhaltens von Wandscheiben aus Brettlagenholz  
Dissertation; Universität der Bundeswehr München; 2001
- [4] Brandner, R.:  
Darstellung der Festigkeits- und Steifigkeitspotentials von BSH-Lamellen in Hinblick auf das Trägermodell  
Vortragssammlung zum 2. Grazer Holzbau-Workshop 06, Graz, Austria
- [5] Brandner, R.; Schickhofer, G.:  
System effects of structural elements – determined for bending and tension.  
Center of Competence holz.bau forschung Ltd.  
Institute for Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology
- [6] Brauch, W.; Dreyer, H.-J.; Haacke, W.:  
Mathematik für Ingenieure; 10. Auflage  
Teubner Verlag, 2003
- [7] Bronstein, I.-N.; Semendjajew, K.-A.; Musiol, G.; Mühlig, H.:  
Taschenbuch der Mathematik; 6. Auflage  
Harri Deutsch Verlag, 2005
- [8] Blaß, H. J.; Görlacher, R.:  
Rolling shear in structural bonded timber elements  
Int. Conference on Wood and Fibre Composites, Seiten: 327-337  
Stuttgart, 2000
- [9] Colling, F.:  
Einfluss des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Rechteckträgers  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 44 (1986), Seiten 121-125 und 179-183
- [10] Colling, F.:  
Influence of volume and stress distribution on the shear strength and tensile strength perpendicular to grain  
In: CIB-W18/19-12-3, Florence, Italy
- [11] Colling, F.:  
Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen  
Dissertation; Universität (TH) Karlsruhe; 1990
- [12] Colling, F.; Dinort, R.:  
Die Ästigkeit des in den Leimbaubetrieben verwendeten Schnittholzes.  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 45 (1987), Seiten: 23-26
- [13] Colling, F.; Scherberger, M.:  
Die Streuung des Elastizitätsmoduls in Brettlängsrichtung  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 45 (1987), Seiten: 95-99

- 
- [14] Colling, F.; Görlacher R.:  
Eigenschaften des in Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes  
In: Bauen mit Holz 91 (1989), Seiten: 327-331
- [15] Colling, F.:  
Brettschichtholz unter Biegebeanspruchung  
Informationsdienst Holz: Holzbauwerke nach Eurocode 5  
Step 3 – Grundlagen, Entwicklungen, Ergänzungen, 1995, Seiten: 5/1-5/18
- [16] Colling, F.:  
Einfluss des Volumens und der Spannungsverteilung auf die Festigkeit eines Rechteckträgers  
Herleitung einer allgemeinen Beziehung mit Hilfe der 2-parametrischen Weibull-Verteilung  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 44 (1986), Seiten: 121-125
- [17] Colling, F.:  
Lernen aus Schäden, 1. Auflage  
Bruderverlag, 2000
- [18] Cramer S. M.; Drozdek J. M.; Wolfe R. W.:  
Load sharing effects in light-frame wood truss assemblies  
In: Journal of Structural Engineering (2000), Vol. 126, No.12, Seiten: 1388-1394
- [19] Ehlbeck, J.; Colling, F.:  
Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen  
im Hinblick auf Normungsvorschläge  
IRB Verlag, 1992
- [20] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R.:  
Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern.  
Teil 1: Entwicklung eines Rechenmodells.  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 43 (1985), Seiten: 333-337
- [21] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R.:  
Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern.  
Teil 2: Eingangsdaten für das Rechenmodell.  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 43 (1985), Seiten: 369-373
- [22] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Görlacher, R.:  
Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern.  
Teil 3: Überprüfung des Rechenmodells mit Hilfe von Trägerversuchen  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 43 (1985), Seiten: 439-442
- [23] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Heimeshoff, B.; Kneidl, R.:  
Biegefestigkeit von Brettschichtholz in Abhängigkeit von Rohdichte, Elastizitätsmodul,  
Ästigkeit und Keilzinkung der Lamellen, der Lage der Keilzinkung sowie von der Trägerhöhe  
IRB Verlag, 1987
- [24] Ehlbeck, J.; Colling, F.; Wenz, J.:  
Prüfung der Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen der Lamellen für Brettschichtholz  
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, 1989
- [25] Falk, R.; Colling, F.:  
Laminating Effects in Glued-Laminated Timber Beams  
In: Journal of Structural Engineering, Vol.: 121, Nr.: 12, 1995, Seiten: 1857-1863.
- [26] Hansson, M.; Isaksson, T.:  
System effects in sheathed parallel timber beam structures – Part II  
CIB-W18, paper 35-8-1, Kyoto, Japan, 2002
- [27] Jöbstl, Robert A.:  
Tragmodelle für Brettsperrholz  
Modellbildung für Produkte und Konstruktionen aus Holz – Bedeutung von Simulation und  
Experiment
-

7. Grazer Holzbau-Fachtagung, Tagungsband  
Verlag der Technischen Universität Graz, 2008
- [28] Glos, P.:  
Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus  
Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen.  
Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 35, SFB 96, München
- [29] Glos, Dr., P.:  
Die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der Schnittholzsortierung im Mittel- und  
Kleinbetrieb  
Technische Universität München
- [30] Gollwitzer, T.; Gebbeken, N.:  
Ein neues FEM-Stabelement für nachgiebige Verbundquerschnitte  
In: Bautechnik 81, Heft 7, 2004, Seiten: 549-554
- [31] Görlacher, R.:  
Ein Verfahren zur Ermittlung des Rollschubmoduls von Holz.  
In: Holz als Roh- und Werkstoff 60 (2002), Seiten: 317-322
- [32] Görlacher, R.:  
Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen.  
Dissertation; Universität (TH) Karlsruhe; 1989
- [33] Görlacher, R.; Kürth, J.:  
Determination of Shear Modulus.  
In: International Council for Building Research Studies and Documentation - Working  
Commission W18 – Timber Structures, CIB W18/27-10-1
- [34] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.:  
Technische Mechanik – Band 2: Elastostatik; 6. Auflage  
Springerverlag, 1995
- [35] Hartmann, H.:  
Die Berücksichtigung elastisch-plastischer Verformungseigenschaften mechanischer  
Verbindungsmitel bei Verbundkonstruktionen im Ingenieurholzbau  
Dissertation; Technische Universität München; 1999
- [36] Jakobs, A.:  
Zur Berechnung von Brettlagenholz mit starrem und nachgiebigem Verbund unter  
plattenartiger Belastung mit besonderer Berücksichtigung des Rollschubes und der  
Drillweichheit  
Dissertation; Universität der Bundeswehr München; 2005
- [37] Jöbstl, R. A.; Moosbrugger, T.; Bogensperger, T.; Schickhofer, G.:  
A Contribution to the Design and System Effect of Cross Laminated Timber (CLT)  
In: International Council for Building Research Studies and Documentation – Working  
Commission W18 – Timber Structures, CIB W18/39-12-4
- [38] Kim H.; Kvam P. H.:  
Reliability estimation based on system data with an unknown load share rule  
Springer, Netherlands, Seiten: 83-94, ISSN 1380.7870
- [39] Kneidl, R.:  
Ein Beitrag zur linearen und nichtlinearen Berechnung von Schichtbalkensystemen  
Dissertation; Technische Universität München; 1991
- [40] Kneidl, R.; Hartmann H.:  
Träger mit nachgiebigem Verbund – Eine Berechnung mit Stabwerksprogrammen  
In: Bauen mit Holz, 1995, Seiten: 285-290

- 
- [41] Kreuzinger, H.:  
Verbundkonstruktionen  
In: Holzbau Kalender 2002; 1. Jahrgang, Seiten 598-621  
Bruderverlag, 2001
- [42] Link, M.:  
Finite Elemente in der Statik und Dynamik, 3. Auflage  
Teubnerverlag, 2002
- [43] Liu W. F.; Bulleit W. M.:  
Overload behaviour of sheathed lumber systems  
Journal of Structural Engineering (1995), Vol. 121, No. 7, Seiten: 1110-1118.
- [44] Papula, L.:  
Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Band 2; 10. Auflage  
Vieweg Verlag, 2001
- [45] Papula, L.:  
Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Band 3; 4. Auflage  
Vieweg Verlag, 2001
- [46] Prüfbericht H08-01/1-PB  
KKI Augsburg, Abt. Holzbau, Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und  
Zertifizierungsstelle der Hochschule Augsburg; 2008
- [47] Prüfbericht H09-01/4-PB  
KKI Augsburg, Abt. Holzbau, Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und  
Zertifizierungsstelle der Hochschule Augsburg; 2009
- [48] Schickhofer, G.:  
Determination of shear strength values for GLT using visual and machine graded spruce  
laminations  
In: International Council for Building Research Studies and Documentation – Working  
Commission W18 – Timber Structures, CIB W18/34-12-6
- [49] Scholz, A.:  
Ein Beitrag zur Berechnung von Flächentragwerken aus Holz  
Dissertation, Technische Universität München, 2004
- [50] Schwar, A.; Bretschneider, T.:  
Simulation des Tragfähigkeitsverhaltens flächiger Holzwerkstoffstrukturen am Beispiel von  
Brettspertholz und dessen Verifizierung mittels Bauteilversuchen
- [51] Stoyan, D.:  
Stochastik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Eine Einführung in die  
Wahrscheinlichkeitstheorie und die Mathematische Statistik  
Akademie Verlag, 1993
- [52] Wiegand, T.:  
Entwicklung eines Rechenverfahrens für keilgezinkte Rahmenecken und Biegeträger ohne  
oder mit Zwischenstück aus Brettschichtholz oder Holzwerkstoffplatten  
Dissertation; Universität Wuppertal; 2003
- [53] Wunderlich, W.; Kiener, G.:  
Statik der Stabtragwerke, 1. Auflage  
Teubner Verlag, 2004
- [54] Williams G. D.; Bohnhoff D. R.; Moody R. C.:  
Bending properties of four-layer nail-laminated posts  
U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison,  
Wisconsin, FPL-RP-528, 1994
-

## 14 Normenverzeichnis

- [N1] DIN 1052: 2012-08:  
Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln  
und Bemessungsregeln für den Hochbau  
Berlin: Beuth-Verlag, 2008
- [N2] DIN 4074-1: 2008-12:  
Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz  
Berlin: Beuth-Verlag, 2008
- [N3] DIN 68140-1: Keilzinkenverbindungen von Holz – Teil 1: Keilzinkenverbindungen von  
Nadelholz für tragende Bauteile, 02.98. Berlin Beuth Verlag, 1998
- [N4] DIN EN 338: 09-2003: (Deutsche Fassung: 04-2003)  
Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen  
Berlin: Beuth-Verlag, 2003
- [N5] DIN EN 384: 05-2004  
Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische  
Eigenschaften und Rohdichte  
Berlin: Beuth-Verlag, 2004
- [N6] DIN EN 385: 03-2002 (Deutsche Fassung: 10-2001):  
Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung  
Berlin: Beuth-Verlag, 2001
- [N7] DIN EN 408: 03-2001 (Deutsche Fassung: 11-2000) (Entwurf):  
Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und  
mechanischer Eigenschaften  
Berlin: Beuth-Verlag, 2000
- [N8] DIN EN 1194: 05-1999  
Brettschichtholz – Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte  
Berlin: Beuth-Verlag, 1999
- [N9] DIN EN 1912: 10-2013  
Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und  
Holzarten  
Berlin: Beuth-Verlag, 2013
- [N10] DIN EN 14358:03- 2007  
Holzbauwerke - Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und  
Annahmekriterien für Proben  
Berlin: Beuth-Verlag, 2007

## 15 Zulassungsverzeichnis

- [Z1] Z-9.1-482: KLH-Kreuzlagenholz  
KLH Massivholz GmbH, 8842 Katsch/Mur 202, Österreich  
Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2005
- [Z2] Z-9.1-501: MerkDickholz® (MDH)  
Finnforest Merk GmbH, Industriestraße 2, 86551 Aichach, Deutschland  
Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2004
- [Z3] Z-9.1-555: LIGNOTREND-Elemente  
LIGNOTREND AG, Guntenmatte, 3654 Gunten, Schweiz  
Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2002

## 16 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Beschreibung der mechanischen Berechnungsmodelle für die Auswertung	17
Tabelle 3-2	Angabe der variierten und fixierten Werte für die verschiedenen Optimierungen	18
Tabelle 3-3	Erklärung der Abkürzungen für die Primärbezeichnung der Versuchsreihen	19
Tabelle 3-4	Erklärung der Abkürzungen für die Sekundärbezeichnung der Versuchsreihen	19
Tabelle 3-5	Zusammenfassung des Prüfprogramms	22
Tabelle 3-6	Statistische Werte der „Rohdichte angepassten“ Biegefestigkeiten in $N/mm^2$ für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte)	25
Tabelle 3-7	Übersicht der untersuchten Einflussgrößen auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrhölzern ohne Keilzinkenverbindungen	26
Tabelle 3-8	Verhältnissfaktoren für den Vergleich visuelle/maschinelle Sortierung der Prüferserie 1B.B	27
Tabelle 3-9	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Querschnittsaufbauten der Prüferserie 1	28
Tabelle 3-10	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Bauteilbreiten der Prüferserie 1B.B	28
Tabelle 3-11	Zusammenfassung der Ergebnisse für die verschiedenen Einflüsse für die Prüferserie 1B.B	29
Tabelle 3-12	Zusammenfassung des Prüfprogramms für die Bauteilversuche	32
Tabelle 3-13	Zusammenfassung des Prüfprogramms für die Ermittlung der Korrelation zwischen Bauteilbiegefestigkeit und Keilzinkenbiegefestigkeit	33
Tabelle 3-14	Zusammenfassung des Prüfprogramms zur Ermittlung der Biege- und Zugfestigkeiten der Keilzinkungen	34
Tabelle 3-15	Auflistung der nicht berücksichtigten Prüfkörper(nummer) der Prüferserie 2B.B	37
Tabelle 3-16	Statistische Werte der Biegefestigkeiten der Bauteile in $N/mm^2$ der Prüferserie 2B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne Maximalwerte)	38
Tabelle 3-17	Übersicht der untersuchten Einflussgrößen auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrhölzern mit Keilzinkenverbindungen	39
Tabelle 3-18	Verhältnissfaktoren für den Vergleich visuelle/maschinelle Sortierung der Prüferserie 2B.B	40
Tabelle 3-19	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Querschnittsaufbauten der Prüferserie 2B.B	41
Tabelle 3-20	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Bauteilbreiten der Prüferserie 2B.B	42
Tabelle 3-21	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Keilzinkenverbindung der Prüferserie 2	43
Tabelle 3-22	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Prüferserie 2B.B (Werte in $N/mm^2$ )	44
Tabelle 3-23	Festgestellte Unregelmäßigkeiten an vereinzelt Prüfkörpern im Bereich der Keilzinkung der Prüferserie 3B.B	47
Tabelle 3-24	Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in $N/mm^2$ der Prüferserie 3B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte)	48
Tabelle 3-25	Festgestellte Unregelmäßigkeiten an vereinzelt Prüfkörpern im Bereich der Keilzinkung der Prüferserie 3K.B	49
Tabelle 3-26	Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in $N/mm^2$ der Prüferserie 3K.B (ohne „Ausreißer“)	49
Tabelle 3-27	Festgestellte Unregelmäßigkeiten an vereinzelt Prüfkörpern im Bereich der Keilzinkung der Prüferserie 3K.Z	50
Tabelle 3-28	Statistische Werte der Keilzinkenzugfestigkeiten in $N/mm^2$ für die Prüferserie 3K.Z	51
Tabelle 3-29	Zusammenstellung der Quellen für die Werte für den Vergleich der Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen	51
Tabelle 3-30	Zusammenfassung der verwendeten statistischen Werte der Keilzinkenfestigkeiten in $N/mm^2$ für den Vergleich der Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen der Prüferserien 3B.B (Tabelle 3-24), 3K.B (Tabelle 3-26) und 3K.Z (Tabelle 3-28)	52
Tabelle 3-31	Übersicht der untersuchten Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen	53
Tabelle 3-32	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Keilzinkungen der Prüferserien 3B.B, 3K.B und 3K.Z	53
Tabelle 3-33	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Keilzinkfestigkeiten der Prüferserien 3K.B und 3K.Z	54
Tabelle 3-34	Zusammenfassung der Keilzinkenfestigkeiten für die Prüferserie 3B.B, 3K.B und 3K.Z (Werte in $N/mm^2$ )	55
Tabelle 4-1	Verwendete Ergebnisse Prüferserie 1B.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B	56
Tabelle 4-2	Verwendete Ergebnisse Prüferserie 2B.B für Vergleich mit der Prüferserie 1B.B, 3B.B und 3K.Z	57
Tabelle 4-3	Verwendete Ergebnisse Prüferserie 3B.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B	58
Tabelle 4-4	Verwendete Ergebnisse der Prüferserie 3K.B für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B	59
Tabelle 4-5	Verwendete Ergebnisse der Prüferserie 3K.Z für Vergleich mit der Prüferserie 2B.B	60
Tabelle 4-6	Übersicht der verglichen Prüfreiheiten untereinander	61
Tabelle 5-1	Normalkräfte und Durchbiegungen in den Teilquerschnitten der analytischen Lösung	75

Tabelle 6-1	Verhältnissfaktoren $k_E$ und $k_z$ für den BSP-Träger QS129 und BSH-Träger Colling	83
Tabelle 7-1	Vergleich der simulierten Eigenschaften mit Ergebnissen früherer Arbeiten für nicht keilgezinkte Brettabschnitte	96
Tabelle 7-2	Vergleich der simulierten Eigenschaften mit Ergebnissen früherer Arbeiten für keilgezinkte Brettabschnitte	97
Tabelle 8-1	Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus Teil A	104
Tabelle 8-2	Kriterien für die Simulation der verschiedenen Sortierklassen	104
Tabelle 8-3	Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus Teil A	106
Tabelle 8-4	Faktoren zur Anpassung der simulierten Keilzinkenfestigkeiten an die mittels Zugversuch ermittelten Keilzinkenfestigkeiten	107
Tabelle 8-5	Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus [46]	108
Tabelle 8-6	Versuchsträger ohne Keilzinkenverbindungen aus [47]	110
Tabelle 9-1	Biegefestigkeit in $N/mm^2$ von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert der Decklamelle	114
Tabelle 9-2	Biegefestigkeit in $N/mm^2$ von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit von der Darr-Rohdichte $\rho_0$ in $kg/m^3$	115
Tabelle 9-3	Biegefestigkeit in $N/mm^2$ von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit vom Brett-Elastizitätsmodul $E$ in $N/mm^2$	115
Tabelle 9-4	5%-Quantilwerte $x_{0,5,Holz}^0$ in $N/mm^2$ in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und der Darr-Rohdichte $\rho_0$ in $kg/m^3$ der Bretter	115
Tabelle 9-5	Mittelwerte $x_{m,Holz}^0$ in $N/mm^2$ in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und der Darr-Rohdichte $\rho_0$ in $kg/m^3$ der Bretter	116
Tabelle 9-6	Variationskoeffizienten $v_{Holz}^0$ in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und der Darr-Rohdichte $\rho_0$ in $kg/m^3$ der Bretter	116
Tabelle 9-7	5%-Quantilwerte $x_{0,5,Holz}^0$ in $N/mm^2$ in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und dem Elastizitätsmodul $E$ in $N/mm^2$ der Bretter	116
Tabelle 9-8	Mittelwerte $x_{m,Holz}^0$ in $N/mm^2$ in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und dem Elastizitätsmodul $E$ in $N/mm^2$ der Bretter	117
Tabelle 9-9	Variationskoeffizienten $v_{Holz}^0$ in Abhängigkeit vom größten KAR-Wert und dem Elastizitätsmodul $E$ in $N/mm^2$ der Bretter	117
Tabelle 9-10	Biegefestigkeit in $N/mm^2$ von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen in Abhängigkeit von der Sortierklasse der Decklamelle	117
Tabelle 9-11	Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [ $N/mm^2$ ] in Abhängigkeit von der Darr-Rohdichte $\rho_0$ [ $kg/m^3$ ]	151
Tabelle 9-12	Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [ $N/mm^2$ ] in Abhängigkeit von dem mittleren Brett-Elastizitätsmodul $E$	151
Tabelle 9-13	Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [ $N/mm^2$ ] in Abhängigkeit von verschiedenen Sortierklassen für visuell sortierte Bretter	152
Tabelle 9-14	Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen [ $N/mm^2$ ] in Abhängigkeit von verschiedenen Sortierklassen für maschinell sortierte Bretter	152
Tabelle 9-15	Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen	153
Tabelle 9-16	Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Holzversagen	153
Tabelle 9-17	Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	154
Tabelle 9-18	Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	155
Tabelle 9-19	Zahlenwerte zur Berechnung der mittleren Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	155
Tabelle 9-20	Zahlenwerte zur Berechnung der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträgern mit Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	155
Tabelle 10-1	Eingangswerte für das Zahlenbeispiel zur Erläuterung des theoretischen Modells	160
Tabelle 11-1	Verhältnis zwischen Keilzinkenbiegefestigkeit und Keilzinkenzugfestigkeit für die geprüften Keilzinkentypen „liegend“ und „stehend“ aus Abschnitt 3.7	164
Tabelle B-1	Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in $kg/m^3$ für die einzelne Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B	193
Tabelle B-2	Statistische Werte der ermittelten Elastizitätsmodule in $N/mm^2$ für die Bauteile der einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B	197

Tabelle B-3	Größenunterschied zwischen den mittleren E-Moduln beim Vergleich des Querschnitts QS 129 mit dem Querschnitt QS 125	129 199
Tabelle B-4	Größenunterschied zwischen den mittleren E-Moduln beim Vergleich der Bauteilbreiten	199
Tabelle B-5	Statistische Werte der Biegegrandspannungen in N/mm <sup>2</sup> für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)	200
Tabelle B-6	Korrekturfaktoren für die Umrechnung der Festigkeiten auf ein einheitliches Rohdichte Niveau für die einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 1B.B	202
Tabelle B-7	Statistische Werte der „kalibrierten“ Biegefestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)	203
Tabelle C-8	Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in kg/m <sup>3</sup> für die Prüferserie 2B.B	205
Tabelle C-9	Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in kg/m <sup>3</sup> der Prüferserie 2B.B (ohne diskutierte Werte)	206
Tabelle C-10	Statistische Werte der Elastizitätsmodule in N/mm <sup>2</sup> der Prüferserie 2B.B	209
Tabelle C-11	Größenunterschied zwischen den mittleren E-Modulen beim Vergleich der verschiedenen Keilzinkungen	210
Tabelle C-12	Statistische Werte der Biegefestigkeiten der Bauteile in N/mm <sup>2</sup> der Prüferserie 2B.B (ohne „Ausreißer“ inkl. Maximalwerte)	213
Tabelle C-13	Statistische Werte der Biegefestigkeiten der Bauteile in N/mm <sup>2</sup> der Prüferserie 2B.B (ohne „Ausreißer“ exkl. Maximalwerte)	213
Tabelle D-14	Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in kg/m <sup>3</sup> für die Prüferserie 3B.B	215
Tabelle D-15	Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> der Prüferserie 3B.B (ohne „Ausreißer“)	216
Tabelle D-16	Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in kg/m <sup>3</sup> für die Prüferserie 3K.B	217
Tabelle D-17	Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> der Prüferserie 3K.B (ohne „Ausreißer“)	218
Tabelle D-18	Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in kg/m <sup>3</sup> für die Prüferserie 3K.Z	219
Tabelle D-19	Statistische Werte der Keilzinkenzugfestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> für die Prüferserie 3K.Z	220
Tabelle E-20	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 1B.B-v01   und 1B.B-m01	221
Tabelle E-21	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 1B.B-v01     und 1B.B-m01	222
Tabelle E-22	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 1B.B-m03	223
Tabelle E-23	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 1B.B-m06	223
Tabelle E-24	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 2B.B-m11   und 2B.B-ms1	224
Tabelle E-25	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 2B.B-m13	224
Tabelle E-26	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 2B.B-ms3	225
Tabelle E-27	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 2B.B-v11     und 2B.B-vs1	225
Tabelle E-28	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 2B.B-m11     und 2B.B-ms1	225
Tabelle E-29	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 3B.B-m11   und 3B.B-ms1	226
Tabelle E-30	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 3B.B-m13   und 3B.B-ms3	226
Tabelle E-31	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 3K.B-m1 und 3K.B-ms	227
Tabelle E-32	Holzfeuchten $u$ in [%], Rohdichten $\rho_u$ in [kg/m <sup>3</sup> ] und Prüfkräfte $F$ in [N] der Versuchsreihe 3K.Z-m1 und 3K.Z-ms	228
Tabelle F-33	Statistische Werte der Biegegrandspannungen der Bauteile in N/mm <sup>2</sup> für die einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 1B.B (mit „Ausreißer“) – Berechnungsmethode „Balken –E <sub>0</sub> , G <sub>R</sub> “	235
Tabelle F-34	Statistische Werte der Biegefestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> für die Prüferserie 2B.B (mit „Ausreißer“)	254
Tabelle F-35	Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> der Prüferserie 3B.B (mit „Ausreißer“)	260

Tabelle F-36	Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> der Prüfsrie 3K.B (mit „Ausreißer“)	262
Tabelle F-37	Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm <sup>2</sup> der Prüfsrie 3K.Z (mit „Ausreißer“)	263

---

## 17 Diagrammverzeichnis

Diagramm 2-1	Verlauf des Faktors $k_n$ für Querschnitte mit unterschiedlicher Lagenanzahl	9
Diagramm 3-1	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferie 1B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte) 1B.B-vo1 , 1B.B-mo1 , 1B.B-mo3 , 1B.B-mo6 , 1B.B-vo1  , 1B.B-mo1	25
Diagramm 3-2	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Prüfreiheiten miteinander der Prüferie 1B.B	26
Diagramm 3-3	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten ohne Keilzinkungen Prüferie 2B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne Maximalwerte)	38
Diagramm 3-4	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Prüfreiheiten miteinander der Prüferie 2B.B (exkl. Maximalwerte)	40
Diagramm 3-5	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferie 3B.B (ohne „Ausreißer“ und ohne diskutierte Werte)	48
Diagramm 3-6	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferie 3K.B (ohne „Ausreißer“)	50
Diagramm 3-7	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenzugfestigkeiten der Prüferie 3K.Z	51
Diagramm 3-8	Zusammenfassung der Diagramme für den Vergleich der Ergebnisse der Keilzinkenprüfungen der Prüferien 3B.B (Diagramm 3-5), 3K.B (Diagramm 3-6) und 3K.Z (Diagramm 3-7)	52
Diagramm 3-9	Verhältnissfaktoren für Vergleich der Keilzinkenprüfungen der Prüferien 3B.B, 3K.B, 3K.Z	53
Diagramm 4-1	Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferie 1B.B für Vergleich mit der Prüferie 2B.B	56
Diagramm 4-2	Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferie 2B.B für Vergleich mit der Prüferie 1B.B, 3B.B und 3K.Z	57
Diagramm 4-3	Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferie 3B.B für Vergleich mit der Prüferie 2B.B	58
Diagramm 4-4	Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferie 3K.B für Vergleich mit der Prüferie 2B.B	59
Diagramm 4-5	Verwendete Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen der Prüferie 3K.Z für Vergleich mit der Prüferie 2B.B	60
Diagramm 4-6	Vergleich der Biegefestigkeiten der Bauteile <u>ohne</u> Keilzinkungen mit den Biegefestigkeiten der Bauteile <u>mit</u> liegenden Keilzinkungen	61
Diagramm 4-7	Vergleich der Biegefestigkeiten der Bauteile <u>ohne</u> Keilzinkungen mit den Biegefestigkeiten der Bauteile <u>mit</u> stehenden Keilzinkungen	62
Diagramm 4-8	Vergleich der Bauteil-Biegefestigkeiten mit den Keilzinken-Biegefestigkeiten	63
Diagramm 7-1	Gemessene Häufigkeitsverteilung des char. KARc-Wertes nach COLLING [11] und simulierte	95
Diagramm 7-2	Gemessene Häufigkeitsverteilung für das vielfache $k_{i,ges}$ des charakteristischen KARc-Wertes nach EHLBECK et al. [23] und simulierte	96
Diagramm 7-3	Gemessene Häufigkeitsverteilung der Ästigkeit nach COLLING [11] und simulierte	96
Diagramm 8-1	Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger <u>ohne</u> Keilzinkungen aus Abschnitt 3.5	105
Diagramm 8-2	Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger <u>ohne</u> Keilzinkungen aus Abschnitt 3.5	105
Diagramm 8-3	Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger <u>mit</u> Keilzinkungen aus Abschnitt 3.6	107
Diagramm 8-4	Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger <u>mit</u> Keilzinkungen aus Abschnitt 3.6	108
Diagramm 8-5	Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger <u>ohne</u> Keilzinkungen aus [46]	109
Diagramm 8-6	Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger <u>ohne</u> Keilzinkungen aus [46]	109
Diagramm 8-7	Vergleich der simulierten Biegefestigkeiten mit den Versuchswerten der Träger <u>mit</u> Keilzinkungen aus [47]	110
Diagramm 8-8	Simulierte Biegefestigkeiten und im Versuch ermittelte Biegefestigkeiten der Träger <u>mit</u> Keilzinkungen aus [47]	111
Diagramm 9-1	Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (Ästigkeit) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen	118
Diagramm 9-2	Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (Rohdichte) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen	118

Diagramm 9-3	Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (E-Modul) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen	119
Diagramm 9-4	Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Holzeigenschaften (Sortierklassen) für Brettsperrholzträger ohne Keilzinkenversagen	119
Diagramm 9-5	Einfluss der Trägerlänge auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit von Brettsperrholzträger mit Holzversagen	121
Diagramm 9-6	Einfluss der Trägerlänge auf die 5%-Quantilwerte von Brettsperrholzträger mit Holzversagen	121
Diagramm 9-7	Laminierungsfaktor in Abhängigkeit der Trägerlänge für Brettsperrholzträger mit Holzversagen	122
Diagramm 9-8	Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen	123
Diagramm 9-9	Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen	123
Diagramm 9-10	Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Trägerbreite für Brettsperrholzträger mit Holzversagen	124
Diagramm 9-11	Einfluss der Belastungslänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen	125
Diagramm 9-12	Einfluss der Belastungslänge auf die 5%-Quantile der Biegefestigkeit der Brettsperrholzträger mit Holzversagen	126
Diagramm 9-13	Laminierungsfaktoren in Abhängigkeit der Belastungslängen für Brettsperrhölzer mit Holzversagen	126
Diagramm 9-14	Biegefestigkeiten für den Querschnitt QS 1 (1 faserparallele Decklage) in Abhängigkeit der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit	128
Diagramm 9-15	Biegefestigkeiten für den Querschnitt QS 2 (2 faserparallele Decklagen) in Abhängigkeit der mittleren Keilzinkenzugfestigkeit	129
Diagramm 9-16	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	131
Diagramm 9-17	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkenversagen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	131
Diagramm 9-18	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	132
Diagramm 9-19	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	132
Diagramm 9-20	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	133
Diagramm 9-21	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die mittlere Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	133
Diagramm 9-22	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	134
Diagramm 9-23	Einfluss der Träger- und Brettlänge auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	134
Diagramm 9-24	Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit liegenden Keilzinkungen	135
Diagramm 9-25	Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit liegenden Keilzinkungen	135
Diagramm 9-26	Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit stehenden Keilzinkungen	136
Diagramm 9-27	Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte in Abhängigkeit der Trägerlänge mit stehenden Keilzinkungen	136
Diagramm 9-28	Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	138
Diagramm 9-29	Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	138
Diagramm 9-30	Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	139
Diagramm 9-31	Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	139
Diagramm 9-32	Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	140
Diagramm 9-33	Einfluss der Belastungsart auf die Mittelwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	140

Diagramm 9-34	Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	141
Diagramm 9-35	Einfluss der Belastungsart auf die 5%-Quantilwerte der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	141
Diagramm 9-36	Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit liegenden Keilzinkenverbindungen	142
Diagramm 9-37	Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit liegenden Keilzinkenverbindungen	142
Diagramm 9-38	Laminierungsfaktoren für die Mittelwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit stehenden Keilzinkenverbindungen	143
Diagramm 9-39	Laminierungsfaktoren für die 5%-Quantilwerte der Bauteilfestigkeiten in Abhängigkeit der Belastungslänge für Bauteile mit stehenden Keilzinkenverbindungen	143
Diagramm 9-40	Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	145
Diagramm 9-41	Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	145
Diagramm 9-42	Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	146
Diagramm 9-43	Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 1 (eine faserparallele Decklage)	146
Diagramm 9-44	Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	147
Diagramm 9-45	Einfluss der Trägerbreite auf die Mittelwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	147
Diagramm 9-46	Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit liegenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	148
Diagramm 9-47	Einfluss der Trägerbreite auf die 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeit der Träger mit stehenden Keilzinkungen für den Querschnitt QS 2 (zwei faserparallele Decklagen)	148
Diagramm 9-48	Verhältnismittelwerte der Mittelwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit liegenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1	149
Diagramm 9-49	Verhältnismittelwerte der Mittelwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit stehenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1	149
Diagramm 9-50	Verhältnismittelwerte der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit liegenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1	150
Diagramm 9-51	Verhältnismittelwerte der 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die Träger mit stehenden Keilzinkungen und unterschiedlichen Trägerbreiten aus den Werten des Querschnitts QS 2 zu QS 1	150
Diagramm B-1	Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten für die Prüferserie 1B.B	193
Diagramm B-2	Abweichungen der Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 1B.B von den Werten der Festigkeitsklasse C 24 nach DIN EN 338 [N4]	194
Diagramm B-3	Abweichungen der berechneten E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmodelle gegenüber den berechneten E-Moduln für das Berechnungsmodelle „Balken – $E_0$ , $G_R$ “ für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B	195
Diagramm B-4	Mittelwerte der E-Module für die Prüferserie 1B.B	196
Diagramm B-5	Einzelwerte und zugehörige Mittelwerte der Elastizitätsmodule nach dem Berechnungsmodell „Balken – $E_0$ , $G_R$ “ für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B	197
Diagramm B-6	Korrelation zwischen charakteristischer bzw. Mittelwert der Rohdichte und Mittelwert des Elastizitätsmoduls parallel nach DIN EN 338[N4]	198
Diagramm B-7	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegerandspannungen für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)	200
Diagramm B-8	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der mittleren Rohdichte für die einzelnen Festigkeitsklassen für Nadelholz der DIN EN 338 [N4]	202
Diagramm B-9	Einzelwert, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der ursprünglichen und kalibrierten Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen für die Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)	203
Diagramm B-10	Einzelwert, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der kalibrierten Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen für die Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)	204
Diagramm C-11	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten für die Prüferserie 2B.B	205

Diagramm C-12	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten für die Prüferserie 2B.B (ohne diskutierte Werte)	206
Diagramm C-13	Abweichungen der Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 2B.B von den Werten der Festigkeitsklasse C 24 nach DIN EN 338 [N4]	207
Diagramm C-14	Mittelwerte der E-Module für die verschiedenen Berechnungsmodelle der Prüferserie 2B.B	208
Diagramm C-15	Einzel- und Mittelwerte der Elastizitätsmodule für das Berechnungsmodell „Balken – $E_0$ , $G_R$ “ der Prüferserie 2B.B	208
Diagramm C-16	Verhältnissfaktoren der Mittelwerte für den Vergleich der Berechnungsmethoden („Schub“ ÷ „Balken“) für die Prüferserie 2B.B	210
Diagramm C-17	Exemplarische Darstellung des Verhältnisses Biegerandspannung $\sigma_R$ zu Schwerpunktspannung $\sigma_S$ in der äußersten Lage für den Querschnitt QS 125	211
Diagramm C-18	Exemplarische Darstellung des Verhältnisses der Biegerandspannungen für die beiden Berechnungsmodelle für den Querschnitt QS 125	212
Diagramm C-19	Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegerandspannungen für die Prüferserie 2B.B (ohne „Ausreißer“)	213
Diagramm C-20	Prozentuale Änderung der Mittel- und 5%-Quantilwerte, wenn die Maximalwerte nicht berücksichtigt werden im Vergleich zu den Werten, wenn die Maximalwerte berücksichtigt werden für die Prüferserie 2B.B	214
Diagramm D-21	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 3B.B	215
Diagramm D-22	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3B.B (ohne „Ausreißer“)	216
Diagramm D-23	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 3K.B	217
Diagramm D-24	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3K.B (ohne „Ausreißer“)	218
Diagramm D-25	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 3K.Z	219
Diagramm D-26	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenzugfestigkeiten der Prüferserie 3K.Z	220
Diagramm F-27	Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-vo1	229
Diagramm F-28	Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo1	229
Diagramm F-29	Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo3	230
Diagramm F-30	Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo6	230
Diagramm F-31	Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-vo1	231
Diagramm F-32	Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo1	231
Diagramm F-33	Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-vo1	232
Diagramm F-34	Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo1	232
Diagramm F-35	Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo3	233
Diagramm F-36	Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo6	233
Diagramm F-37	Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-vo1	234
Diagramm F-38	Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo1	234
Diagramm F-39	Einzelwert, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegerandspannungen der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 1B.B (mit „Ausreißer“) Berechnungsmethode „Balken – $E_0$ , $G_R$ “	235
Diagramm F-40	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-vo1   (ohne „Ausreißer“)	236
Diagramm F-41	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-vo1   (ohne „Ausreißer“)	236
Diagramm F-42	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo1   (ohne „Ausreißer“)	237
Diagramm F-43	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo1   (ohne „Ausreißer“)	237

Diagramm F-44	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo3   (ohne „Ausreißer“)	238
Diagramm F-45	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo3   (ohne „Ausreißer“)	238
Diagramm F-46	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo6   (ohne „Ausreißer“)	239
Diagramm F-47	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo6   (ohne „Ausreißer“)	239
Diagramm F-48	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-vo1    (ohne „Ausreißer“)	240
Diagramm F-49	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-vo1    (ohne „Ausreißer“)	240
Diagramm F-50	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo1    (ohne „Ausreißer“)	241
Diagramm F-51	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo1    (ohne „Ausreißer“)	241
Diagramm F-52	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11	242
Diagramm F-53	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m13	242
Diagramm F-54	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-v11	243
Diagramm F-55	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11	243
Diagramm F-56	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1	244
Diagramm F-57	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms3	244
Diagramm F-58	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-vs1	245
Diagramm F-59	Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1	245
Diagramm F-60	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11	246
Diagramm F-61	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m13	246
Diagramm F-62	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-v11	247
Diagramm F-63	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11	247
Diagramm F-64	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1	248
Diagramm F-65	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms3	248
Diagramm F-66	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-vs1	249
Diagramm F-67	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1	249
Diagramm F-68	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-m11	250
Diagramm F-69	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-m13	250
Diagramm F-70	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-v11	251
Diagramm F-71	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-m11	251
Diagramm F-72	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-ms1	252
Diagramm F-73	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-ms3	252
Diagramm F-74	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-vs1	253
Diagramm F-75	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-ms1	253
Diagramm F-76	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der Prüfserie 2B.B nach dem Berechnungsmodell „Balken – $E_0$ , $G_R$ “ (mit „Ausreißer“)	255
Diagramm F-77	Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Prüfreihen miteinander der Prüfserie 2B.B (inkl. Maximalwerte)	256

Diagramm F-78	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-m11	257
Diagramm F-79	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-m13	257
Diagramm F-80	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-m11 + 3B.B-m13	258
Diagramm F-81	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-ms1	258
Diagramm F-82	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-ms3	259
Diagramm F-83	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-ms1 + 3B.B-ms3	259
Diagramm F-84	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3B.B (mit „Ausreißer“)	260
Diagramm F-85	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3K.B-m1	261
Diagramm F-86	Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3K.B-ms	261
Diagramm F-87	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3K.B (mit „Ausreißer“)	262
Diagramm F-88	Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3K.Z (mit „Ausreißer“)	263

## 18 Bildverzeichnis

Bild 1-1	Gliederung der Lagenhölzer	1
Bild 1-2	Prinzipieller Aufbau einer Brettsperrholzplatte	2
Bild 2-1	Exemplarischer Verlauf der Normal- und Schubspannungen über die Querschnittshöhe für einen fünfteiligen Brettsperrholzquerschnitt (Annahme: Elastizitätsmodul der Querlagen $E_{90} \neq 0$ )	6
Bild 3-1	Übersicht der untersuchten Prüfparameter auf die Tragfähigkeit von Brettsperrhölzern - - - - - bedeutet zugehörig zueinander	19
Bild 3-2	Zusammenstellung der zu vergleichenden Versuchsreihen zur Ermittlung der verschiedenen Einflussparameter auf die Tragfähigkeit von Brettsperrhölzern	19
Bild 3-3	Aufbau der verschiedenen Querschnitte	22
Bild 3-4	Breiten der untersuchten Prüfkörper	23
Bild 3-5	Prüfaufbau der Biegeprüfungen für Brettsperrholzelemente ohne Keilzinkenverbindungen	23
Bild 3-6	Aufbau der verschiedenen Querschnitte	30
Bild 3-7	Breiten der untersuchten Prüfkörper	31
Bild 3-8	Unterschied zwischen liegender (links) und stehender (rechts) Keilzinkung	31
Bild 3-9	Vorgehen bei der Herstellung der keilgezinkten Bretter für die Bauteilversuche und Keilzinkenprüfungen	33
Bild 3-10	Prüfaufbau für die Biegeprüfungen der Brettsperrholzelemente mit Keilzinkenverbindungen	34
Bild 3-11	Äste im Bereich der Keilzinkenverbindung	35
Bild 3-12	Unsauber ausgeführte Keilzinkenverbindung	36
Bild 3-13	Faserabweichung im Bereich der Keilzinkenverbindung	36
Bild 3-14	Faserabweichung im Holz (PK-Nr.: 2B.B-v111-05)	36
Bild 3-15	Faserabweichung im Holz (PK-Nr.: 2B.B-v111-07)	37
Bild 3-16	Exemplarische Darstellung des Anteils Normal-/Zugspannung und Biegespannung an der Biegerandspannung für den Querschnitt QS 125 (für die äußerste Zuglamelle, $z = 125/2 - 13,5$ )	44
Bild 3-17	Prüfaufbau für die Biegeprüfungen der Keilzinkenverbindungen	46
Bild 3-18	Prüfaufbau für die Zugprüfungen der Keilzinkenverbindungen	46
Bild 3-19	Vollständiges Versagen innerhalb des Keilzinkenbereichs (links: liegende Keilzinkung, rechts: stehende Keilzinkung)	47
Bild 3-20	Gleichzeitiges Versagen im Keilzinken- und Ast- bzw. Holzbereich (links: liegende Keilzinkung, rechts: stehende Keilzinkung)	47
Bild 3-21	Vollständiges Versagen außerhalb des Keilzinkenbereichs (links: liegende Keilzinkung, rechts: stehende Keilzinkung)	47
Bild 5-1	Aufbau eines Brettsperrholzträgers mit der zugehörigen Nummerierung/Indizierung der einzelnen Lagen und Lamellenschichten.	65
Bild 5-2	Elastische Kopplung der Lagen in Längsrichtung	66
Bild 5-3	Statisches System und Aufbau des 3-teiligen Querschnitts	67
Bild 5-4	Inneren Kräfte für den 3-teiligen Querschnitt	67
Bild 5-5	Geometrische Beziehungen für die verformten Lagen $i$ und $i+1$ unter der Annahme affiner Biegelinien	68
Bild 5-6	Freiheitsgrade am klassischen Stabelement	71
Bild 5-7	Freiheitsgrade an einem beliebigen Brettsperrholzelement	71
Bild 5-8	Numerische Lösung: maximale Normalkräfte in den Randquerschnitten 1 und 3	76
Bild 5-9	Numerische Lösung: maximalen Durchbiegungen	76
Bild 6-1	Bei den FE-Berechnungen für den Träger 1 (QS129) zugrunde gelegter Träger	78
Bild 6-2	Bei den FE-Berechnungen für den Träger 2 (QS125-3L) zugrunde gelegter Träger	78
Bild 6-3	Spannung $\sigma_{3,ef}$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{3,eff,0}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmodul $E_1$ und $E_2$ für den Träger 1 (QS129)	81
Bild 6-4	Spannung $\sigma_{4,eff}$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{4,eff,0}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmodul $E_1$ und $E_2$ für den Träger 1 (QS129)	81
Bild 6-5	Spannung $ef\sigma_3$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{3,eff,0}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmodul $E_1$ und $E_2$ für den Träger 2 (QS125-3L)	82
Bild 6-6	Spannung $\sigma_{4,eff}$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{4,eff,0}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Lagen-Elastizitätsmodul $E_1$ und $E_2$ für den Träger 2 (QS125-3L)	82
Bild 6-7	Spannung $\sigma_3$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{3,eff}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Verhältnissen $E_3/E_1$ und $E_4/E_2$ der Elastizitätsmodule für den Träger 1 (QS129)	84
Bild 6-8	Spannung $\sigma_4$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{4,eff}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Verhältnissen $E_3/E_1$ und $E_4/E_2$ der Elastizitätsmodule für den Träger 1 (QS129)	85

---

Bild 6-9	Spannung $\sigma_3$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{3,eff}$ ) in Element 3 in Abhängigkeit von den Verhältnissen $E_3/E_1$ und $E_4/E_2$ der Elastizitätsmodule für den Träger 2 (QS125-3L) _____	85
Bild 6-10	Spannung $\sigma_4$ (bezogen auf die Spannung $\sigma_{4,eff}$ ) in Element 4 in Abhängigkeit von den Verhältnissen $E_3/E_1$ und $E_4/E_2$ der Elastizitätsmodule für den Träger 2 (QS125-3L) _____	86
Bild 7-1	Arbeitslinie einer Zelle unter Druckbeanspruchung _____	98
Bild 7-2	Arbeitslinie einer Zelle unter Zugbeanspruchung _____	99
Bild 7-3	Berechnung des Ersatz-Elastizitätsmoduls $E'_{c,0}$ eines bereits ausgefallenen Druckelementes _____	100
Bild 7-4	Exemplarische Querschnittsaufbauten der vier prinzipiellen Arten von BSP-Querschnitten _____	102
Bild 7-5	Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Zugelements für den Querschnittstyp 2DL-1nL _____	102
Bild 7-6	Umgebungsbereich eines bereits ausgefallenen Zugelementes zur Definition einer „ausgefallenen Lamellenschicht“ (Draufsicht) _____	103
Bild 9-1	„Standard“-Träger mit einer faserparallelen Decklage (QS1) für die Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen _____	112
Bild 9-2	„Standard“-Träger mit zwei faserparallelen Decklage (QS2) für die Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften der beiden „Materialien“ Holz und Keilzinkenverbindungen _____	112

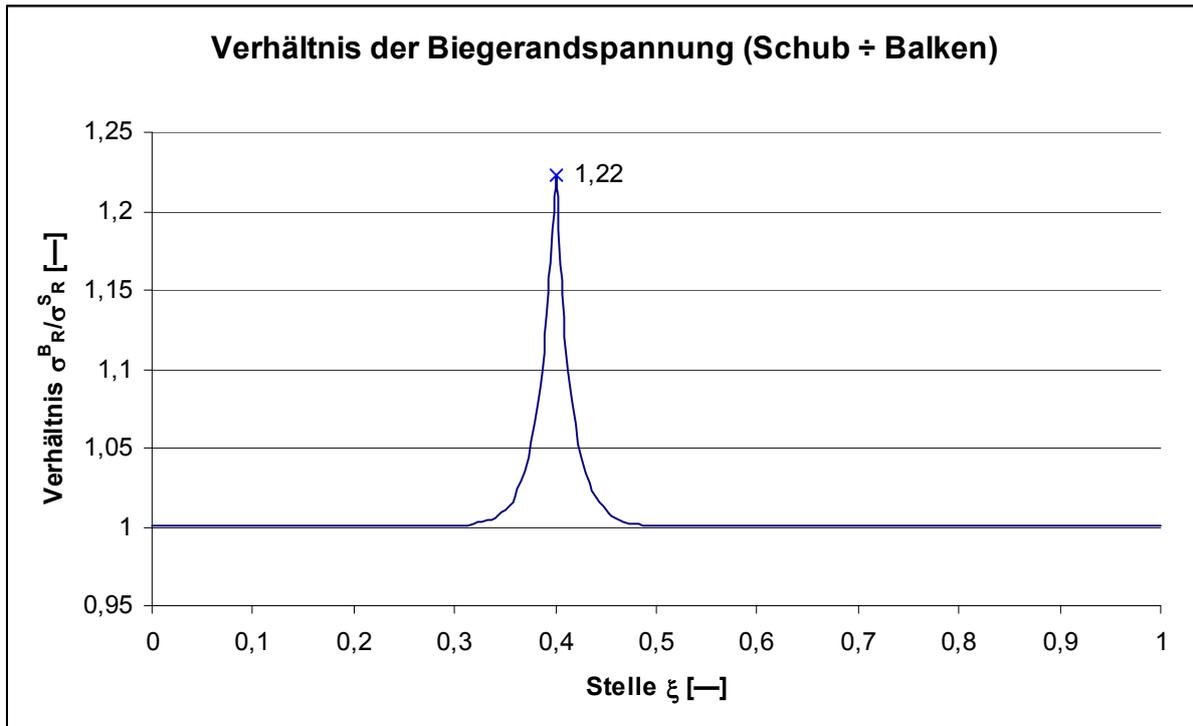
---

## Anhang A Ergänzende Ausführungen zum Abschnitt 5

### Anhang A.1 Koeffizientenmatrix A für den dreiteiligen Querschnitt

$$\mathbf{A} = \left[ \begin{array}{cccc|cccc|cccc|c}
 0 & 0 & 0 & -1/EA_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -c_{\parallel,1/2} \cdot \frac{h_1}{2} & 0 & -1 & 0 & c_{\parallel,1/2} \cdot \frac{h_1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\parallel,1/2} \cdot \left( \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \cdot \frac{h_1}{2} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -c_{\parallel,1/2} & 0 & 0 & 0 & c_{\parallel,1/2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\parallel,1/2} \cdot \left( \frac{h_1 + h_2}{2} \right) \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/EA_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -c_{\parallel,1/2} \cdot \frac{h_2}{2} & 0 & 0 & 0 & (c_{\parallel,1/2} - c_{\parallel,2/3}) \cdot \frac{h_2}{2} & 0 & -1 & 0 & c_{\parallel,2/3} \cdot \frac{h_2}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \left[ c_{\parallel,1/2} \cdot \left( \frac{h_1 + h_2}{2} \right) + c_{\parallel,2/3} \cdot \left( \frac{h_2 + h_3}{2} \right) \right] \cdot \frac{h_2}{2} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 c_{\parallel,1/2} & 0 & 0 & 0 & -(c_{\parallel,1/2} + c_{\parallel,2/3}) & 0 & 0 & 0 & c_{\parallel,2/3} & 0 & 0 & 0 & 0 -c_{\parallel,1/2} \cdot \left( \frac{h_1 + h_2}{2} \right) + c_{\parallel,2/3} \cdot \left( \frac{h_2 + h_3}{2} \right) \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/EA_3 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{\parallel,2/3} \cdot \frac{h_3}{2} & 0 & 0 & 0 & c_{\parallel,2/3} \cdot \frac{h_3}{2} & 0 & -1 & 0 & 0 c_{\parallel,2/3} \cdot \left( \frac{h_2 + h_3}{2} \right) \cdot \frac{h_3}{2} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\parallel,2/3} & 0 & 0 & 0 & -c_{\parallel,2/3} & 0 & 0 & 0 & 0 -c_{\parallel,2/3} \cdot \left( \frac{h_2 + h_3}{2} \right) \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 1/EI_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right]$$

Glg. A-1



**Diagramm C-18** Exemplarische Darstellung des Verhältnisses der Biege- und Schubspannungen für die beiden Berechnungsmodelle für den Querschnitt QS 125

Der obige Vergleich der beiden Berechnungsmodelle zeigt, dass bei der Schubanalogie im Bereich einer Einzellast hohe örtliche Spitzen auftreten, die beim Modell „Balken“ nicht vorhanden sind. Da derartige örtliche Spitzen jedoch nicht realistisch sind, werden hierdurch die Festigkeiten der Prüfkörper verfälscht, die im Bereich der Lasteinleitung zu Bruch gingen. Aus diesem Grund wurden für die gesamten Betrachtungen nur die Ergebnisse des Modells „Balken –  $E_0$ ,  $G_R$ “ herangezogen.

### Anhang C.3.2 Ergebnisse ohne Berücksichtigung der „Ausreißer“<sup>1</sup> und einzelner „Extremwerte“

Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen (siehe z.B. COLLING [11], EHLBECK et al. [24]) haben gezeigt, dass mit höherer Rohdichte der Bretter auch die Festigkeit der Keilzinkenverbindungen zunimmt. COLLING [11] weist in seiner Arbeit aber auch darauf hin, dass der Einfluss der Rohdichte mit der Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen nicht besonders eng korreliert ist. Der ermittelte Korrelationskoeffizient lag unter 0,5. Die geringe Korrelation erklärt er mit produktionsabhängigen Faktoren, die ebenfalls die Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen bestimmen, welche jedoch zahlenmäßig nicht oder nur schwer zu erfassen sind.

Obwohl sich sowohl die Mittel- als auch die 5%-Quantilwerte der einzelnen Versuchsreihen unterscheiden (siehe Anhang B.1) ist eine Kalibrierung der Bauteilbiegefestigkeiten aufgrund der geringen Abhängigkeit zwischen Rohdichte und Keilzinkenbiegefestigkeit als zweifelhaft anzusehen.

<sup>1</sup> Bauteile mit

- - Holzversagen in der äußersten Zuglamelle
- - Ast innerhalb des Keilzinkenbereichs
- - Unsauber ausgeführte Keilzinkenverbindung
- - Faserabweichung im Keilzinkenbereich
- - Faserabweichung im Holz

## Anhang A.2 „Maple Worksheet“ zum Abschnitt 5.3

> restart;

### Koppelkraft

>  $pk := x \rightarrow P1 \cdot \exp\left(-\left(\frac{1}{\alpha^2}\right) \cdot x\right) + P2 \cdot \exp\left(\left(\frac{1}{\alpha^2}\right) \cdot x\right);$

$$pk := x \rightarrow P1 e^{(-\sqrt{\alpha} x)} + P2 e^{(\sqrt{\alpha} x)}$$

>  $\alpha := \frac{(BA + BB) \cdot S}{BA \cdot BB};$

$$\alpha := \frac{(BA + BB) S}{BA BB}$$

>  $PA := unapply(-pk(x), x);$   
 $PB := unapply(pk(x), x);$

$$PA := x \rightarrow -P1 e^{\left(-\sqrt{\frac{(BA + BB) S}{BA BB}} x\right)} - P2 e^{\left(\sqrt{\frac{(BA + BB) S}{BA BB}} x\right)}$$

$$PB := x \rightarrow P1 e^{\left(-\sqrt{\frac{(BA + BB) S}{BA BB}} x\right)} + P2 e^{\left(\sqrt{\frac{(BA + BB) S}{BA BB}} x\right)}$$

### Ebene A (Anteil aus Biegeverformung - diese Ebene hat nur Biegeverformung)

>  $QA := unapply(int(-PA(x), x = 0 .. x) + QA0, x) :$   
 $MA := unapply(int(QA(x), x = 0 .. x) + MA0, x) :$   
 $\varphi A := unapply\left(int(-MA(x), x = 0 .. x) \cdot \frac{1}{BA} + \varphi A0, x\right) :$   
 $wA := unapply(int(\varphi A(x), x = 0 .. x) + wA0, x) :$

### Ebene B (Anteil aus Biegeverformung und Schubverformung)

#### Anteil aus Biegeverformung

>  $QB := unapply(int(-PB(x), x = 0 .. x) + QB0, x) :$   
 $MB := unapply(int(QB(x), x = 0 .. x) + MB0, x) :$   
 $\varphi B := unapply\left(int(-MB(x), x = 0 .. x) \cdot \frac{1}{BB} + \varphi B0, x\right) :$   
 $wMB := unapply(int(\varphi B(x), x = 0 .. x) + wMB0, x) :$

## Anteil aus Schubverformung

- >  $QB := unapply(int(-pk(x), x = 0..x) + QB0, x) :$   
 $wQB := unapply\left(int(QB(x), x = 0..x) \cdot \frac{1}{S} + wQB0, x\right) :$

## Verformung der Ebene B aus beiden Anteilen

- >  $wB := unapply(wQB(x) + wMB(x), x) :$

## Zusammenfassung der Schnittgrößen aus den beiden Ebenen

- >  $Q := unapply(QA(x) + QB(x), x) :$   
 $M := unapply(MA(x) + MB(x), x) :$

## Berücksichtigung der Randbedingungen

### Randbedingungen bei x=0 (Trägeranfang)

#### Trägeranfang (x=0)

- >  $eq1 := wMB(0) = 0 :$   
 $eq2 := wQB(0) = 0 :$   
 $eq3 := MB(0) = 0 :$   
 $eq4 := wA(0) = 0 :$   
 $eq5 := MA(0) = 0 :$

#### Trägerende (x=l)

- >  $eq6 := QB(l) = 0 :$   
 $eq7 := \phi B(l) = 0 :$   
 $eq8 := Q(l) = F :$   
 $eq9 := \phi A(l) = 0 :$

### Allgemeine Bedingungen

- >  $eq10 := wA(x) = wB(x) :$   
 $eq11 := pk(0) = 0 :$

## Lösung des speziellen Systems unter Berücksichtigung der Randbedingungen

- >  $lsg := solve([eq1, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8, eq9, eq10, eq11], [wMB0, wQB0, \phi B0, MB0, QB0, wA0, \phi A0, MA0, QA0, P1, P2]) :$   
 $assign(lsg);$

## Zeichnen der Zustandslinien für expliziten Querschnitt

### Festlegen der Wert

- >  $BA := 2 \cdot \frac{11000 \cdot 150 \cdot 27^3}{12};$   
 $BB := 2 \cdot 11000 \cdot 150 \cdot 27 \cdot \left( \frac{(30 + 27)}{2} \right)^2 ;$   
 $S := \left( \frac{1}{150 \cdot (30 + 27)^2} \cdot \left( \frac{27}{2 \cdot 690} + \frac{30}{69} + \frac{27}{2 \cdot 690} \right) \right)^{-1} ;$   
 $F := 5000 \# 0.5 \cdot 10000 ;$   
 $l := 2250 \# 0.5 \cdot 4500 ;$

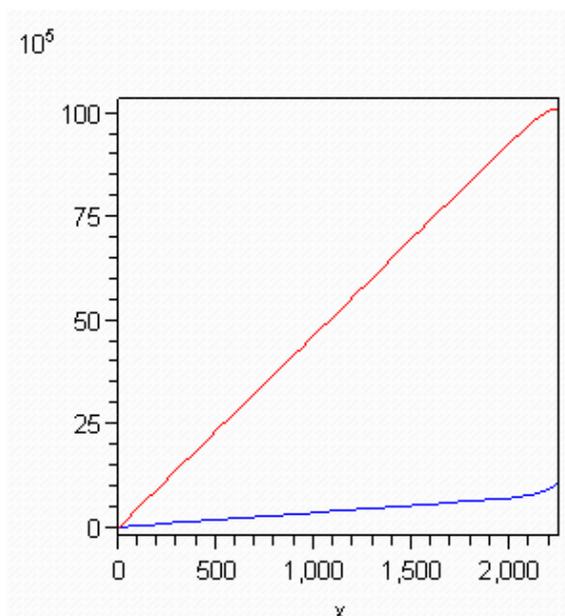
$$BA := 5412825000$$

- >  $wmax := evalf(wA(l));$   
 $Nmax := evalf\left(\frac{MB(l)}{BB} \cdot 11000 \cdot \left(\frac{84}{2} - \frac{27}{2}\right) \cdot 150 \cdot 27 \cdot 10^{-3}\right);$

$$wmax := 253.2400501$$

$$Nmax := 177.9225335$$

- >  $p1 := plot(MA(x), x = 0 .. l, color = blue) ;$   
 $p2 := plot(MB(x), x = 0 .. l, color = red) ;$   
 $plots[display]([p1, p2]);$



### Anhang A.3 Untermatrizen der Koeffizientenmatrix A

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{14} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} & \mathbf{A}_{24} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{32} & \mathbf{A}_{33} & \mathbf{A}_{34} \\ \mathbf{A}_{41} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{44} \end{bmatrix} \quad \text{Glg. A-2}$$

$$\mathbf{A}_{11}^{\text{vk}} = \begin{pmatrix} EA_1^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & EI_1^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}_{22}^{\text{vk}} = \begin{pmatrix} EA_2^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & EI_2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}_{33}^{\text{vk}} = \begin{pmatrix} EA_3^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & EI_3^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Glg. A-3}$$

$$\mathbf{A}_{11}^{\text{kv}} = \begin{pmatrix} c_{\parallel,I} & \frac{h_1}{2} \cdot c_{\parallel,I} & 0 \\ \frac{h_1}{2} \cdot c_{\parallel,I} & \frac{h_1^2}{4} \cdot c_{\parallel,I} & 0 \\ 0 & 0 & c_{\perp,I} \end{pmatrix} \quad \mathbf{A}_{33}^{\text{kv}} = \begin{pmatrix} c_{\parallel,II} & \\ & \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{22}^{\text{kv}} = \begin{pmatrix} c_{\parallel,I} + c_{\parallel,II} & -\frac{h_2}{2} \cdot (c_{\parallel,I} - c_{\parallel,II}) & 0 \\ -\frac{h_2}{2} \cdot (c_{\parallel,I} - c_{\parallel,II}) & \frac{h_2^2}{4} \cdot (c_{\parallel,I} + c_{\parallel,II}) & 0 \\ 0 & 0 & c_{\perp,I} + c_{\perp,II} \end{pmatrix}$$

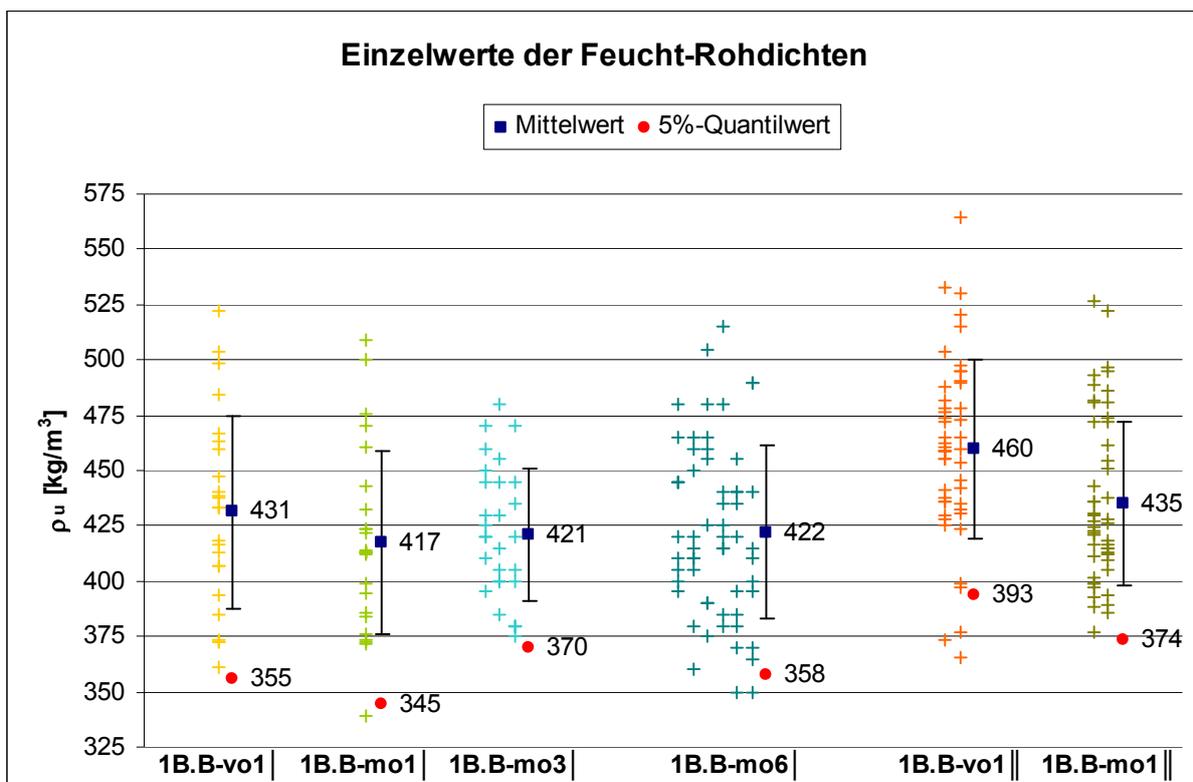
## Anhang B Erweiterte Ergebnisse zu den Bauteilversuchen ohne Keilzinkenverbindungen (1B.B)

### Anhang B.1 Ergebnisse der Rohdichtebestimmung

Die Einzelwerte der Feucht-Rohdichten (zum Zeitpunkt der Prüfung) mit einer mittleren Holzfeuchte von ca. 10% bis 13% wurden anhand einer Gauß-Normalverteilung statistisch ausgewertet. Die statistischen Werte sind in der Tabelle B-1 angegeben. Im Diagramm B-1 sind die Einzelwerte jeder Versuchsreihe dargestellt. Die Werte der Holzfeuchten und Rohdichten für die einzelnen Prüfkörper sind im Anhang E.1 angegeben.

**Tabelle B-1** Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in  $\text{kg/m}^3$  für die einzelne Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B

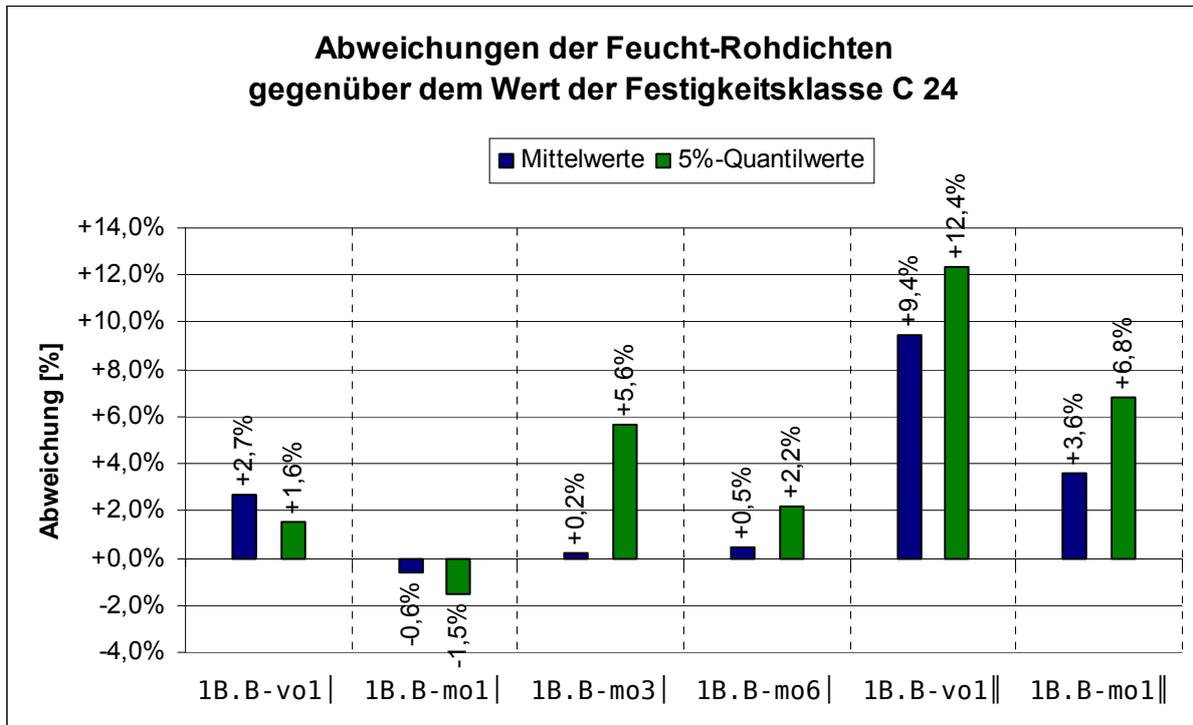
Statistischer Wert	1B.B vo1	1B.B mo1	1B.B mo3	1B.B mo6	1B.B vo1	1B.B mo1
Anzahl n	25	25	30	60	49	48
Minimum $x_{\min}$	361	339	375	350	366	377
Maximum $x_{\max}$	522	509	480	515	564	526
Mittelwert $x_M$	431	417	421	422	460	435
Standardabweichung $s_x$	43,3	41,5	29,64	39,10	40,37	37,15
Variationskoeffizient $v_x$	10,0%	9,9%	7,0%	9,3%	8,8%	8,5%
Beiwert Anzahl $k_n$	1,75	1,75	1,73	1,645	1,645	1,645
5%-Quantilwert $x_{05}$	355	345	370	358	393	374



**Diagramm B-1** Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten für die Prüferserie 1B.B

Die Auswertung der Rohdichten lässt folgendes erkennen:

- Die Mittelwerte der Rohdichten liegen alle auf ungefähr dem gleichen Niveau von ca.  $\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$   
Ausnahme: 1B.B-vo1|| Mittelwert ist deutlich größer als bei den anderen
- Größere Unterschiede sind bei den 5%-Quantilwerten der einzelnen Versuchsreihen festzustellen
- Mittel- und 5%-Quantilwert von 1B.B-vo1|| liegt deutlich über den Werten aller anderen Versuchsreihen
- Die Abweichungen der Mittel- und 5%-Quantilwerte der einzelnen Reihen von den Sollwerten der Festigkeitsklasse C 24 ( $\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ ) nach DIN EN 338 [N4] sind im Diagramm B-2 angegeben.



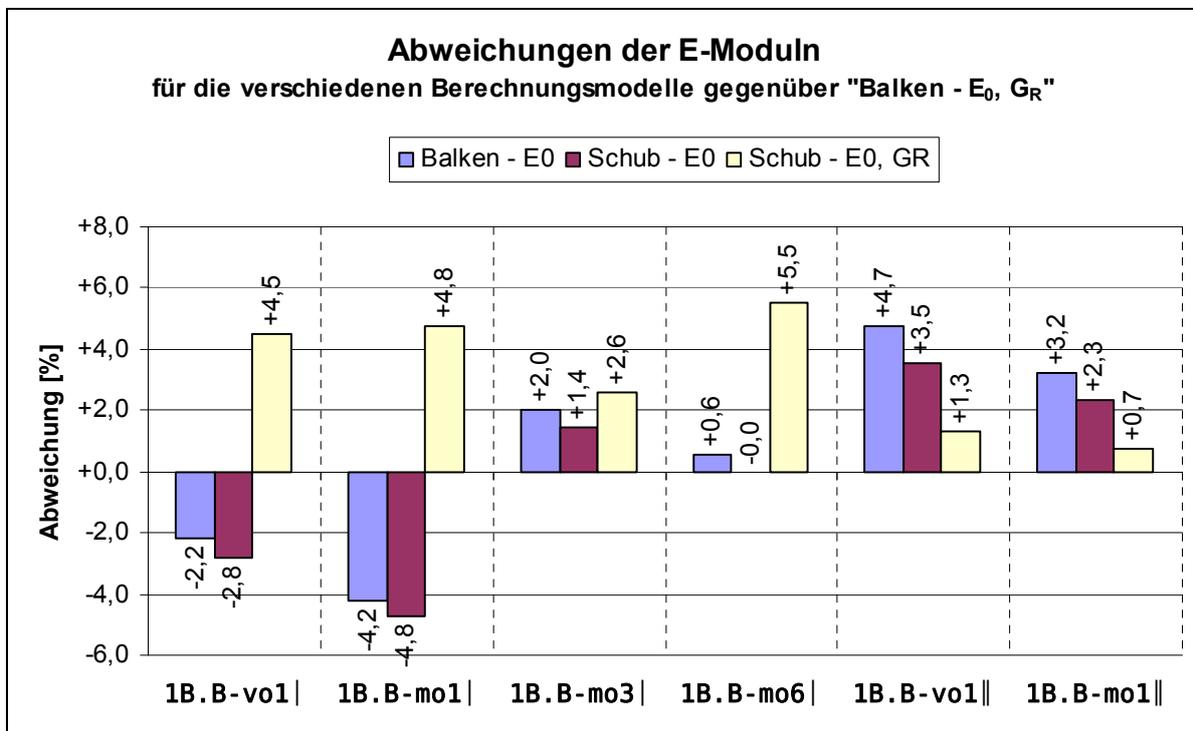
**Diagramm B-2** Abweichungen der Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 1B.B von den Werten der Festigkeitsklasse C 24 nach DIN EN 338 [N4]

Aufgrund der hohen Korrelation zwischen Rohdichte und Biege-/Zugfestigkeit von Holz ist die hohe mittlere Rohdichte der Reihe 1B.B-vo1|| bei der Auswertung der Festigkeit zu berücksichtigen.

## Anhang B.2 Ergebnisse der Steifigkeitsbetrachtungen

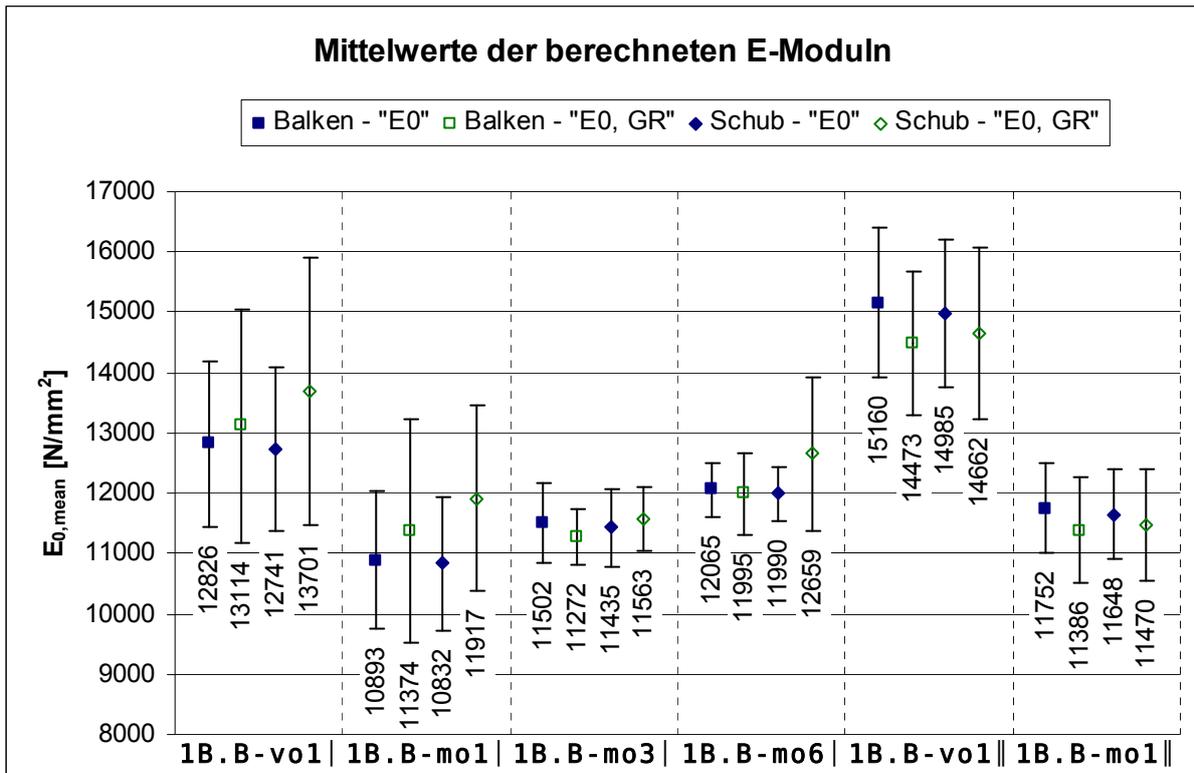
### Anhang B.2.1 Allgemein

Für die Einzelwerte der aus den Versuchen rückgerechneten E-Moduln ergeben sich, abhängig von der Berechnungsmethode, vereinzelt erhebliche Unterschiede. Bei den Mittelwerten variieren die Ergebnisse je nach Berechnungsmodell zwar ebenfalls, fallen mit einer maximalen Abweichung von ca.  $\pm 5,5\%$  gegenüber dem Berechnungsmodell „Balken,  $E_0$ ,  $G_R$ “ aber relativ gering aus (siehe Diagramm B-3).



**Diagramm B-3** Abweichungen der berechneten E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmodelle gegenüber den berechneten E-Moduln für das Berechnungsmodelle „Balken –  $E_0$ ,  $G_R$ “ für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B

Die nach den unterschiedlichen Berechnungsmodellen ermittelten Einzelwerte und Mittelwerte für die einzelnen Prüfreiheiten sind in den Diagrammen Diagramm F-27 bis Diagramm F-32 im Anhang F.1 dargestellt. Um die Unterschiede für die vier Modelle besser erkennen zu können sind die Mittelwerte im Diagramm B-4 zusammengefasst.



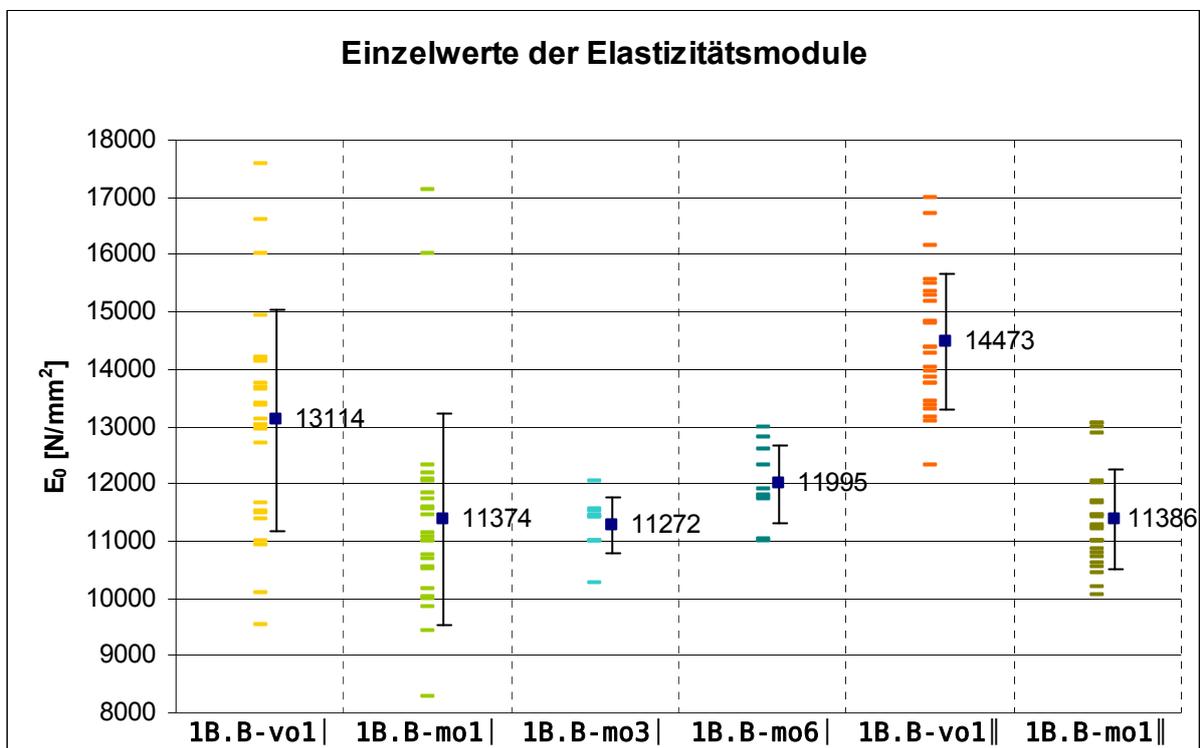
**Diagramm B-4 Mittelwerte der E-Module für die Prüfserie 1B.B**

Da die Unterschiede für die verschiedenen Berechnungsmethoden bei den Mittelwerten relativ gering ausfallen (siehe Diagramm B-3), werden für die weiteren Betrachtungen zu den Steifigkeiten nur noch die Ergebnisse der Berechnungsmethode „Balken – E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ herangezogen. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind für diese Berechnungsmethode für die verschiedenen Versuchsreihen in der Tabelle B-2 angegeben. Die Einzelwerte sowie die zugehörigen Mittelwerte der Elastizitätsmodule für die Berechnungsmethode „Balken – E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ enthält das Diagramm B-5.

**Tabelle B-2** Statistische Werte der ermittelten Elastizitätsmodule in  $\text{N/mm}^2$  für die Bauteile der einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B

Statistischer Wert	1B.B vo1   <sup>1</sup>	1B.B mo1   <sup>2</sup>	1B.B mo3   <sup>3</sup>	1B.B mo6   <sup>4</sup>	1B.B vo1    <sup>5</sup>	1B.B mo1    <sup>6</sup>
Anzahl n	25	25	10	10	24	25
Minimum $x_{\min}$	9526	8275	10282	11002	12332	10054
Maximum $x_{\max}$	17595	17130	12047	12978	16995	13051
Mittelwert $x_M$	13114	11374	11272	11995	14473	11386
Standardabweichung $s_x$	1939	1841	474	680	1189	872
Variationskoeffizient $v_x$	14,8%	16,2%	4,2%	5,7%	8,2%	7,7%

1 B.B-vo1| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - visuell sortierte Bretter - eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
 2 1B.B-mo1| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter - eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
 3 1B.B-mo3| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter - eine faserparallele Decklage - drei nebeneinander liegende Lamellenschicht  
 4 1B.B-mo6| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter - eine faserparallele Decklage - sechs nebeneinander liegende Lamellenschicht  
 5 1B.B-vo1|| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - visuell sortierte Bretter - zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht  
 6 1B.B-mo1|| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter - zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht



**Diagramm B-5** Einzelwerte und zugehörige Mittelwerte der Elastizitätsmodule nach dem Berechnungsmodell „Balken –  $E_0$ ,  $G_R$ “ für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B

## Anhang B.2.2 Einfluss der „Sortierung“

Vergleich der visuellen mit maschineller Sortierung  
 (1B.B-vo1| ÷ 1B.B-mo1|, 1B.B-vo1|| ÷ 1B.B-mo1||)

Der Vergleich der mittleren Elastizitätsmoduln für die Prüfkörper mit visuell und maschinell sortierten Brettern lässt folgendes erkennen:

- E-Modul der Prüfkörper mit visuell sortierten Brettern ist im Mittel größer als der mit maschinell sortierten, bei einer gleichzeitig größeren Streuung  
 Größenunterschied: ca. (20±5)%
- Die Mittelwerte der E-Moduln für die Prüfkörper mit visuell sortierten Brettern liegen deutlich über dem Biege-E-Modul von 11000 N/mm<sup>2</sup>, der für die Festigkeitsklasse C 24 in der DIN EN 338 [N4] angegeben ist. 1B.B-vo1|: ca. 19%, 1B.B-vo1||: ca. 32%
- Geringe Abweichungen der E-Moduln für die Prüfkörper mit maschinell sortierten Brettern von dem zur Festigkeitsklasse C 24 gehörenden Wert (11000 N/mm<sup>2</sup>)  
 1B.B-mo1|: ca. 3%, 1B.B-mo1||: ca. 9%

Die großen Abweichungen der E-Module vom Bezugswert (11000 N/mm<sup>2</sup>) für die visuell sortierten Prüfkörper, lassen sich damit erklären, dass bei der visuellen Sortierung ausschließlich sichtbare Sortierkriterien zur Beurteilung herangezogen werden. Da mechanische Eigenschaften wie z.B. der Elastizitätsmodul unberücksichtigt bleiben, hat visuell sortiertes Holz im Allgemeinen auch einen höheren Elastizitätsmodul, als maschinell sortierte Ware. Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, wurden die visuell sortierten Bretter nicht exakt nach den Sortierkriterien der Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1 [N2] sortiert, sondern auch Bretter verwendet, die besser als S10 waren (S10+).

Stellt man die Rohdichte und den Elastizitätsmodul der einzelnen Festigkeitsklassen der DIN EN 338 [N4] gegenüber, ist eine Zunahme des Elastizitätsmodul mit höher werdender Rohdichte festzustellen. Diagramm B-6 zeigt diesen Zusammenhang.

Die Auswertung der Rohdichten (siehe Anhang B.1) hat gezeigt, dass der Mittelwert und 5%-Quantilwert für die Rohdichte der Reihe vo1|| deutlich größer ausfällt als bei den übrigen Versuchsreihen. Aufgrund der Korrelation zwischen E-Modul und Rohdichte, kann daher der deutlich größere mittlere Elastizitätsmodul der Reihe vo1|| erklärt werden.

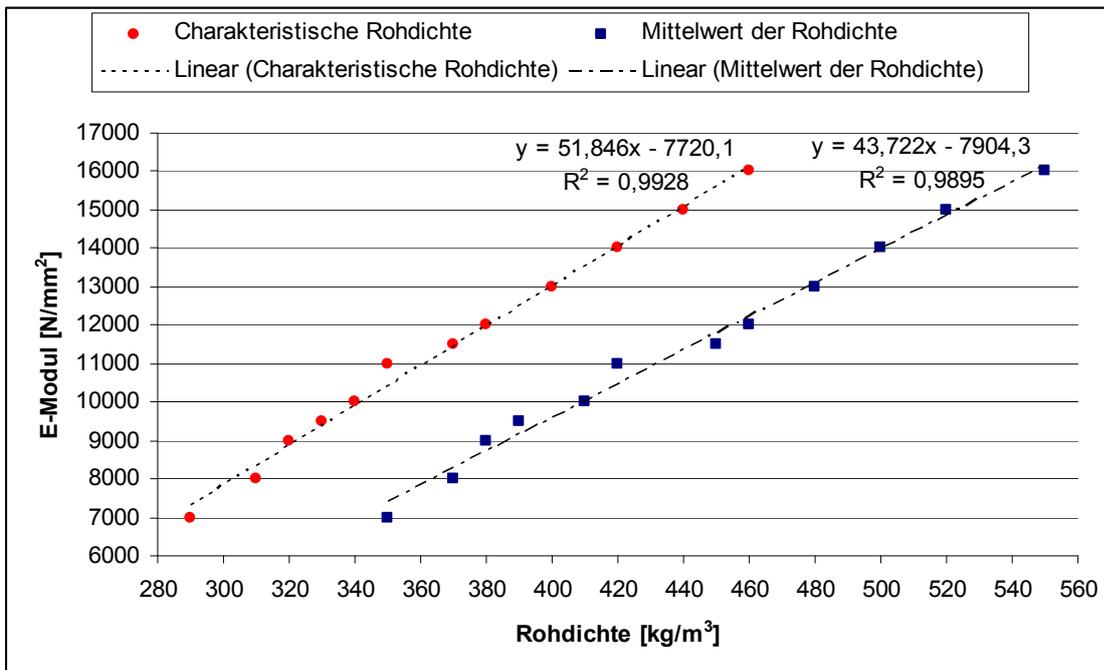


Diagramm B-6 Korrelation zwischen charakteristischer bzw. Mittelwert der Rohdichte und Mittelwert des Elastizitätsmoduls parallel nach DIN EN 338[N4]

### Anhang B.2.3 Einfluss des „Querschnitts“

Vergleich der Querschnittsaufbauten ( $1B.B-vo1||^1 \div 1B.B-vo1|^2$ ,  $1B.B-mo1||^3 \div 1B.B-mo1|^4$ )

Der Vergleich der beiden Querschnitte (QS 125<sup>5</sup> und QS 129<sup>6</sup>) ergibt folgendes (siehe Tabelle B-3):

- Der Mittelwert des E-Moduls für QS 129 ist bei den „visuellen“ Prüfkörpern um ca. 10% größer als der für QS 125
- Die Mittelwerte der E-Moduln bei den „maschinellen“ Prüfkörpern sind gleich groß
- Die Variationskoeffizienten der E-Moduln für QS 129 fallen um ca. 50% geringer aus als für QS 125 (sowohl bei den Prüfkörpern mit visuell als auch maschinell sortierten Brettern)

Der Grund für die deutlich geringeren Variationskoeffizienten für den Querschnitt QS 129 liegt an den zwei übereinander liegenden parallel zur Spannrichtung verlaufenden Lamellen (siehe Bild 3-3 unten), die zu einer „Homogenisierung“ des Prüfkörpers führen.

Durch die Verklebung der beiden faserparallelen Decklagen wirken diese wie parallel geschaltete Federn. Hierdurch tritt ein zusammenwirken dieser beiden Lagen auf, wodurch sich bei der Ermittlung der Steifigkeit ein gemittelter E-Modul der beiden Brettlagen ergibt, was zu einer geringeren Streubreite führt.

**Tabelle B-3 Größenunterschied zwischen den mittleren E-Moduln beim Vergleich des Querschnitts QS 129 mit dem Querschnitt QS 125**

Vergleich		Verhältnissfaktor
von	mit	
1B.B-vo1	$\div$ 1B.B-vo1	+10%
1B.B-mo1	$\div$ 1B.B-mo1	+0%

Der Unterschied zwischen den Reihen 1B.B-vo1|| und 1B.B-vo1| lässt sich damit erklären, dass die Rohdichten der Reihe 1B.B-vo1|| deutlich über denen der Reihe 1B.B-vo1| liegen (Anhang B.1).

### Anhang B.2.4 Einfluss der „Breite“

Vergleich der Bauteilbreiten ( $1B.B-mo3| \div 1B.B-mo1|$ ,  $1B.B-mo6| \div 1B.B-mo1|$ )

Für diese Prüfkörper kann folgendes festgehalten werden (siehe auch Tabelle B-4):

- Die Mittelwerte der E-Moduln liegen ungefähr auf dem gleichen Niveau (-1% und +5%)
- Die Variationskoeffizienten der Prüfkörper mit mehreren nebeneinander liegenden Lamellen fallen zwischen 60-65% geringer aus, als bei den Prüfkörpern mit nur einer Lamellenschicht

Da bei den 450 mm und 900 mm breiten Prüfkörpern mehrere Bretter nebeneinander liegen (Bild 3-4), ergibt sich hierdurch ebenfalls eine „Homogenisierung“ des Prüfkörpers, was sich in deutlich geringeren Variationskoeffizienten zeigt.

**Tabelle B-4 Größenunterschied zwischen den mittleren E-Moduln beim Vergleich der Bauteilbreiten**

Vergleich		Verhältnissfaktor
von	mit	
1B.B-mo3	$\div$ 1B.B-mo1	-1%
1B.B-mo6	$\div$ 1B.B-mo1	+5%

<sup>1</sup> 1B.B-vo1|| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - visuell sortierte Bretter - zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht

<sup>2</sup> 1B.B-vo1| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - visuell sortierte Bretter - eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht

<sup>3</sup> 1B.B-mo1|| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter - zwei faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht

<sup>4</sup> 1B.B-mo1| = Bauteilbiegeversuch ohne KZV - maschinell sortierte Bretter - eine faserparallele Decklage - eine nebeneinander liegende Lamellenschicht

<sup>5</sup> QS125 = Querschnitt mit einer faserparallelen Decklage

<sup>6</sup> QS129 = Querschnitt mit zwei faserparallelen Decklagen

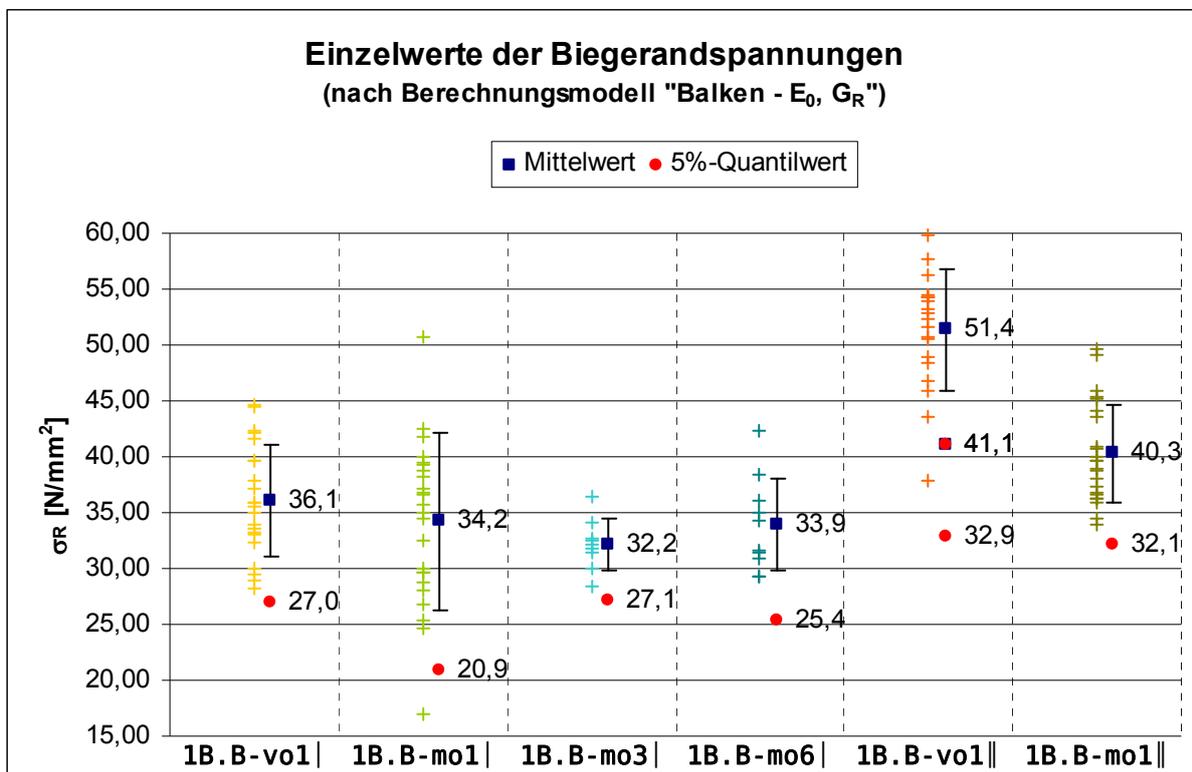
## Anhang B.3 Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen

### Anhang B.3.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung der „Ausreißer“<sup>1</sup>

In der Tabelle B-5 sind die statistischen Werte der Biegerandspannung für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B ohne Berücksichtigung der „Ausreißer“ angegeben. Die Einzelwerte der Biegerandspannungen sind im Diagramm B-7 aufgeführt.

**Tabelle B-5** Statistische Werte der Biemandspannungen in  $\text{N/mm}^2$  für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)

Statistischer Wert	1B.B vo1	1B.B mo1	1B.B mo3	1B.B mo6	1B.B vo1	1B.B mo1
Anzahl n	22	24	9	10	20	23
Minimum $x_{\min}$	28,15	17,04	28,40	29,20	37,78	34,02
Maximum $x_{\max}$	44,61	50,64	36,43	42,29	59,84	49,66
Mittelwert $x_m$	36,13	34,20	32,19	33,90	51,42	40,30
Standardabweichung $s_x$	5,01	7,94	2,28	4,10	5,44	4,38
Variationskoeffizient $v_x$	13,9%	23,2%	7,1%	12,1%	10,6%	10,9%
Beiwert Anzahl $k_n$	2,05	2,03	2,40	2,34	2,07	2,04
5%-Quantilwert $x_{05}$	26,97	20,94	27,10	25,38	41,07	32,12



**Diagramm B-7** Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegerandspannungen für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)

Im Diagramm B-7 ist zu erkennen, dass die Festigkeiten der Reihe vo1|| deutlich höher sind, als die der übrigen Reihen. Betrachtet man sowohl die Rohdichtewerte (siehe Anhang B.1) als auch die Elastizitätsmodule (siehe Anhang B.2) dieser Reihe, ist in beiden Fällen erkennbar, dass sie deutlich über den Werten der anderen Reihen liegen. Da die Biege- und Zugfestigkeit von Holz stark mit der

<sup>1</sup> Faserabweichung, Rollschubversagen oder Biegedruckversagen

Rohdichte und dem Elastizitätsmodul zusammenhängen (siehe GLOS [29]), lassen sich damit auch die deutlich größeren Festigkeiten der Reihe **vo1** erklären.

Da die einzelnen Versuchsreihen teilweise große Unterschiede bei den Rohdichten und Elastizitätsmodulen aufweisen, müssen die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen auf ein einheitliches „Bezugsniveau“ umgerechnet werden, damit sie miteinander verglichen werden können. Die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte sowie die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul sind für die einzelnen Versuchsreihen im Diagramm F-40 bis Diagramm F-51 des Anhang F.1 angegeben, wobei die „Ausreißer“ nicht berücksichtigt wurden.

Aus diesen Diagrammen ist zu erkennen, dass wegen der geringen Anzahl an Versuchswerten und den großen Streuungen der Ergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe es nicht möglich ist aussagekräftige Regressionsgleichungen zu ermitteln, mit deren Hilfe die Ergebnisse auf ein einheitliches Niveau umgerechnet werden können. Aus diesem Grund werden für die Umrechnungen der Festigkeiten die funktionale Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der mittleren Rohdichte der DIN EN 338 [N4] herangezogen, die sich aus den Werten der einzelnen Festigkeitsklassen für Nadelholz ergeben.

Die Festigkeitswerte wurden aus folgenden Gründen mit den mittleren Rohdichten umgerechnet:

- Mittelwerte der Rohdichten der einzelnen Versuchsreihen liegen in einem engeren Bereich
- 5%-Quantilwerte der Rohdichten sind abhängig von der Streuung

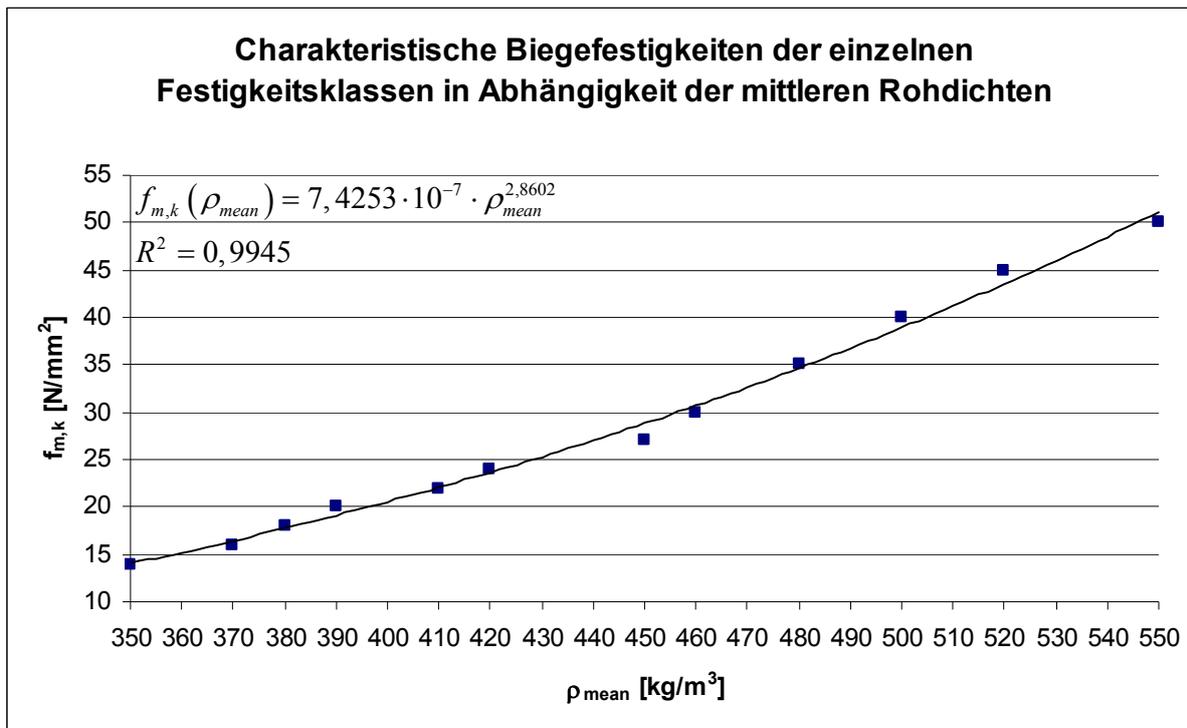
Der Elastizitätsmodul als Bezugsgröße wurde deshalb nicht gewählt, da die ermittelten Werte nicht den tatsächlichen Elastizitätsmodul der untersten Zuglamelle angeben, sondern nur einen mittleren E-Modul für alle Längslagen. Damit ist kein direkter Zusammenhang zwischen den Werten der Festigkeit und dem Elastizitätsmodul gegeben. Deshalb ist die Wahl des E-Moduls als Bezugsgröße für die „Kalibrierung“ ungeeignet.

Die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der mittleren Rohdichte für die einzelnen Festigkeitsklassen der DIN EN 338 [N4] für Nadelholz ist im Diagramm B-8 dargestellt. Die Glg. B-4 gibt den funktionalen Zusammenhang an.

$$f_{m,k}(\rho_{mean}) = 7,4253 \cdot 10^{-7} \cdot \rho_{mean}^{2,8602} \quad \text{Glg. B-4}$$

Hierin bedeuten:

$$f_{m,k}(\rho_{mean}) = \text{charakteristische Biegefestigkeit [N/mm}^2\text{] in Abhängigkeit der mittleren Rohdichte}$$
$$\rho_{mean} = \text{Mittelwert der Rohdichte [kg/m}^3\text{]}$$



**Diagramm B-8** Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der mittleren Rohdichte für die einzelnen Festigkeitsklassen für Nadelholz der DIN EN 338 [N4]

Für die Kalibrierung der Festigkeitswerte der einzelnen Versuchsreihen wird als Bezugswert die mittlere Rohdichte der Festigkeitsklasse C 24 gewählt. Mit Hilfe der Glg. B-4 und den zugehörigen Mittelwerten der Rohdichten der einzelnen Versuchsreihen, wird nun eine fiktive charakteristische Biegefestigkeit für die einzelnen Versuchsreihen berechnet. Mit den so ermittelten fiktiven charakteristischen Biegefestigkeiten wird nun ein Korrekturfaktor nach folgender Gleichung berechnet:

$$k_{kor} = f_{m,k,C24} / f_{m,k}(\rho_{mean}) \tag{Glg. B-5}$$

Hierin bedeuten:

- $k_{kor}$  = Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen mittleren Rohdichten [-]
- $f_{m,k,C24}$  = charakteristische Biegefestigkeit der Festigkeitsklasse C 24 [N/mm²]
- $f_{m,k}(\rho_{mean})$  = charakteristische Biegefestigkeit [N/mm²] in Abhängigkeit der mittleren Rohdichte siehe Glg. B-4

Für jede Versuchsreihe ergibt sich damit ein anderer Korrekturfaktor (siehe Tabelle B-6).

**Tabelle B-6** Korrekturfaktoren für die Umrechnung der Festigkeiten auf ein einheitliches Rohdichte Niveau für die einzelnen Versuchsreihen der Prüfsrie 1B.B

Versuchsreihe	1B.B vo1	1B.B mo1	1B.B mo3	1B.B mo6	1B.B vo1	1B.B mo1
Korrekturfaktor $k_{kor}$	0,943	1,036	1,008	1,001	0,782	0,918

Jetzt werden die tatsächlich ermittelten Einzelwerte der Biegefestigkeit der einzelnen Versuchsreihen mit ihren zugehörigen Korrekturfaktoren multipliziert (siehe Glg. B-6).

$$f_{m,i}^* = k_{kor} \cdot f_{m,i} \tag{Glg. B-6}$$

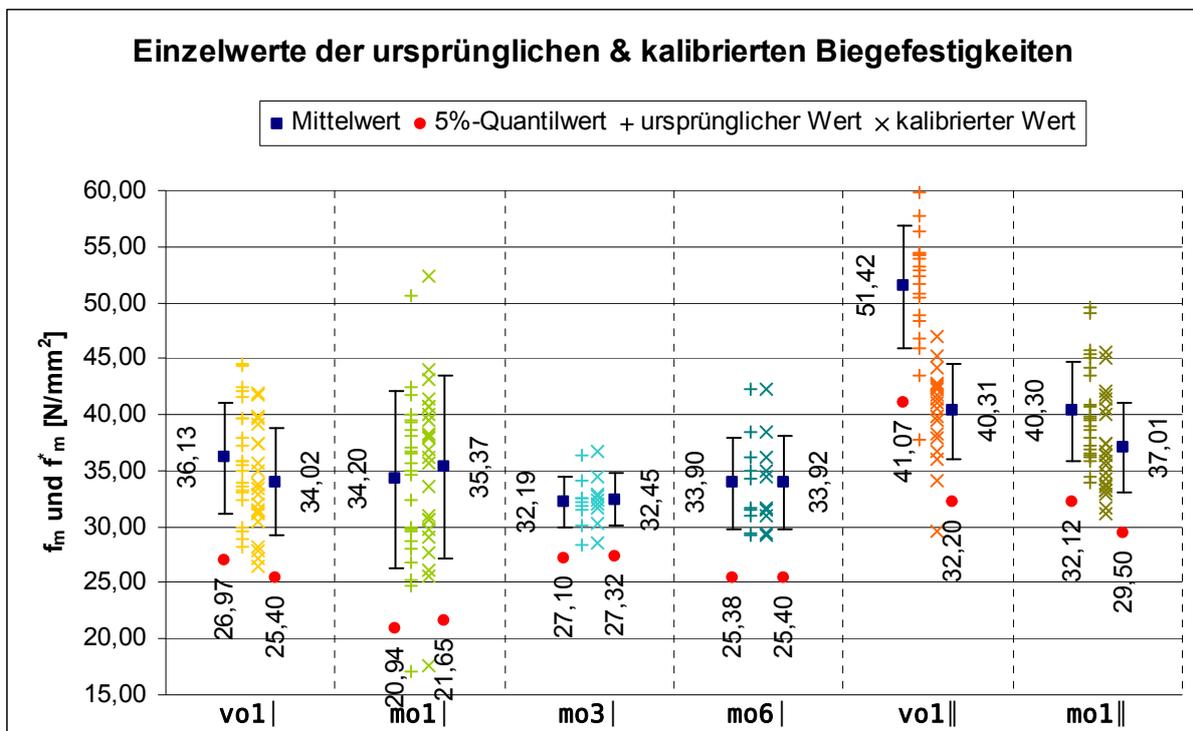
Hierin bedeuten:

- $f_{m,i}^*$  = Auf eine mittlere Rohdichte von  $420 \text{ kg/m}^3$  kalibrierter Einzelwert der versuchstechnisch ermittelten Biegefestigkeit  $[\text{N/mm}^2]$
- $k_{kor}$  = Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlichen mittleren Rohdichten  $[-]$
- $f_{m,i}$  = Tatsächlicher Einzelwert der versuchstechnisch ermittelten Biegefestigkeit  $[\text{N/mm}^2]$

Die statistischen Werte der kalibrierten Biegefestigkeiten sind in der Tabelle B-7 angegeben. Im Diagramm B-9 sind die Einzelwerte der ursprünglichen und kalibrierten Biegefestigkeiten für die einzelnen Versuchsreihen angegeben.

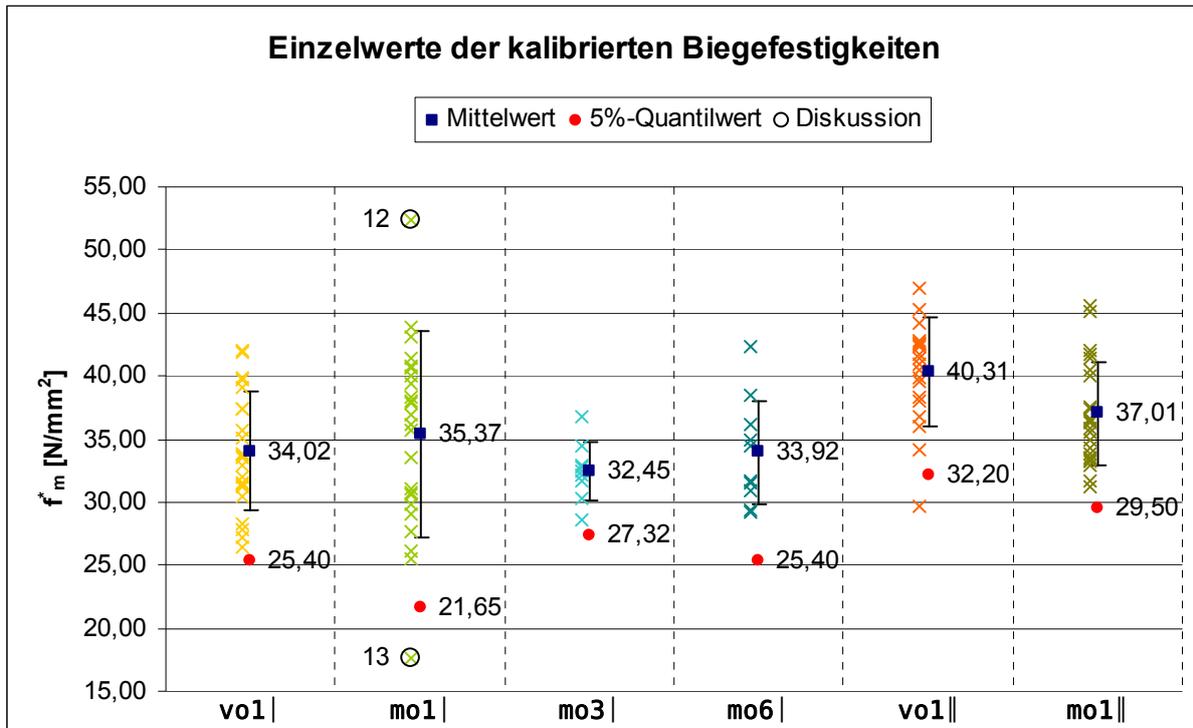
**Tabelle B-7** Statistische Werte der „kalibrierten“ Biegefestigkeiten in  $\text{N/mm}^2$  für die einzelnen Prüfreiheiten der Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)

Statistischer Wert	1B.B vo1	1B.B mo1	1B.B mo3	1B.B mo6	1B.B vo1	1B.B mo1
Anzahl n	22	24	9	10	20	23
Minimum $x_{min}$	26,50	17,62	28,63	29,23	29,62	31,24
Maximum $x_{max}$	42,00	52,37	36,73	42,32	46,92	45,60
Mittelwert $x_m$	34,02	35,37	32,45	33,92	40,31	37,01
Standardabweichung $s_x$	4,72	8,21	2,30	4,11	4,27	4,02
Variationskoeffizient $v_x$	13,9%	23,2%	7,1%	12,1%	10,6%	10,9%
Beiwert Anzahl $k_n$	2,05	2,03	2,40	2,34	2,07	2,04
5%-Quantilwert $x_{05}$	25,40	21,65	27,32	25,40	32,20	29,50



**Diagramm B-9** Einzelwert, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der ursprünglichen und kalibrierten Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen für die Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)

Im nachfolgenden Diagramm sind nur für die kalibrierten Einzelwerte der Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen nochmals aufgeführt.



**Diagramm B-10 Einzelwert, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der kalibrierten Biegefestigkeiten der einzelnen Versuchsreihen für die Prüferserie 1B.B (ohne „Ausreißer“)**

In dem Diagramm B-10 fallen in der Versuchsreihe **mo1|** zwei Werte auf, die extreme Abweichungen zu den übrigen Werten dieser Reihe aufweisen (eingekreiste Werte). Nachfolgend werden diese Werte genauer betrachtet und erläutert, warum sie von den übrigen Werten abweichen und weshalb sie bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt werden.

12 ⊗ : 1B.B-mo1|-12

1. Einzelwert der Feucht-Rohdichte deutlich höher als Mittelwert ( $500 \text{ kg/m}^3 > 417 \text{ kg/m}^3$ )
  2. Zuglamelle war nahezu komplett Astfrei (größte Ästigkeit:  $A^1 < 0,09$ )
  3. Einzelwert des Elastizitätsmoduls höher als Mittelwert ( $12061 \text{ N/mm}^2 > 11374 \text{ N/mm}^2$ )
- Der Wert dieses Prüfkörpers kann daher als Ausreißer „nach oben“ angesehen werden, der den Mittelwert und die Streuung verfälscht, weshalb dieser Wert nachfolgend unberücksichtigt bleibt.

13 ⊗ : 1B.B-mo1|-13

1. Einzelwert der Feucht-Rohdichte deutlich kleiner als Mittelwert ( $339 \text{ kg/m}^3 < 417 \text{ kg/m}^3$ )
  2. Ästigkeit an der Bruchstelle lag über dem maximal zulässigen Wert der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074-1 [N2] bei einer Astansammlung ( $A^1 = 0,533 > 0,5$ )
  3. Einzelwert des Elastizitätsmoduls kleiner als Mittelwert ( $10540 \text{ N/mm}^2 < 11374 \text{ N/mm}^2$ )
- Aufgrund der geringen Rohdichte und der gleichzeitig großen Ästigkeit, ist es nicht nachzuvollziehen, warum dieses Brett in die Sortierklasse MS10 sortiert wurde. Der Wert wird daher als „Ausreißer“ angesehen, der den Mittelwert und die Standardabweichung verfälscht, weshalb dieser Wert nachfolgend unberücksichtigt bleibt.

Die Ergebnisse der Auswertung ohne Berücksichtigung dieser beiden Werte werden im nachfolgenden Abschnitt wiedergegeben. Dieser Abschnitt enthält lediglich die Werte, die für die nachfolgende Untersuchung der verschiedenen Einflussparameter auf die Biegetragfähigkeit von Brettsperrhölzern ohne Keilzinkungen verwendet werden.

<sup>1</sup> A = Ästigkeit nach DIN 4074-1 [N2]

# Anhang C Erweiterte Ergebnisse zu den Bauteilversuchen mit Keilzinkenverbindungen (2B.B)

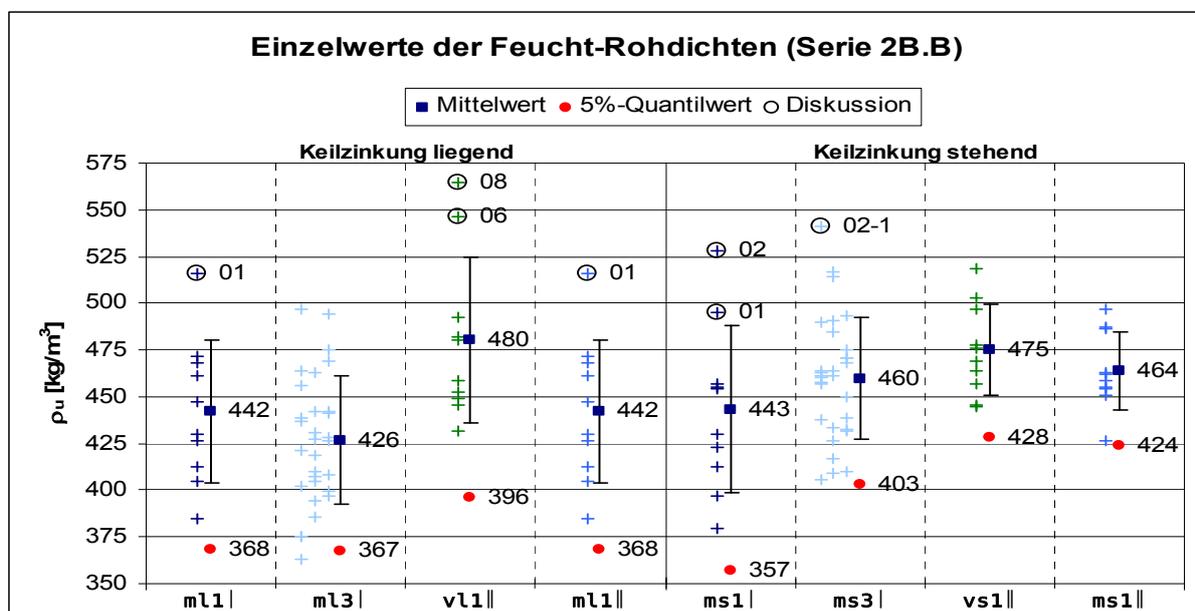
## Anhang C.1 Ergebnisse der Rohdichtebestimmung

Die Einzelwerte der Feucht-Rohdichten (zum Zeitpunkt der Prüfung) mit einer mittleren Holzfeuchte von  $(11\pm 1)\%$  wurden anhand einer Gauß-Normalverteilung statistisch ausgewertet. Die statistischen Werte sind in der Tabelle C-8 angegeben. Im Diagramm C-11 sind die Einzelwerte jeder Versuchsreihe dargestellt. Die Werte der Holzfeuchten und Rohdichten für die einzelnen Prüfkörper für jede Keilzinkenhälfte sind im Anhang E.1 angegeben.

Für die Ermittlung der Rohdichte wurde aus der äußersten Zuglamelle bei jeder Keilzinkung jeweils eine Probe aus dem linken und dem rechten Brett der Keilzinkenverbindung entnommen. Für die Auswertung wurde der kleinere der beiden ermittelten Rohdichtewerte verwendet. Bei den Prüfkörpern mit drei nebeneinander liegenden Lamellen (2B.B-m13|, 2B.B-ms3|) wurde aus allen drei nebeneinander liegenden Längslagen von jedem Brett links und rechts von der Keilzinkung eine Probe entnommen. In die Auswertung ging aus jeder Lamelle der kleinere Wert der Rohdichte aus den beiden Bretthälften ein. Bei den Prüfkörpern 2B.B-m13| und 2B.B-ms3| gibt es somit je Prüfkörper jeweils drei Rohdichtewerte.

**Tabelle C-8 Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in  $\text{kg/m}^3$  für die Prüferserie 2B.B**

Statistischer Wert	liegende Keilzinkung				stehende Keilzinkung			
	2B.B m11	2B.B m13	2B.B v11	2B.B m11	2B.B ms1	2B.B ms3	2B.B vs1	2B.B ms1
Anzahl n	10	30	10	10	10	30	10	10
Minimum $x_{\min}$	385	363	431	385	380	406	444	426
Maximum $x_{\max}$	516	497	564	516	528	541	518	497
Mittelwert $x_M$	442	426	480	442	443	460	475	464
Standardabweichung $s_x$	38,5	34,3	44,0	38,5	44,8	32,7	24,5	20,8
Variationskoeffizient $v_x$	8,7%	8,0%	9,2%	8,7%	10,1%	7,1%	5,2%	4,5%
Beiwert Anzahl $k_n$	1,92	1,73	1,92	1,92	1,92	1,73	1,92	1,92
5%-Quantilwert $x_{05}$	368	367	396	368	357	403	428	424



**Diagramm C-11 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten für die Prüferserie 2B.B**

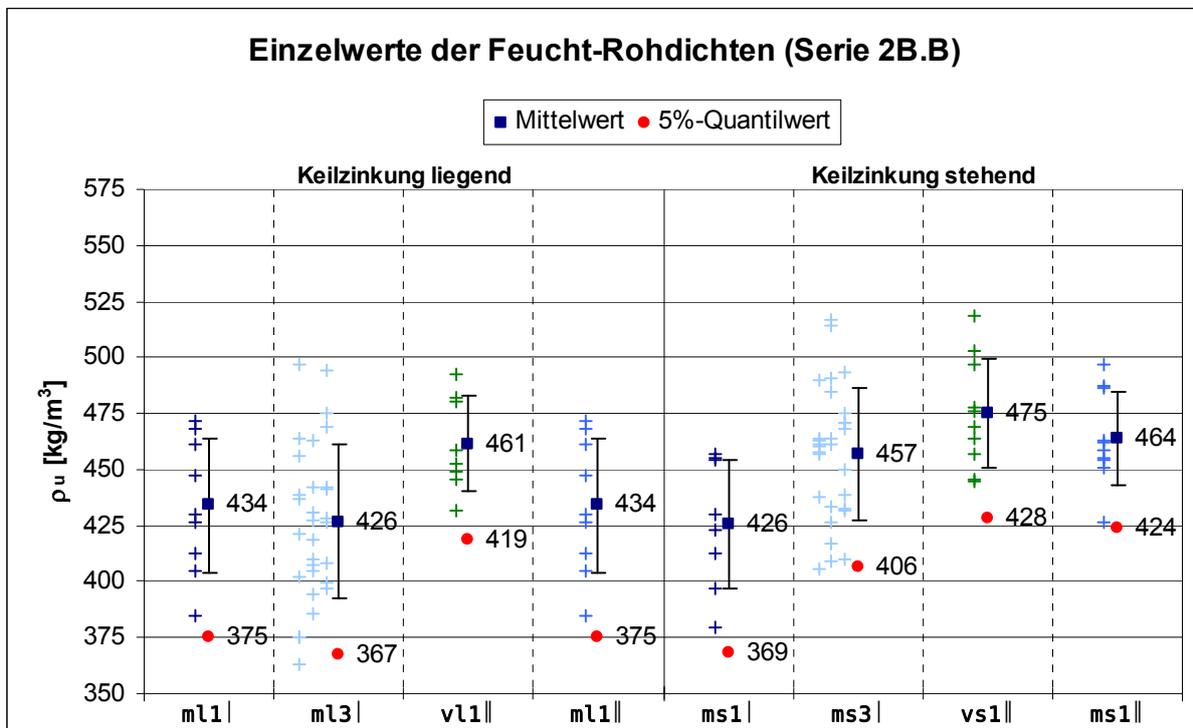
Die Auswertung der Rohdichten für die einzelnen Versuchsreihen lässt folgendes erkennen:

- Mittelwerte unterscheiden sich teilweise erheblich
- 5%-Quantilwerte variieren ebenfalls
- In manchen Versuchsreihen (m11|, v11||, m13|, ms1|, ms3|) sind einzelne „Ausreißer nach oben“ (eingekreiste Werte) festzustellen

Aufgrund der einzelnen Ausreißer „nach oben“ werden der Mittelwert und die Standardabweichung verfälscht. Aus diesem Grund bleiben diese Werte bei der weiteren Auswertung unberücksichtigt. Die Ergebnisse ohne diese Werte sind in der Tabelle C-9 und im Diagramm C-12 angegeben.

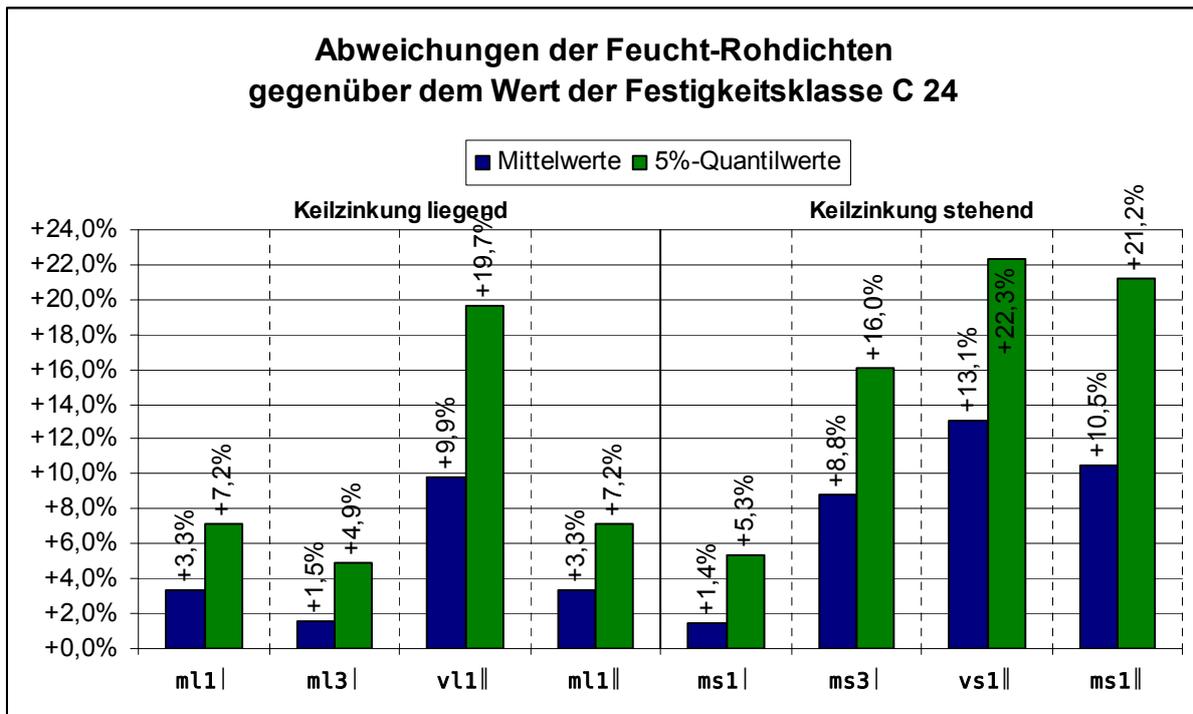
**Tabelle C-9 Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in kg/m<sup>3</sup> der Prüferserie 2B.B (ohne diskutierte Werte)**

Statistischer Wert	liegende Keilzinkung				stehende Keilzinkung			
	2B.B m11	2B.B m13	2B.B v11	2B.B m11	2B.B ms1	2B.B ms3	2B.B vs1	2B.B ms1
Anzahl n	9	30	8	9	8	29	10	10
Minimum $x_{min}$	385	363	431	385	380	406	444	426
Maximum $x_{max}$	471	497	493	471	457	517	518	497
Mittelwert $x_M$	434	426	461	434	426	457	475	464
Standardabweichung $s_x$	30,1	34,3	21,3	30,1	28,7	29,4	24,5	20,8
Variationskoeffizient $v_x$	6,9%	8,0%	4,6%	6,9%	6,7%	6,4%	5,2%	4,5%
Beiwert Anzahl $k_n$	1,96	1,73	2	1,96	2	1,73	1,92	1,92
5%-Quantilwert $x_{05}$	375	367	419	375	369	406	428	424



**Diagramm C-12 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten für die Prüferserie 2B.B (ohne diskutierte Werte)**

Obwohl die diskutierten Werte in dem Diagramm C-12 nicht berücksichtigt wurden, sind sowohl bei den Mittel- als auch bei den 5%-Quantilwerten der einzelnen Versuchsreihen unterschiedliche Größenordnungen erkennbar. Für die einzelnen Reihen sind die Abweichungen der Mittel- und 5%-Quantilwerte von den Sollwerten der Festigkeitsklasse C 24 ( $\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ ) nach DIN EN 338 [N4] im Diagramm C-13 angegeben.



**Diagramm C-13** Abweichungen der Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 2B.B von den Werten der Festigkeitsklasse C 24 nach DIN EN 338 [N4]

Das Diagramm C-13 zeigt deutlich, dass die vorhandenen Rohdichtewerte von den Soll-Werten teilweise erheblich abweichen.

Die Korrelation zwischen Keilzinkenbiegefestigkeit und Rohdichte ist zwar relativ gering (siehe COLLING [11]), dennoch ist ein gewisser Einfluss der Rohdichte auf die Keilzinkenbiegefestigkeit vorhanden, weshalb der Einfluss der Rohdichte berücksichtigt werden sollte.

## Anhang C.2 Ergebnisse der Steifigkeitsbetrachtungen

### Anhang C.2.1 Allgemein

Die Einzelwerte der Elastizitätsmodule unterscheiden sich für die verschiedenen Berechnungsmodelle vereinzelt relativ stark. Die Einzel- und Mittelwerte der einzelnen Prüfreiheiten sind für die vier Berechnungsmodelle im Diagramm F-52 bis Diagramm F-59 im 0 dargestellt.

Um die Unterschiede in den Ergebnissen nach den verschiedenen Berechnungsmodelle besser erkennen zu können, sind die Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen für die verschiedenen Berechnungsmethoden im Diagramm C-14 zusammen dargestellt.

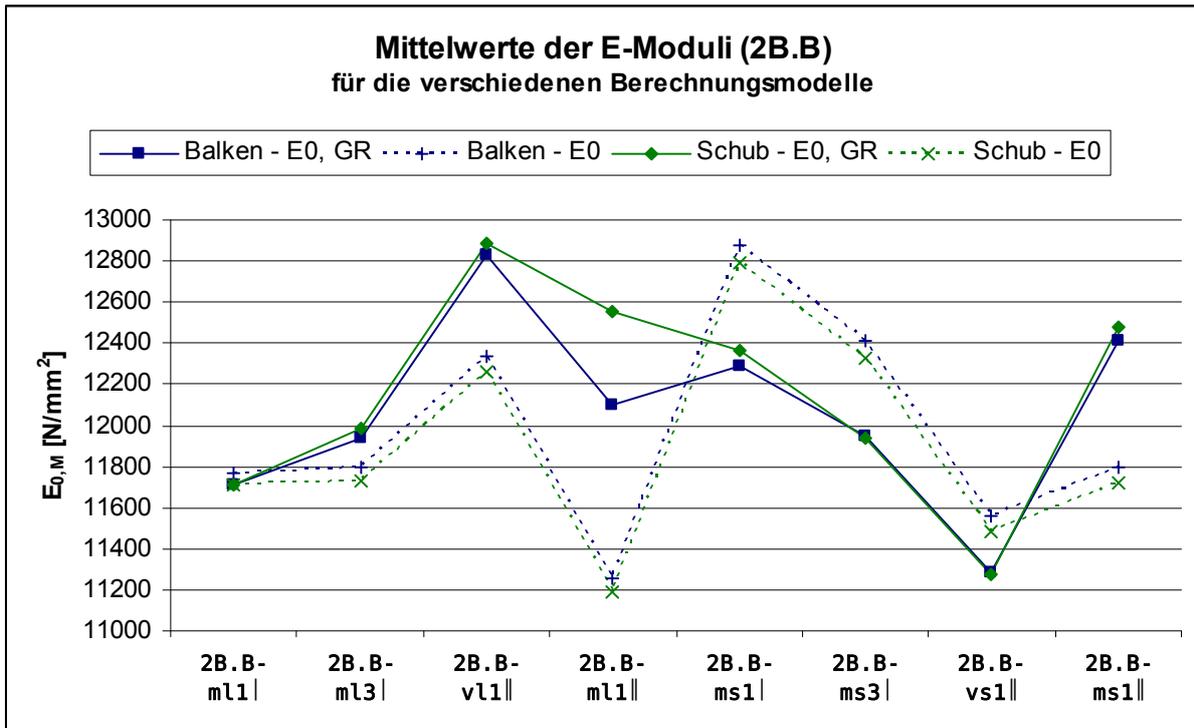


Diagramm C-14 Mittelwerte der E-Module für die verschiedenen Berechnungsmodelle der Prüferserie 2B.B

Anhand des Diagramm C-14 ist deutlich zu erkennen, dass die Art des Optimierungsprozesses („E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ oder „E<sub>0</sub>“) unterschiedliche Mittelwerte liefert, wohingegen das Berechnungsmodell („Balken“ oder „Schub“) annähernd die gleichen Werte ergibt. Da die Ergebnisse für den Optimierungsprozess „E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ geringere Schwankungen aufweisen und die Art des Berechnungsmodells von untergeordneter Bedeutung ist, werden für die weiteren Betrachtungen nur die Ergebnisse des Berechnungsmodells „Balken – E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ verwendet. Diese sind in der Tabelle C-10 angegeben. Im Diagramm C-15 sind die Einzel- und Mittelwerte der Elastizitätsmodule für das Berechnungsmodell „Balken – E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ angegeben.

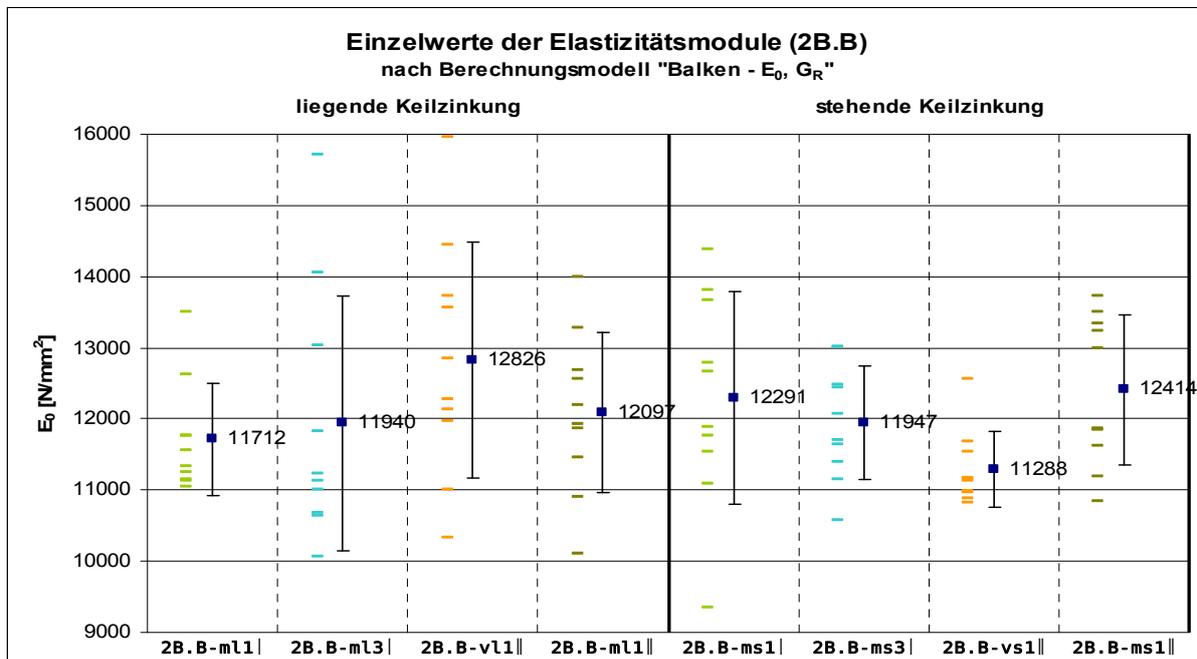


Diagramm C-15 Einzel- und Mittelwerte der Elastizitätsmodule für das Berechnungsmodell „Balken – E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ der Prüferserie 2B.B

**Tabelle C-10 Statistische Werte der Elastizitätsmodule in N/mm<sup>2</sup> der Prüferserie 2B.B**

Statistischer Wert	2B.B ml1	2B.B ml3	2B.B vl1	2B.B ml1	2B.B ms1	2B.B ms3	2B.B vs1	2B.B ms1
Anzahl n	10	10	10	10	10	10	10	10
Minimum $x_{\min}$	11056	10071	10339	10112	9340	10567	10820	10834
Maximum $x_{\max}$	13506	15710	15960	14000	14385	13008	12567	13721
Mittelwert $x_M$	11712	11940	12826	12097	12291	11947	11288	12414
Standardabweichung $s_x$	784	1786	1660	1127	1496	800	527	1055
Variationskoeffizient $v_x$	6,7%	15,0%	12,9%	9,3%	12,2%	6,7%	4,7%	8,5%

## Anhang C.2.2 Einfluss der „Sortierung“

Vergleich der visuellen mit maschineller Sortierung  
(2B.B-vl1 || ÷ 2B.B-ml1 ||, 2B.B-vs1 || ÷ 2B.B-ms1 ||)

Beim Vergleich der Elastizitätsmodule für die visuell und maschinell sortierten Bretter lässt sich kein eindeutiger Unterschied feststellen. Folgendes ist jedoch zu erkennen:

- Bei den liegenden Keilzinkungen ist der Mittelwert des Elastizitätsmoduls der „visuellen“ Prüfkörper höher als der der maschinell sortierten (ca. 6%)
- Bei den stehenden Keilzinkungen ist der Mittelwert des Elastizitätsmoduls der „maschinellen“ Prüfkörper höher als der der visuell sortierten (ca. 10%)
- Die Elastizitätsmodule der Reihen vl1 ||, ml1 ||, ms1 || liegen mit teilweise über 10% über dem Biege-E-Modul von 11000 N/mm<sup>2</sup> der Festigkeitsklasse C 24 nach DIN EN 338 [N4].  
2B.B-vl1 ||: ca. 16%, 2B.B-ml1 ||: ca. 10%, 2B.B-ms1 ||: ca. 13%
- Die Abweichung des Elastizitätsmodul der Reihe vs1 || vom Biege-E-Modul der Festigkeitsklasse C 24 beträgt lediglich nur 2,6%

## Anhang C.2.3 Einfluss des „Querschnitts“

Vergleicht die Mittelwerte der Elastizitätsmodule für die beiden Querschnitt QS 129 und QS 125 miteinander, so kann folgendes festgestellt:

- Die Mittelwerte unterscheiden sich für die beiden Querschnitte nicht nennenswert liegende Keilzinkung: ca. +3,3%, stehende Keilzinkung: ca. +1,0%
- Bei den Variationskoeffizienten ist kein eindeutiger Unterschied erkennbar
- Beim Vergleich der Prüfkörper mit liegenden Keilzinkungen ist der Variationskoeffizient der Reihe 2B.B-ml1 || ca. 40% größer wie der der Reihe 2B.B-ml1 |
- Beim Vergleich der Prüfkörper mit stehenden Keilzinkungen ist der Variationskoeffizient der Reihe 2B.B-ms1 || ca. 40% größer wie der der Reihe 2B.B-ms1 |

## Anhang C.2.4 Einfluss der „Breite“

**Vergleich der Bauteilbreiten**

(2B.B-ml3 | ÷ 2B.B-ml1 |, 2B.B-ms3 | ÷ 2B.B-ms1 |)

Der Vergleich der Prüfkörper mit unterschiedlichen Breiten zeigt folgendes:

- Mittelwerte liegen unabhängig von der Bauteilbreite ungefähr in der gleichen Größenordnung
- Bei den Variationskoeffizienten ist kein eindeutiger Unterschied erkennbar
- Beim Vergleich der Prüfkörper mit liegenden Keilzinkungen ist Variationskoeffizient der Reihe ml3 | ca. doppelt so groß wie der der Reihe ml1 |
- Beim Vergleich der Prüfkörper mit stehenden Keilzinkungen ist Variationskoeffizient der Reihe ms1 | ca. doppelt so groß wie der der Reihe ms3 |

## Anhang C.2.5 Einfluss der „Keilzinkung“

Bei der Gegenüberstellung der stehenden mit der liegenden Keilzinkung ist kein nennenswerter Unterschied festzustellen. Die Verhältnisfaktoren für den Vergleich sind in der Tabelle C-11 angegeben.

**Tabelle C-11 Größenunterschied zwischen den mittleren E-Modulen beim Vergleich der verschiedenen Keilzinkungen**

Vergleich			Verhältnisfaktor
von	÷	mit	
ms1	÷	ml1	+4,9%
ms3	÷	ml3	+0%
vs1	÷	vl1	-12,0%
ms1	÷	ml3	+2,6%

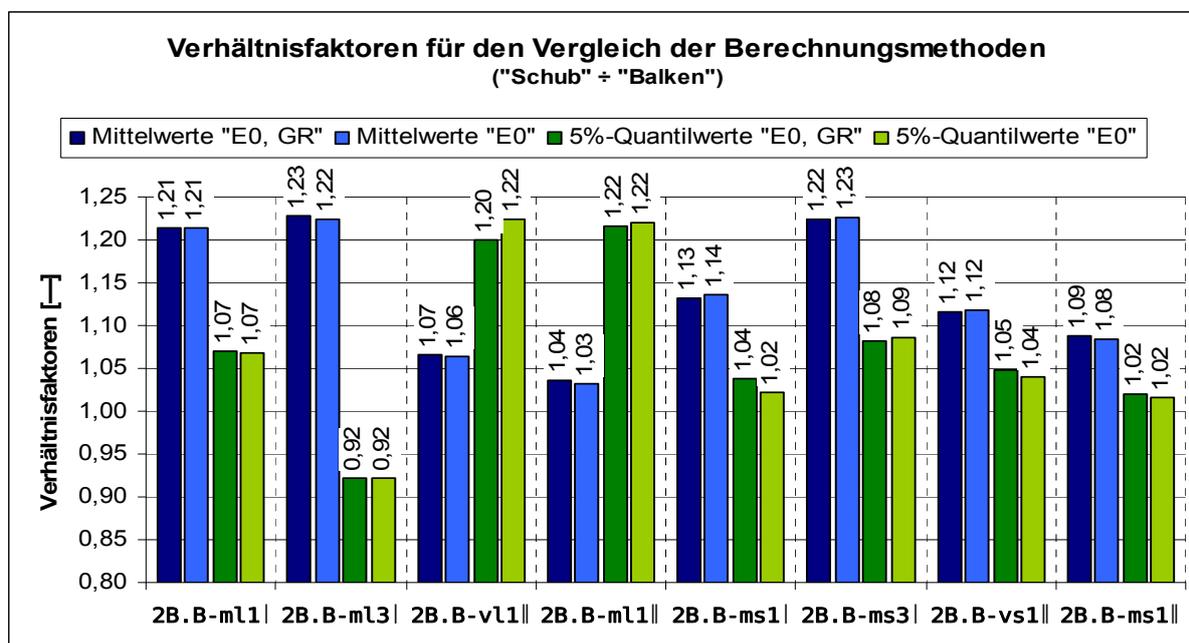
## Anhang C.3 Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen

### Anhang C.3.1 Anmerkungen zu den Ergebnissen nach den verschiedenen Berechnungsmethoden

Für jeden Prüfkörper wurde die Biegefestigkeit nach den vier Berechnungsmethoden des Abschnitts 3.3 ermittelt. Die ermittelten Einzelwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden sind im Diagramm F-60 bis Diagramm F-67 im 0 angegeben. Die maximalen Prüfkraft für die einzelnen Prüfkörper enthält der 0

Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass die beiden Optimierungsprozesse („E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ und „E<sub>0</sub>“) für das jeweilige Berechnungsmodell („Balken“ bzw. „Schub“) keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die Abweichungen liegen unter 0,5%.

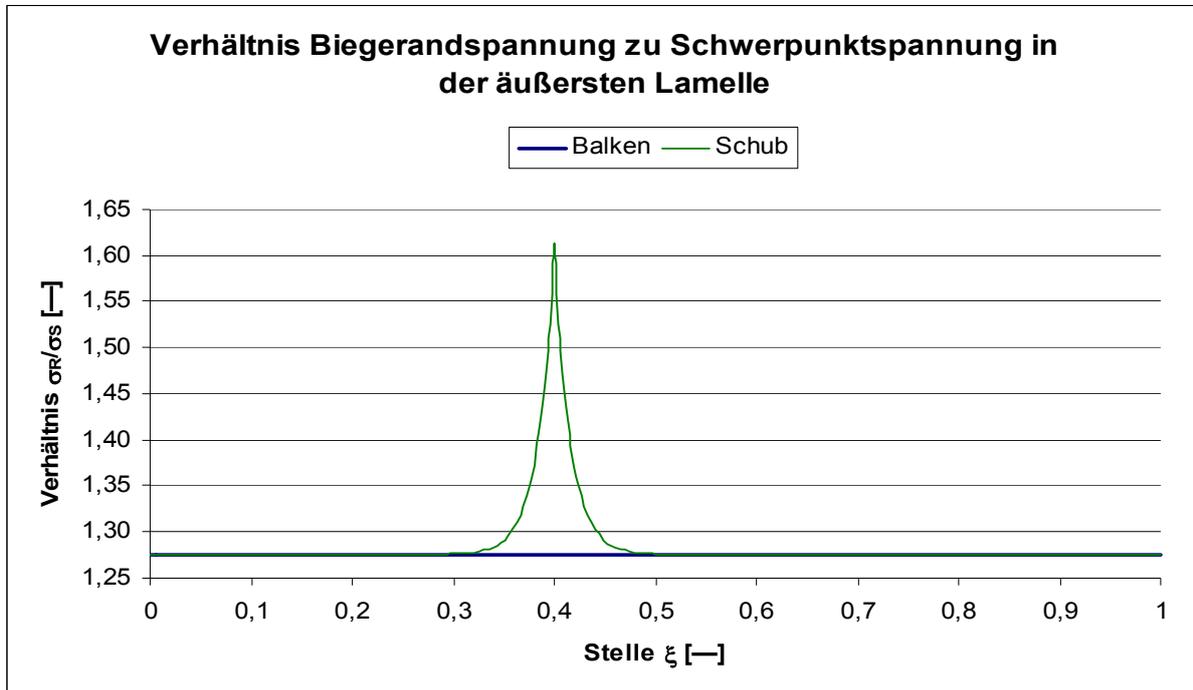
Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Berechnungsmodelle „Schub“ ÷ „Balken“, sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Das Berechnungsmodell „Schub“ liefert Festigkeiten, die um den Faktor 1,02 bis 1,22 höher sind, als die nach dem Modell „Balken“ berechneten Festigkeiten. Die Verhältnisfaktoren für den Vergleich „Schub“ ÷ „Balken“ sind für die Mittelwerte und für die 5%-Quantilwerte im Diagramm C-16 angegeben.



**Diagramm C-16 Verhältnisfaktoren der Mittelwerte für den Vergleich der Berechnungsmethoden („Schub“ ÷ „Balken“) für die Prüferserie 2B.B**

Der Grund für diese großen Unterschiede liegt in dem mechanischen Modell für die Schubanalogie (siehe z. B. SCHOLZ [49]) und kann wie folgt erklärt werden:

Je näher die Bruchstelle bei der Krafteinleitung liegt, desto größer wird der Anteil des Biegemoments aus der Ebene A (Ebene mit Eigenbiegesteifigkeit) bei der Biegespannung, wodurch die Neigung der Spannungslinie gegenüber der Vertikalen zunimmt und somit auch die Biegerandspannung. Das Verhältnis Biegerandspannung zu Schwerpunktspannung in der äußersten Lamelle ist für den Querschnitt QS 125 für beide Berechnungsmodelle beispielhaft in Diagramm C-17 dargestellt.



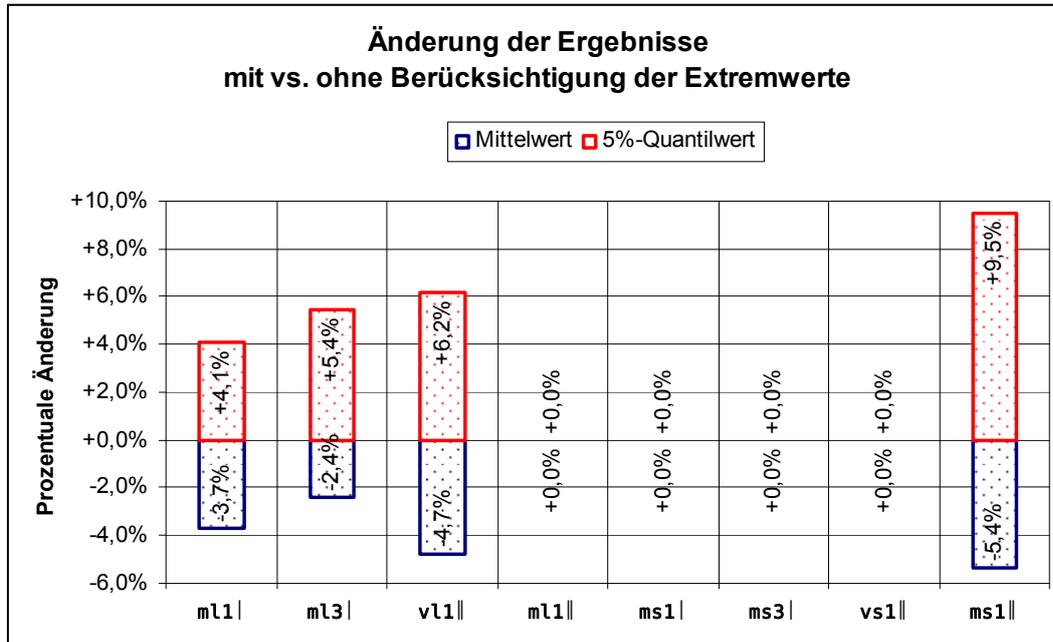
**Diagramm C-17 Exemplarische Darstellung des Verhältnisses Biegerandspannung  $\sigma_R$  zu Schwerpunktspannung  $\sigma_S$  in der äußersten Lage für den Querschnitt QS 125**

Da sich für die beiden Berechnungsmodelle in Abhängigkeit der Stelle  $\xi$  unterschiedliche Verhältnisse von Biegerand- zu Schwerpunktspannung ergeben, resultieren hieraus auch andere Verhältnisse beim Vergleich der Biegerandspannungen für die beiden Berechnungsmethoden. Dies ist für den Querschnitt QS 125 beispielhaft im Diagramm C-18 wiedergegeben.



Werte der Bauteilbiegefestigkeiten unter Berücksichtigung der Maximalwerte. Die Ergebnisse ohne die Maximalwerte sind in der Tabelle C-13 angegeben.

Diagramm C-20 enthält die prozentualen Änderungen der Mittel- und 5%-Quantilwerte, wenn die mit Berücksichtigung der Maximalwerte mit denen ohne Berücksichtigung der Maximalwerte miteinander verglichen werden.



**Diagramm C-20** Prozentuale Änderung der Mittel- und 5%-Quantilwerte, wenn die Maximalwerte nicht berücksichtigt werden im Vergleich zu den Werten, wenn die Maximalwerte berücksichtigt werden für die Prüferie 2B.B

Diagramm C-20 zeigt, dass sich die Mittelwerte bei Vernachlässigung der Maximalwerte um maximal -5,4% verkleinern. Beim Vergleich der 5%-Quantilwerte ist hingegen eine Erhöhung festzustellen, die im Vergleich zu den Mittelwerten stets größer ausfallen. Aufgrund der geringen Anzahl an Prüfkörpern wirken sich einzelne Ausreißer bei den 5%-Quantilwerten gravierender aus, als bei den Mittelwerten. Deshalb werden für die Auswertung ausschließlich die Mittelwerte genauer betrachtet und diskutiert. Die Ergebnisse für den Vergleich der 5%-Quantilwerte werden jedoch der Vollständigkeit mit angegeben.

## Anhang D Erweiterte Ergebnisse zu den Tragfähigkeiten der Keilzinkenverbindungen (3B.B, 3K.B, 3K.Z)

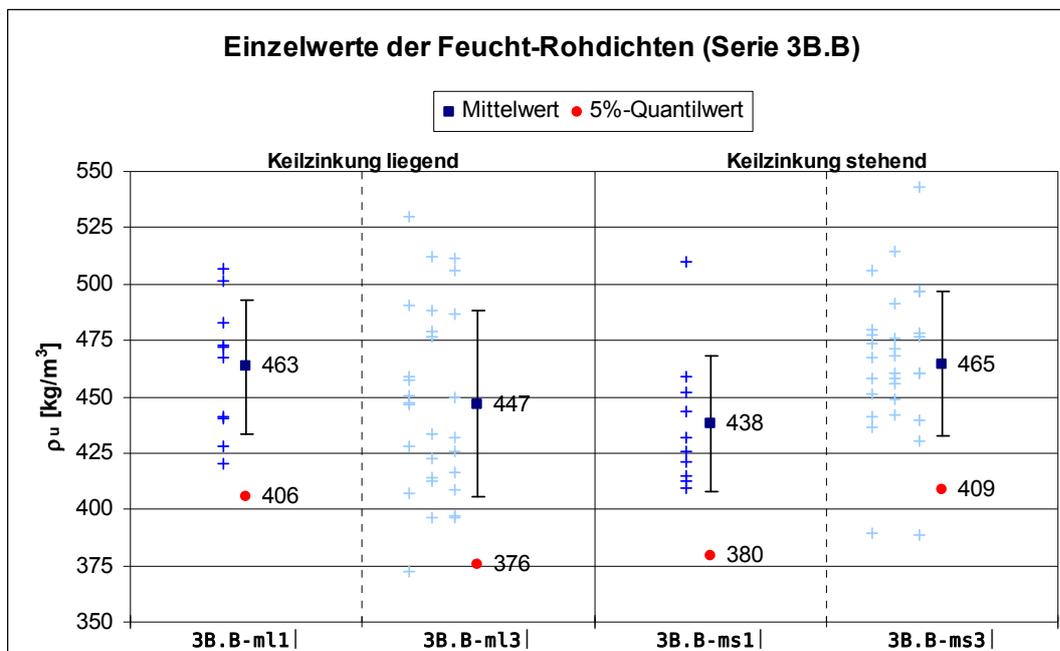
### Anhang D.1 Versuchsreihe 3B.B

#### Anhang D.1.1 Ergebnisse der Rohdichtebestimmung

Die Einzelwerte der Feucht-Rohdichten (zum Zeitpunkt der Prüfung) mit einer mittleren Holzfeuchte von ca. 10% wurden anhand einer Gauß-Normalverteilung statistisch ausgewertet. Die statistischen Werte sind in der Tabelle D-14 angegeben. Im Diagramm D-21 sind die Einzelwerte jeder Versuchsreihe dargestellt, wobei von den beiden Bretthälften der jeweils kleinere Wert der Rohdichte angegeben ist. Die Werte der Holzfeuchten und Rohdichten für die einzelnen Prüfkörper und jeder Keilzinkenhälfte sind im 0 angegeben.

**Tabelle D-14** Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in  $\text{kg/m}^3$  für die Prüferserie 3B.B

Statistischer Wert	3B.B m11	3B.B m13	3B.B ms1	3B.B ms3
Anzahl n	10	29	10	30
Minimum $x_{\min}$	420	372	409	388
Maximum $x_{\max}$	507	530	510	543
Mittelwert $x_M$	463	447	438	465
Standardabweichung $s_x$	29,8	41,2	30,3	32,2
Variationskoeffizient $v_x$	6,4%	9,2%	6,9%	6,9%
Beiwert Anzahl $k_n$	1,92	1,73	1,92	1,73
5%-Quantilwert $x_{05}$	406	376	380	409



**Diagramm D-21** Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 3B.B

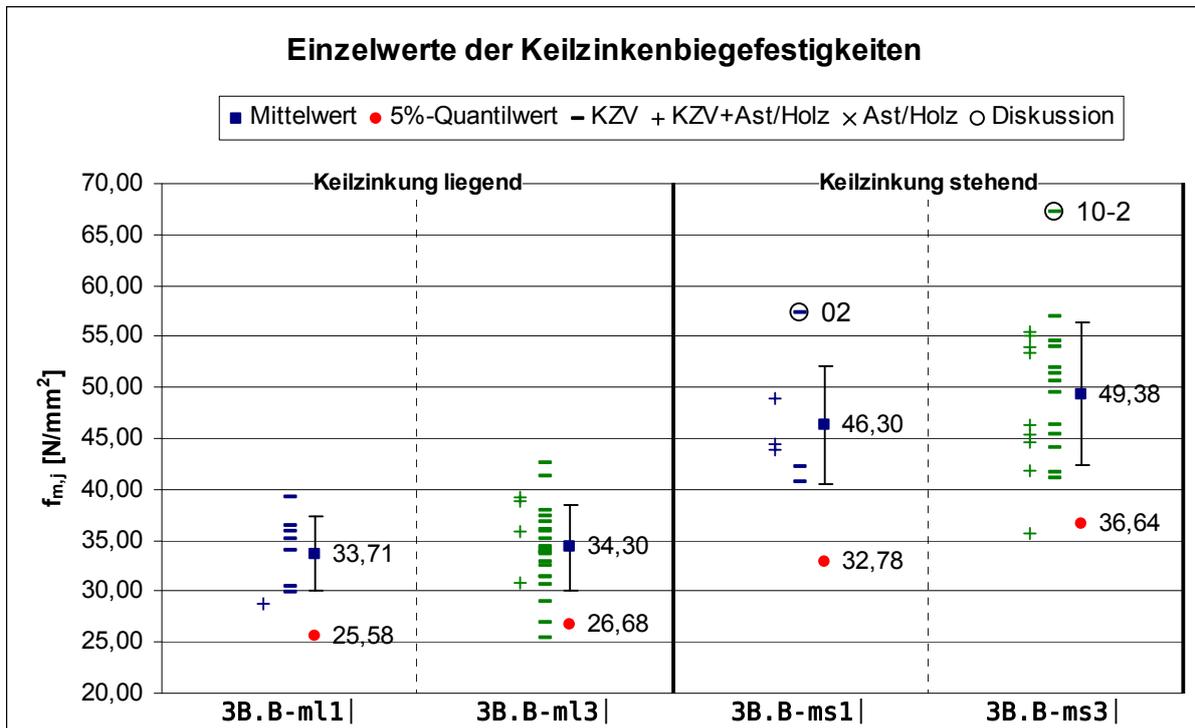
Die Auswertung der Feucht-Rohdichten zeigt, dass die für die Keilzinkenverbindungen verwendeten Bretter ungefähr die gleichen Rohdichten hatten.

### Anhang D.1.2 Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen

In der nachfolgenden Tabelle D-15 und Diagramm D-22 sind die ermittelten Versuchswerte ohne die „Ausreißer“ nach Tabelle 3-23 angegeben. Neben diesen „Ausreißern“ sind auch zwei Versuchswerte dabei, die ebenfalls die Ergebnisse verfälschen. Diese sind im Diagramm D-22 eingekreist und mit ihrer Prüfkörpernummer versehen.

**Tabelle D-15 Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> der Prüferserie 3B.B (ohne „Ausreißer“)**

Statistischer Wert	3B.B m11	3B.B m13	3B.B ms1	3B.B ms3
Anzahl n	8	26	6	22
Minimum $x_{min}$	28,86	25,39	40,74	35,68
Maximum $x_{max}$	39,15	42,56	57,34	67,17
Mittelwert $x_m$	33,71	34,30	46,30	49,38
Standardabweichung $s_x$	3,69	4,18	5,79	6,99
Variationskoeffizient $v_x$	11,0%	12,2%	12,5%	14,2%
Beiwert Anzahl $k_n$	2,471	2,009	2,706	2,049
5%-Quantilwert $x_{05}$	25,58	26,68	32,78	36,64



**Diagramm D-22 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3B.B (ohne „Ausreißer“)**

In den Versuchsreihen **ms1|** und **ms3|** fällt jeweils ein Wert auf, der deutlich über den anderen Werten der jeweiligen Versuchsreihe liegt. Die entsprechenden Werte sind im Diagramm D-22 eingekreist und mit ihrer Prüfkörpernummer versehen. Da durch diese Ausreißer „nach oben“ der Mittelwert und die Streuung verfälscht werden, wurden sie für die Betrachtungen des Abschnitts 4 nicht berücksichtigt. Die Festigkeiten ohne diese beiden Versuchswerte sind im Abschnitt 3.6 zu finden.

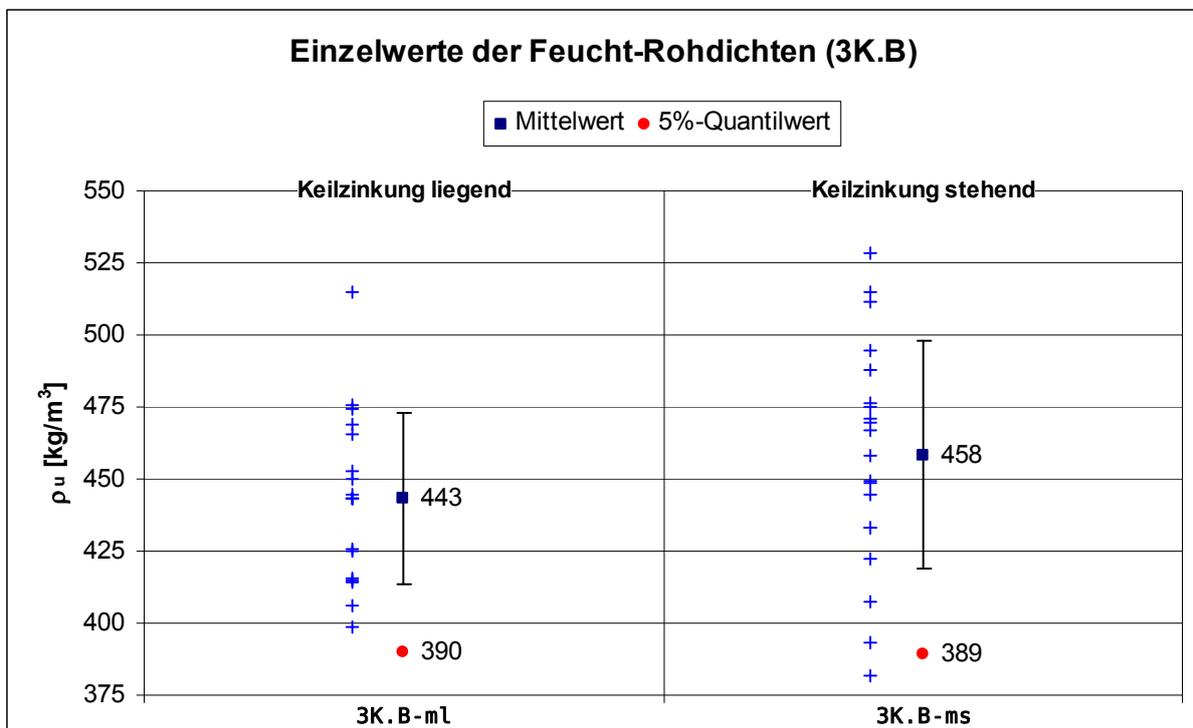
## Anhang D.2 Versuchsreihe 3K.B

### Anhang D.2.1 Ergebnisse der Rohdichtebestimmung

Die Einzelwerte der Feucht-Rohdichten (zum Zeitpunkt der Prüfung) mit einer mittleren Holzfeuchte von ca. 10% wurden anhand einer Gauß-Normalverteilung statistisch ausgewertet. Die statistischen Werte sind in der Tabelle D-16 angegeben. Im Diagramm D-23 sind die Einzelwerte jeder Versuchsreihe dargestellt, wobei von den beiden Bretthälften der jeweils kleinere Wert der Rohdichte angegeben ist. Die Werte der Holzfeuchten und Rohdichten für die einzelnen Prüfkörper und jeder Keilzinkenhälfte sind im Anhang E.4 angegeben.

**Tabelle D-16 Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in  $\text{kg/m}^3$  für die Prüferserie 3K.B**

Statistischer Wert	3K.B mL	3K.B ms
Anzahl n	18	20
Minimum $x_{\min}$	399	382
Maximum $x_{\max}$	515	528
Mittelwert $x_M$	443	458
Standardabweichung $s_x$	29,6	39,5
Variationskoeffizient $v_x$	6,7%	8,6%
Beiwert Anzahl $k_n$	1,79	1,76
5%-Quantilwert $x_{05}$	390	389



**Diagramm D-23 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 3K.B**

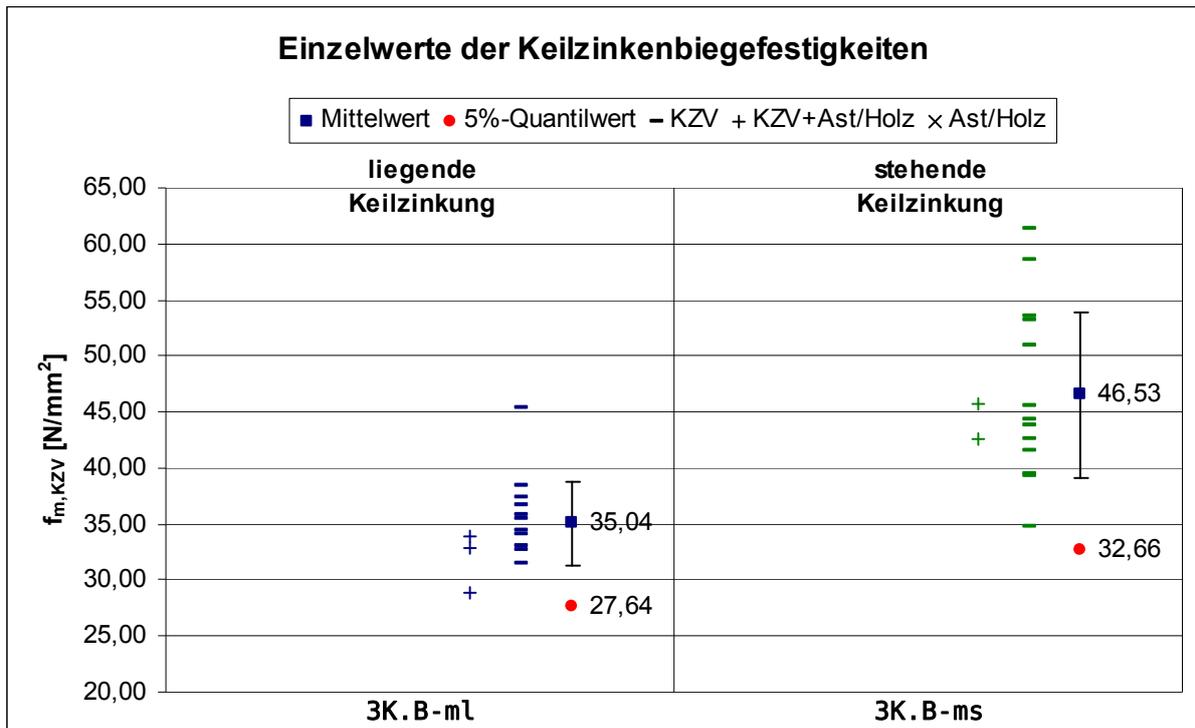
Die Auswertung der Feucht-Rohdichten zeigt, dass die für die Keilzinkenverbindungen verwendeten Bretter annähernd die gleichen Rohdichten hatten.

### Anhang D.2.2 Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen

In der nachfolgenden Tabelle D-17 und Diagramm D-24 sind die ermittelten Versuchswerte ohne die „Ausreißer“ nach Tabelle 3-25 angegeben.

**Tabelle D-17 Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> der Prüferserie 3K.B (ohne „Ausreißer“)**

Statistischer Wert	3K.B m <sub>l</sub>	3K.B m <sub>s</sub>
Anzahl n	14	15
Minimum x <sub>min</sub>	28,92	34,80
Maximum x <sub>max</sub>	45,45	61,39
Mittelwert x <sub>m</sub>	35,04	46,53
Standardabweichung s <sub>x</sub>	3,72	7,39
Variationskoeffizient v <sub>x</sub>	10,6%	15,9%
Beiwert Anzahl k <sub>n</sub>	2,189	2,164
5%-Quantilwert x <sub>05</sub>	27,64	32,66



**Diagramm D-24 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3K.B (ohne „Ausreißer“)**

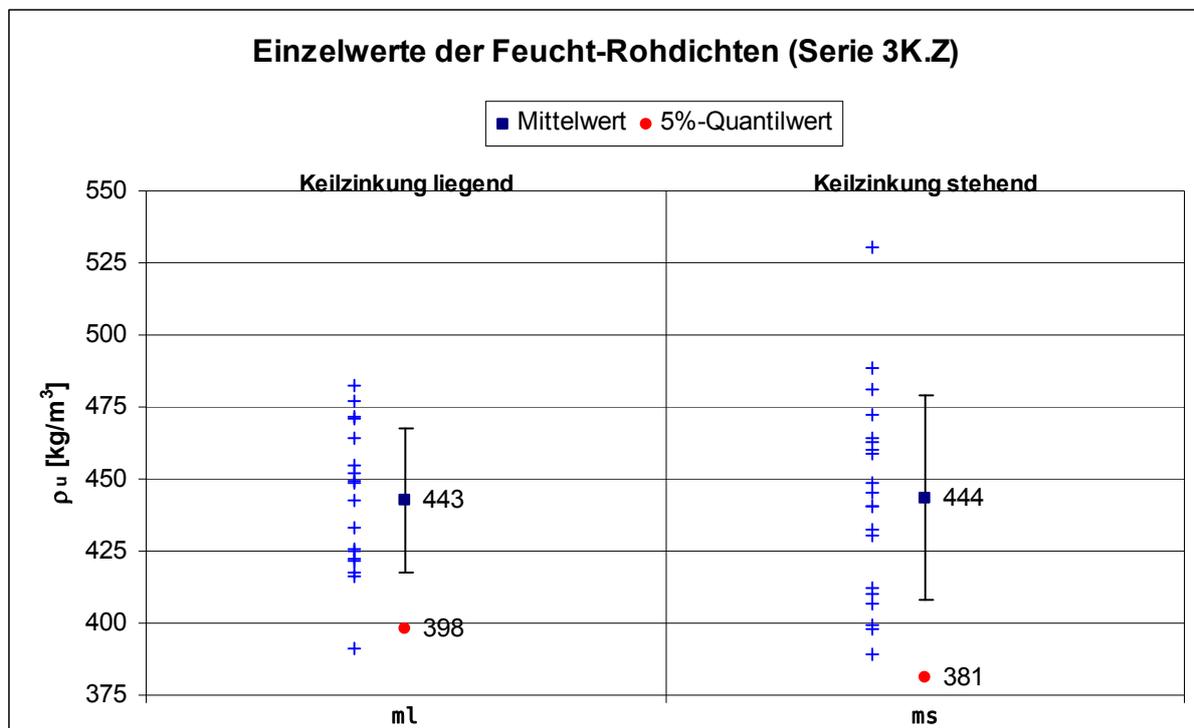
## Anhang D.3 Versuchsreihe 3K.Z

### Anhang D.3.1 Ergebnisse der Rohdichtebestimmung

Die Einzelwerte der Feucht-Rohdichten (zum Zeitpunkt der Prüfung) mit einer mittleren Holzfeuchte von ca. 10% wurden anhand einer Gauß-Normalverteilung statistisch ausgewertet. Die statistischen Werte sind in der Tabelle D-18 angegeben. Im Diagramm D-25 sind die Einzelwerte jeder Versuchsreihe dargestellt, wobei von den beiden Bretthälften der jeweils kleinere Wert der Rohdichte angegeben ist. Die Werte der Holzfeuchten und Rohdichten für die einzelnen Prüfkörper und jeder Keilzinkenhälfte sind im 0 angegeben.

**Tabelle D-18** Statistische Werte der Feucht-Rohdichten in  $\text{kg/m}^3$  für die Prüferserie 3K.Z

Statistischer Wert	3K.Z ml	3K.Z ms
Anzahl n	18	20
Minimum $x_{\min}$	391	389
Maximum $x_{\max}$	482	530
Mittelwert $x_M$	443	444
Standardabweichung $s_x$	25,1	35,4
Variationskoeffizient $v_x$	5,7%	8,0%
Beiwert Anzahl $k_n$	1,79	1,76
5%-Quantilwert $x_{05}$	398	381



**Diagramm D-25** Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Feucht-Rohdichten der Prüferserie 3K.Z

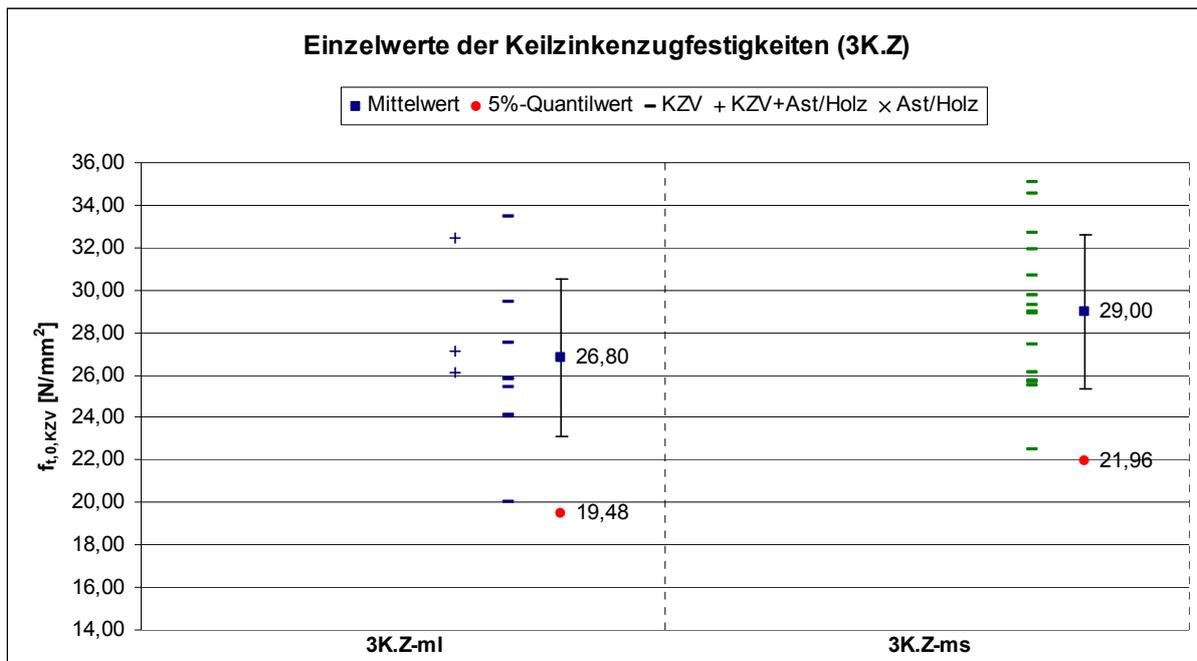
Die Auswertung der Feucht-Rohdichten zeigt, dass die für die Keilzinkenverbindungen verwendeten Bretter ungefähr die gleichen Rohdichten hatten.

### Anhang D.3.2 Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen

In der Tabelle 3-28 bzw. die Werte aus dem Diagramm 3-7 sind die Ergebnisse der Keilzinkenzugfestigkeiten ohne die „Ausreißer“ nach Tabelle 3-27 angegeben.

**Tabelle D-19 Statistische Werte der Keilzinkenzugfestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> für die Prüfsreihe 3K.Z**

Statistischer Wert	3K.Z ml	3K.Z ms
Anzahl n	12	15
Minimum $x_{\min}$	20,02	22,46
Maximum $x_{\max}$	33,45	35,10
Mittelwert $x_M$	26,80	29,00
Standardabweichung $s_x$	3,71	3,63
Variationskoeffizient $v_x$	13,8%	12,5%
Beiwert Anzahl $k_n$	2,251	2,164
5%-Quantilwert $x_{05}$	19,48	21,96



**Diagramm D-26 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenzugfestigkeiten der Prüfsreihe 3K.Z**

## Anhang E Messwerte der einzelnen Versuchsreihen

### Anhang E.1 Holzfeuchten, Rohdichten und Prüfkräfte der Versuchsserie 1B.B

Tabelle E-20 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 1B.B-vo1| und 1B.B-mo1|

PK-Nr.	1B.B-vo1			1B.B-mo1		
	$u$	$\rho_u$	$F$	$u$	$\rho_u$	$F$
1	11,1	504	23962,5	10,6	432	12757,5
2	11,2	373	7897,5	11,4	509	14940,0
3	11,2	433	25717,5	11,4	443	11587,5
4	11,2	433	15120,0	11,1	413	12960,0
5	11,0	385	13297,5	11,1	413	18135,0
6	11,1	419	15435,0	11,2	422	15502,5
7	11,4	407	17032,5	10,9	372	16785,0
8	11,6	393	16942,5	10,9	413	13657,5
9	11,6	522	19035,0	10,9	384	15255,0
10	11,6	417	14400,0	11,4	424	17797,5
11	10,8	361	11790,0	11,3	376	11970,0
12	11,2	413	14287,5	12,0	500	21465,0
13	11,6	463	15165,0	12,3	339	7222,5
14	11,0	460	16177,5	11,4	394	15480,0
15	11,0	447	15390,0	10,8	476	15412,5
16	11,3	499	19980,0	10,6	413	16830,0
17	11,3	406	12892,5	11,3	471	14850,0
18	11,2	439	13882,5	11,3	414	16402,5
19	11,2	373	12150,0	11,4	461	12532,5
20	11,4	440	18090,0	11,5	385	16740,0
21	11,7	433	14940,0	10,8	373	15952,5
22	11,2	372	14287,5	10,9	399	9450,0
23	10,6	467	15975,0	10,9	372	12442,5
24	11,1	484	17730,0	11,1	424	12712,5
25	10,8	437	18697,5	11,5	412	10687,5

**Tabelle E-21 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 1B.B-vo1|| und 1B.B-mo1||**

PK-Nr.	1B.B-vo1					1B.B-mo1				
	Äußere Zuglage		Innere Zuglage		F	Äußere Zuglage		Innere Zuglage		F
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	11,8	456	11,2	397	24817,5	10,8	399	10,4	385	22545,0
2	11,7	430	10,9	515	24502,5	10,6	411	10,7	481	17842,5
3	11,5	459	11,1	495	26032,5	10,8	472	10,5	393	21712,5
4	11,7	476	11,0	465	26347,5	10,6	493	10,5	417	24165,0
5	11,9	474	11,0	399	23445,0	10,9	480	11,0	437	24435,0
6	11,5	481	10,3	377	26347,5	11,3	423	10,3	428	26482,5
7	11,8	504	10,6	435	28035,0	10,7	389	10,0	426	16987,5
8	11,5	463	10,8	495	—	10,9	399	9,7	454	20092,5
9	11,6	461	11,0	491	25852,5	11,0	377	10,7	414	18135,0
10	11,3	478	10,7	431	22432,5	11,2	397	10,6	461	20925,0
11	11,8	472	11,0	478	29250,0	11,1	431	10,8	495	19777,5
12	11,3	459	10,2	433	29025,0	11,5	488	10,8	474	21757,5
13	11,4	488	10,6	366	28102,5	11,7	436	11,0	405	19260,0
14	11,9	455	11,3	454	26640,0	10,8	482	10,5	390	21285,0
15	11,3	436	10,7	520	23670,0	11,5	427	10,3	410	18922,5
16	11,7	459	10,9	489	26550,0	11,4	393	10,3	413	20992,5
17	11,7	436	11,2	497	27540,0	11,1	417	10,9	472	19170,0
18	12,1	373	10,8	530	16312,5	10,8	526	10,5	486	21892,5
19	12,0	465	10,5	446	22432,5	10,2	422	10,6	522	19215,0
20	12,8	533	11,0	424	26505,0	11,0	436	10,4	414	18427,5
21	11,4	425	10,7	564	25267,5	10,8	421	10,4	418	19530,0
22	11,5	441	10,9	460	21127,5	11,1	424	10,8	412	17437,5
23	11,1	437	10,5	473	26145,0	11,0	430	10,9	451	12667,5
24	11,1	428	11,0	442	22905,0	11,1	443	10,8	497	19440,0
25	11,6	459	—	—	24885,0	11,1	401	—	—	18652,5

**Tabelle E-22 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 1B.B-mo3]**

PK-Nr	Lamellenschicht						F
	1		2		3		
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	9,4	395	8,9	455	9,2	405	38655,0
2	9,5	425	8,7	385	9,4	380	46845,0
3	9,2	420	9,0	445	9,5	420	36675,0
4	9,3	450	9,0	480	9,3	445	41827,5
5	9,0	420	8,8	405	8,8	380	43897,5
6	9,3	460	8,5	400	9,0	435	40500,0
7	9,3	470	8,5	430	8,5	380	41625,0
8	9,3	430	8,5	400	9,3	470	41355,0
9	8,7	445	8,5	415	9,2	400	40860,0
10	9,9	410	8,4	400	8,7	375	34627,5

**Tabelle E-23 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 1B.B-mo6]**

PK-Nr.	Lamellenschicht												F
	1		2		3		4		5		6		
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	8,9	400	8,7	465	8,8	375	8,4	420	8,3	385	9,4	490	89460,0
2	9,4	465	9,1	450	8,6	390	8,5	385	8,4	440	8,8	415	108630,0
3	9,0	405	8,8	410	8,5	455	8,6	415	8,8	395	9,6	395	92542,5
4	9,3	445	8,6	360	8,7	460	8,4	415	8,5	455	8,6	370	98572,5
5	9,5	410	8,0	420	8,3	390	8,4	435	8,5	370	9,4	365	75420,0
6	9,0	445	8,9	460	8,7	390	9,0	480	8,4	420	8,9	440	88177,5
7	9,5	480	8,8	380	8,8	465	8,9	380	8,7	380	8,6	350	75015,0
8	9,4	445	8,8	410	8,7	425	8,7	440	8,7	350	9,7	400	80820,0
9	9,1	420	8,9	405	8,8	480	8,7	425	8,7	435	9,0	490	81000,0
10	9,0	395	8,8	415	8,7	505	9,2	515	8,8	440	9,0	410	79087,5

## Anhang E.2 Holzfeuchten, Rohdichten und Prüfkräfte der Versuchsserie 2B.B

**Tabelle E-24 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 2B.B-m11| und 2B.B-ms1|**

PK-Nr.	2B.B-m11					2B.B-ms1				
	links		rechts		F	links		rechts		F
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	11,2	522	10,1	516	11768	9,4	495	9,7	542	8550
2	9,7	538	10,4	468	10283	9,5	549	8,8	528	12848
3	10,7	426	—	—	13973	9,3	454	9,4	456	11565
4	9,3	461	10,3	430	11678	9,6	397	9,4	397	9158
5	9,2	448	9,6	475	9135	9,0	430	9,5	457	12398
6	9,6	385	10,2	429	8460	9,6	420	9,3	413	7425
7	9,4	461	9,9	530	11385	10,9	457	9,6	461	11475
8	10,1	405	9,9	505	10620	8,6	380	9,2	489	13477,5
9	9,6	478	9,3	413	8550	9,0	423	9,8	440	11160
10	9,5	508	9,1	471	9965	9,3	455	9,6	463	11453

**Tabelle E-25 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 2B.B-m13|**

PK-Nr.	Lamellenschicht												F						
	links		1		rechts		links		2		rechts			links		3		rechts	
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$
1	12,3	463			456	10,1	504	9,5	428	11,7	475	9,4	487	27248					
2	9,0	375	10,2	454	10,7	394	10,5	538	9,5	441	10,8	468	31320						
3	9,3	464	—	—	10,2	481	9,6	463	9,6	495	9,3	510	30848						
4	8,4	402	10,8	547	10,0	404	9,2	446	9,0	426	10,0	490	29048						
5	8,9	375	8,8	416	9,6	547	9,6	442	9,2	397	9,6	510	36383						
6	9,3	497	10,5	559	10,4	573	9,4	386	9,3	456	9,5	428	28890						
7	9,0	363	9,6	409	8,8	479	9,5	431	9,4	558	10,6	469	28238						
8			9,2	439	9,3	419	9,7	434	8,9	400	8,7	481	27338						
9	7,4	476	9,0	437	8,4	462	10,5	410	8,4	442	9,5	504	30555						
10	9,5	421	8,9	421	9,4	420	9,3	407	10,6	408	9,5	415	29903						

**Tabelle E-26 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 2B.B-ms3]**

PK-Nr.	Lamellenschicht												F
	1				2				3				
	links		rechts		links		rechts		links		rechts		
u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		
1	9,7	490	10,3	512	10,1	517	9,5	532	9,8	497	9,0	493	35280
2	9,4	541	9,2	613	9,7	494	9,1	434	9,2	471	7,8	504	36765
3	10,0	461	9,6	484	9,4	526	9,5	514	9,9	485	9,4	450	35910
4	9,2	463	9,1	477	9,6	488	10,0	461	9,4	446	9,7	439	34223
5	9,7	457	9,7	481	9,5	429	9,0	409	9,2	436	10,0	410	30712,5
6	9,1	438	8,7	447	9,3	505	9,3	490	9,8	468	9,7	506	28710
7	9,5	507	10,0	458	9,7	463	9,3	426	9,2	476	10,0	470	32355
8	9,8	520	10,3	460	9,0	583	9,2	485	10,1	487	9,7	475	22455
9	9,9	521	10,2	406	9,3	423	9,5	417	9,9	432	10,0	494	31027,5
10	9,5	515	8,7	464	9,6	464	9,7	468	9,4	493	9,2	432	32220

**Tabelle E-27 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 2B.B-v11|| und 2B.B-vs1||**

PK-Nr.	2B.B-v11					2B.B-vs1				
	links		rechts		F	links		rechts		F
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	12,3	538	15,2	445	12735	10,0	469	—	—	20813
2	11,9	480	10,6	569	13343	10,2	502	10,2	497	9900
3	11,4	493	12,4	515	16268	9,5	444	9,8	453	14558
4	12,1	502	14,4	449	8910	9,9	470	9,9	464	9315
5	11,4	431	10,7	512	9923	9,9	457	9,2	503	9608
6	13,1	547	—	—	13545	9,7	445	10,1	476	11970
7	11,2	453	11,7	528	9473	10,2	503	10,4	503	13928
8	12,0	564	—	—	13230	9,6	566	9,8	518	14513
9	11,3	—	—	—	12938	10,3	476	10,0	505	15975
10	12,0	11,8	11,8	482	12938	—	—	9,6	477	8415

**Tabelle E-28 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 2B.B-m11|| und 2B.B-ms1||**

PK-Nr.	2B.B-m11					2B.B-ms1				
	links		rechts		F	links		rechts		F
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	11,2	516	10,1	516	13230	9,9	478	9,9	462	13298
2	9,7	468	10,4	468	8775	10,2	463	—	—	12713
3	12,6	—	—	—	12555	9,7	454	9,5	484	12713
4	9,3	430	10,3	430	11655	10,0	486	9,5	489	18630
5	12,2	475	9,6	475	9270	10,1	435	9,8	426	12038
6	9,6	429	10,2	429	14513	9,6	497	10,8	547	14130
7	9,4	530	9,9	530	11880	10,1	487	9,7	497	17303
8	10,1	505	9,9	505	14153	9,8	514	9,1	459	14918
9	9,6	413	9,3	413	11273	9,8	502	9,7	451	16380
10	9,5	471	9,1	471	15503	9,4	455	—	—	9585

## Anhang E.3 Holzfeuchten, Rohdichten und Prüfkkräfte der Versuchsserie 3B.B

**Tabelle E-29 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 3B.B-m11| und 3B.B-ms1|**

PK-Nr.	3B.B-m11					3B.B-ms1				
	links		rechts		F	links		rechts		F
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	9,4	472	10,5	517	10298	9,6	510	9,8	557	13025
2	8,9	501	9,1	522	6978	9,8	511	9,3	432	15687
3	9,6	450	9,4	420	9616	9,4	472	9,4	426	11264
4	9,7	520	9,1	482	8298	9,3	413	8,9	446	11805
5	9,4	473	9,7	558	10465	9,4	465	9,6	443	11747
6	9,3	451	9,2	440	6757	9,6	429	9,8	409	10732
7	9,3	428	9,0	460	5712	9,8	452	9,4	461	12621
8	9,3	441	9,2	445	5581	9,5	468	9,5	459	9196
9	9,4	507	9,0	551	7188	9,8	450	9,7	415	14427
10	9,5	467	9,4	535	6230	9,8	421	9,6	474	11768

**Tabelle E-30 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 3B.B-m13| und 3B.B-ms3|**

PK-Nr.	Lamellen-schicht	3B.B-m13					3B.B-ms3				
		links		rechts		F	links		rechts		F
		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	1	9,9	491	9,8	543	10106	9,6	506	10,0	509	12196
	2	9,7	414	9,5	443	9067	10,1	458	9,7	461	10956
	3	9,5	487	8,8	611	9741	9,4	497	9,4	511	14382
2	1	11,8	549	9,4	457	10328	9,6	495	9,6	451	13094
	2	9,7	512	9,3	519	8756	9,5	471	9,6	500	15331
	3	9,3	455	9,4	431	9738	9,9	460	9,9	477	11042
3	1	9,4	459	9,3	460	8856	9,2	390	9,6	462	11042
	2	9,7	434	9,6	484	9026	9,5	480	9,6	476	14671
	3	9,2	450	9,5	487	7715	9,2	508	9,4	497	10597
4	1	9,3	428	9,4	431	7715	9,8	500	9,6	477	14446
	2	9,8	412	9,4	424	9754	9,9	456	9,7	474	14445
	3	9,3	415	9,3	397	8958	9,9	481	9,9	388	14682
5	1	9,1	408	9,3	431	8565	9,6	437	9,7	472	13858
	2	8,8	631	9,6	488	11246	9,7	472	9,8	442	14874
	3	9,7	498	9,6	397	10289	9,8	435	9,8	430	12197
6	1	10,1	573	9,5	530	11812	9,6	485	9,5	474	12375
	2	9,6	396	10,0	530	9989	9,4	491	9,6	468	8311
	3	9,7	416	9,3	502	10011	9,8	478	10,0	480	14213
7	1	5,3	372	9,3	423	9392	9,7	503	9,7	467	7602
	2	9,5	477	9,5	478	8498	9,7	449	10,0	532	12541
	3	9,8	511	9,6	604	12239	9,3	506	9,4	439	11435
8	1	9,0	458	9,2	450	10760	9,6	458	10,0	494	10886
	2	9,8	423	9,8	425	10231	9,5	460	9,5	493	12911
	3	9,8	506	9,7	520	11159	9,7	518	10,0	460	11909
9	1	9,4	447	9,3	454	10528	9,7	474	9,8	441	10794
	2	9,4	479	9,3	497	7302	9,3	515	9,2	527	9532
	3	9,4	409	9,6	461	9921	9,6	543	9,6	562	11156
10	1	9,3	455	9,4	446	10896	9,9	480	9,6	523	12976
	2	—	—	—	—	—	9,7	515	9,6	491	17915
	3	9,7	450	9,7	425	8703	9,5	480	9,5	477	14493

## Anhang E.4 Holzfeuchten, Rohdichten und Prüfkräfte der Versuchsserie 3K.B

Tabelle E-31 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 3K.B-m1 und 3K.B-ms

PK-Nr.	3K.B-m1					3K.B-ms1				
	links		rechts		F	links		rechts		F
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	10,1	477	9,9	474	6940	9,7	393	9,6	571	9668
2	9,7	455	9,7	450	11200	9,9	436	9,8	433	6402
3	9,9	476	9,9	477	11389	9,8	475	9,2	522	14388
4	9,6	515	9,7	518	8915	9,8	477	9,7	458	10911
5	9,8	468	9,6	465	10166	9,7	515	9,7	531	10564
6	9,9	444	9,6	447	10276	9,8	475	9,7	471	9884
7	9,6	425	9,5	442	9787	9,9	444	9,8	448	11923
8	9,6	464	9,9	453	10180	10,0	522	9,8	495	15683
9	9,7	494	9,7	443	10038	9,6	532	9,8	488	13662
10	9,8	443	9,8	464	9501	9,7	708	9,5	528	13957
11	9,4	439	9,6	425	9804	9,9	470	9,8	470	11115
12	9,7	479	9,7	469	12599	10,2	477	10,0	505	12199
13	9,6	399	8,8	409	9307	9,9	472	10,7	467	12160
14	9,6	415	9,7	436	11038	9,8	499	9,7	449	9695
15	9,6	416	7,5	458	10375	10,0	435	9,7	422	12113
16	9,5	406	9,6	414	6011	10,3	566	9,7	382	7599
17	9,8	454	9,7	443	5994	9,8	448	9,7	475	11342
18	9,7	440	9,8	414	5544	9,8	448	9,7	433	11398
19	—	—	—	—	—	9,9	437	9,9	407	11137
20	—	—	—	—	—	9,7	511	8,4	599	16364

## Anhang E.5 Holzfeuchten, Rohdichten und Prüfkräfte der Versuchsserie 3K.Z

Tabelle E-32 Holzfeuchten  $u$  in [%], Rohdichten  $\rho_u$  in [kg/m<sup>3</sup>] und Prüfkräfte  $F$  in [N] der Versuchsreihe 3K.Z-m1 und 3K.Z-ms

PK-Nr.	3K.Z-m1					3K.Z-ms				
	links		rechts		F	links		rechts		F
	u	$\rho_u$	u	$\rho_u$		u	$\rho_u$	u	$\rho_u$	
1	10,5	531	10,5	464	106896	10,1	600	10,3	530	119013
2	10,2	433	9,5	516	107839	10,7	449	9,9	564	95873
3	10,2	425	10,0	508	108689	10,3	496	10,1	440	124820
4	10,4	516	10,7	482	100623	10,7	432	10,1	480	121220
5	9,8	633	10,3	449	61635	10,6	535	10,2	489	143570
6	10,3	452	10,1	521	82639	10,1	410	10,2	425	96475
7	11,2	426	9,9	491	96752	9,9	446	9,8	398	118790
8	10,3	465	10,6	442	113340	10,3	473	10,3	496	101856
9	10,3	416	10,2	464	99711	10,0	463	10,1	538	104170
10	11,1	468	10,2	455	101585	10,4	446	10,1	529	119351
11	10,1	477	9,6	491	78118	10,2	431	10,1	463	105144
12	10,5	507	10,1	471	110029	10,6	536	10,1	460	134024
13	10,1	501	10,2	418	121095	10,1	389	10,0	493	92617
14	10,3	422	10,5	518	133021	10,5	481	10,0	641	130599
15	10,3	422	10,0	507	74915	10,4	483	10,1	412	104345
16	9,9	416	10,6	391	83823	10,1	441	10,2	515	107648
17	10,2	449	10,5	524	137565	10,1	399	10,0	513	85714
18	10,1	472	10,2	521	114859	10,3	458	10,4	477	140931
19	—	—	—	—	—	10,5	475	10,3	464	112851
20	—	—	—	—	—	10,3	548	10,1	407	105536

## Anhang F Zusätzliche Tabellen und Diagramme zu den Versuchsserien

### Anhang F.1 Tabellen und Diagramme der Versuchsserie 1B.B

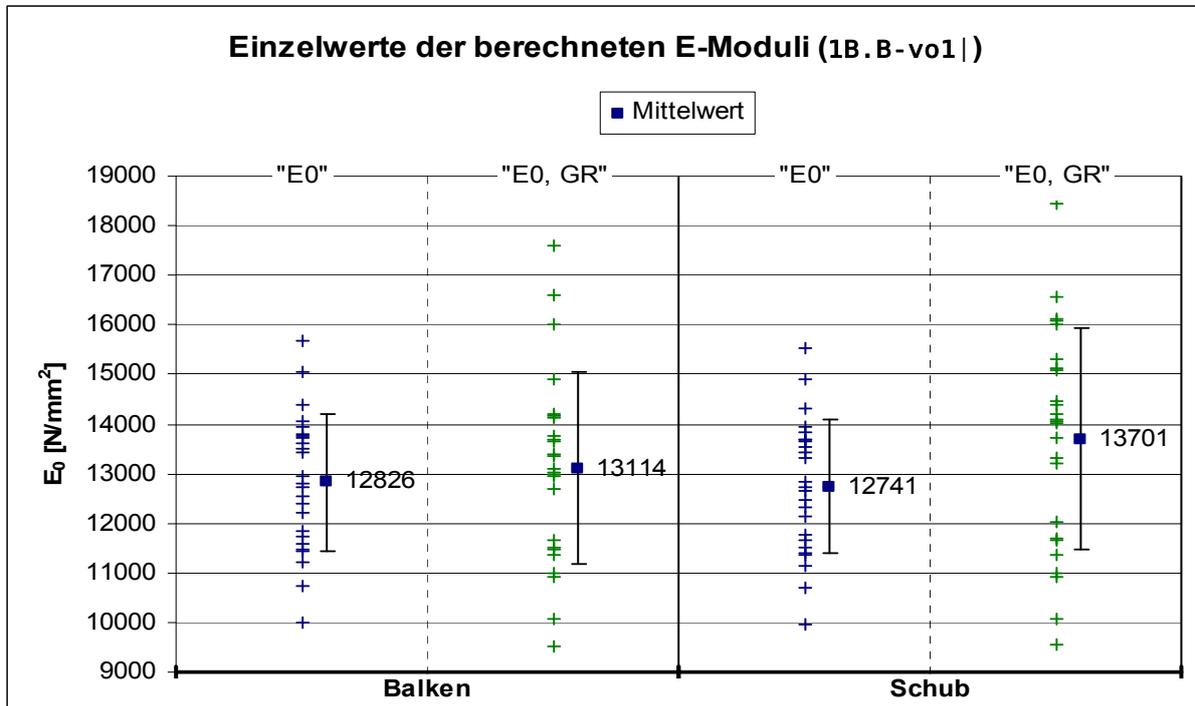


Diagramm F-27 Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-vo1 |

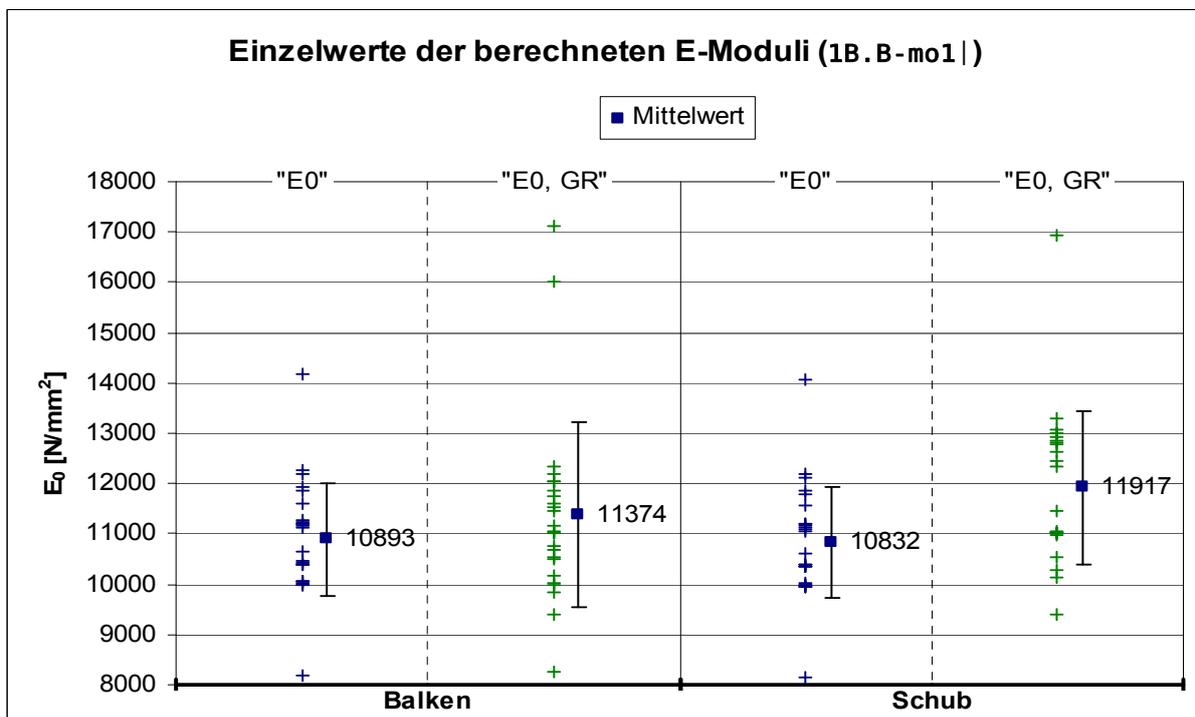


Diagramm F-28 Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo1 |

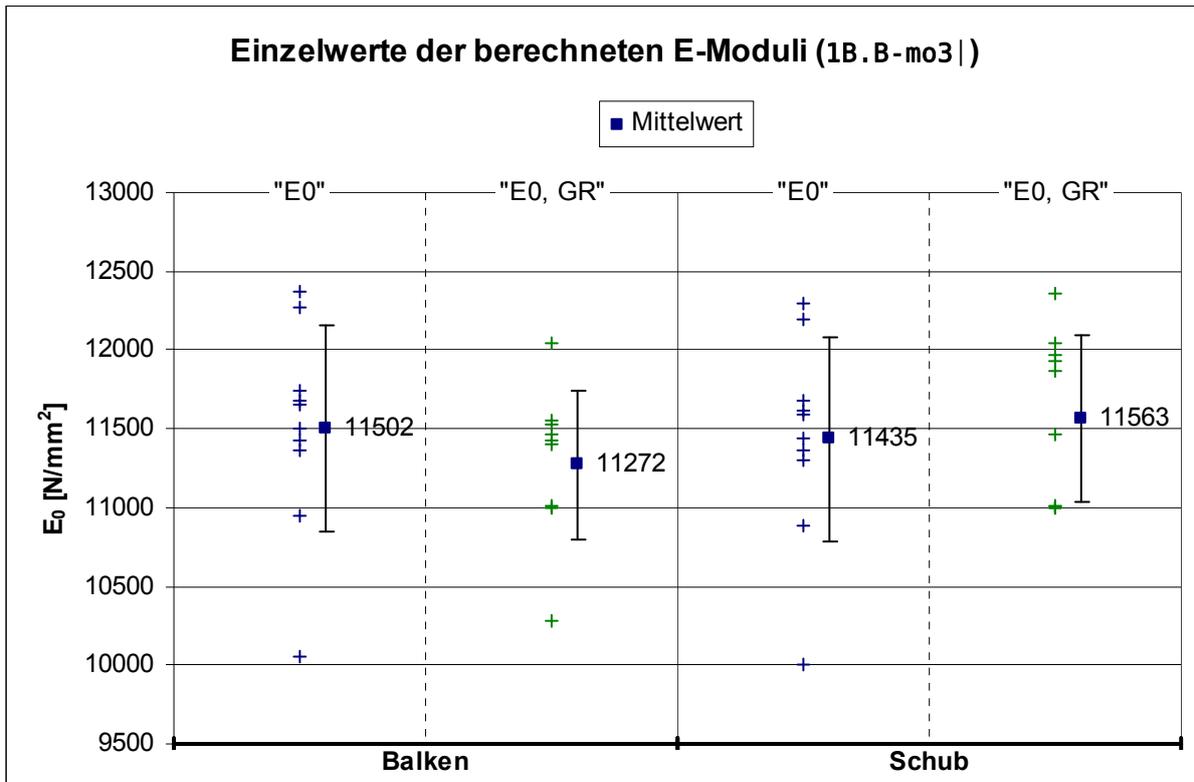


Diagramm F-29 Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo3 |

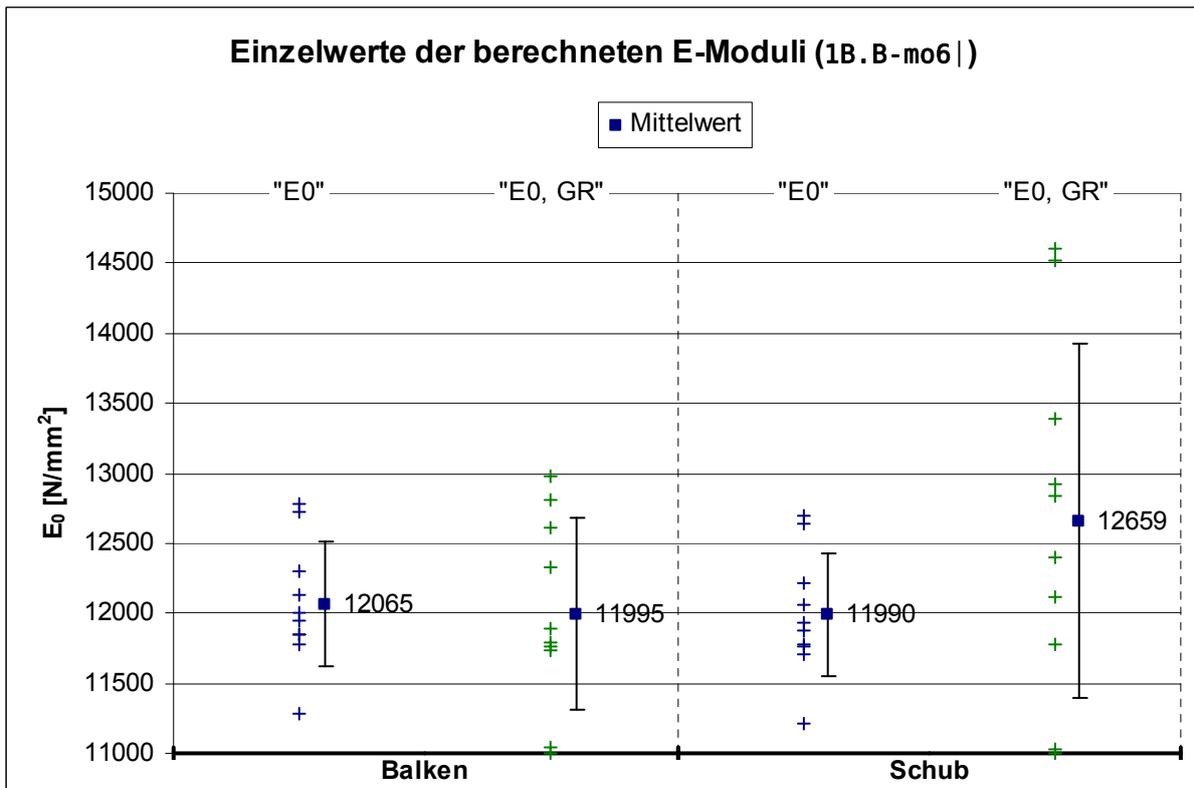


Diagramm F-30 Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo6 |

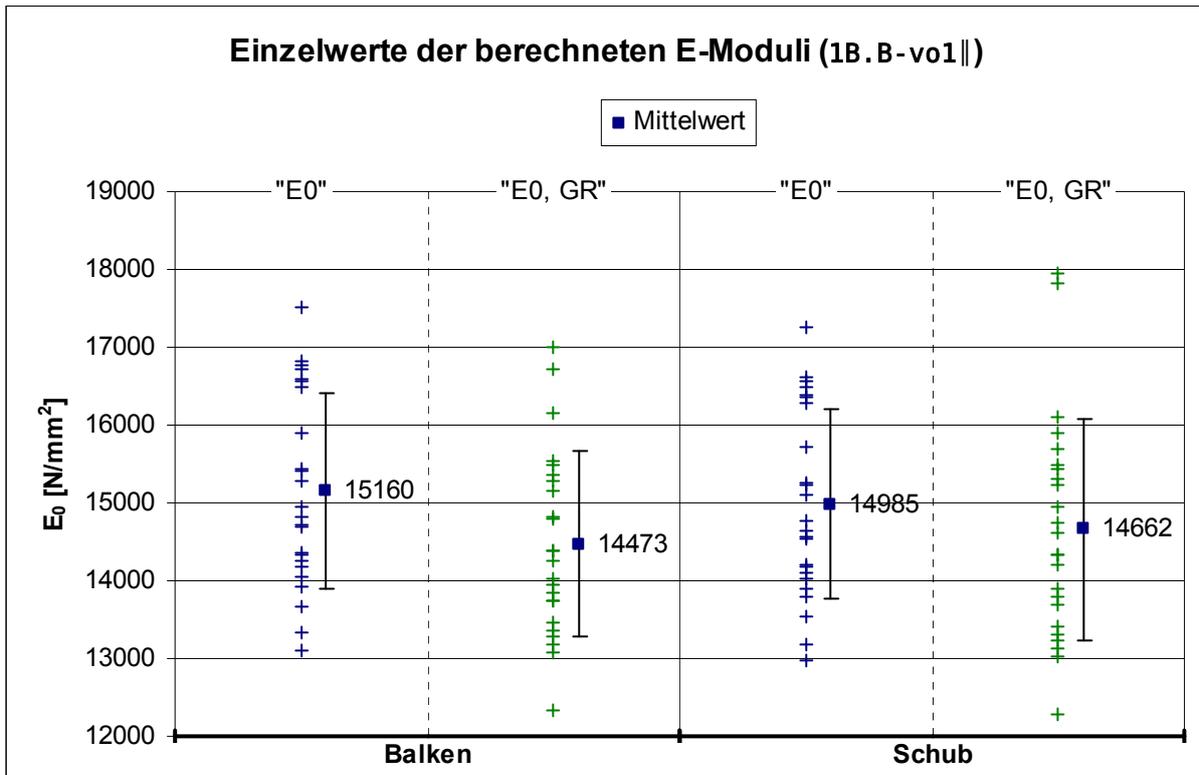


Diagramm F-31 Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-vo1||

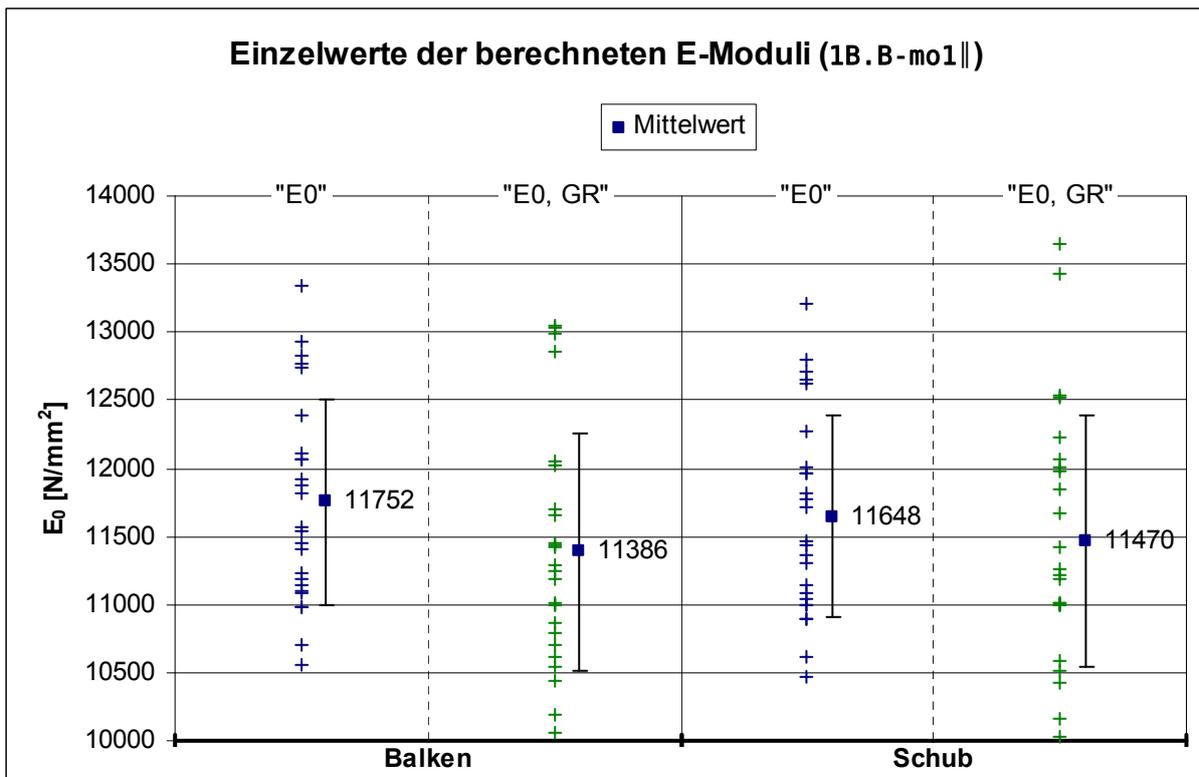


Diagramm F-32 Einzelwerte der berechneten E-Module sowie die zugehörigen Mittelwerte nach den verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo1||

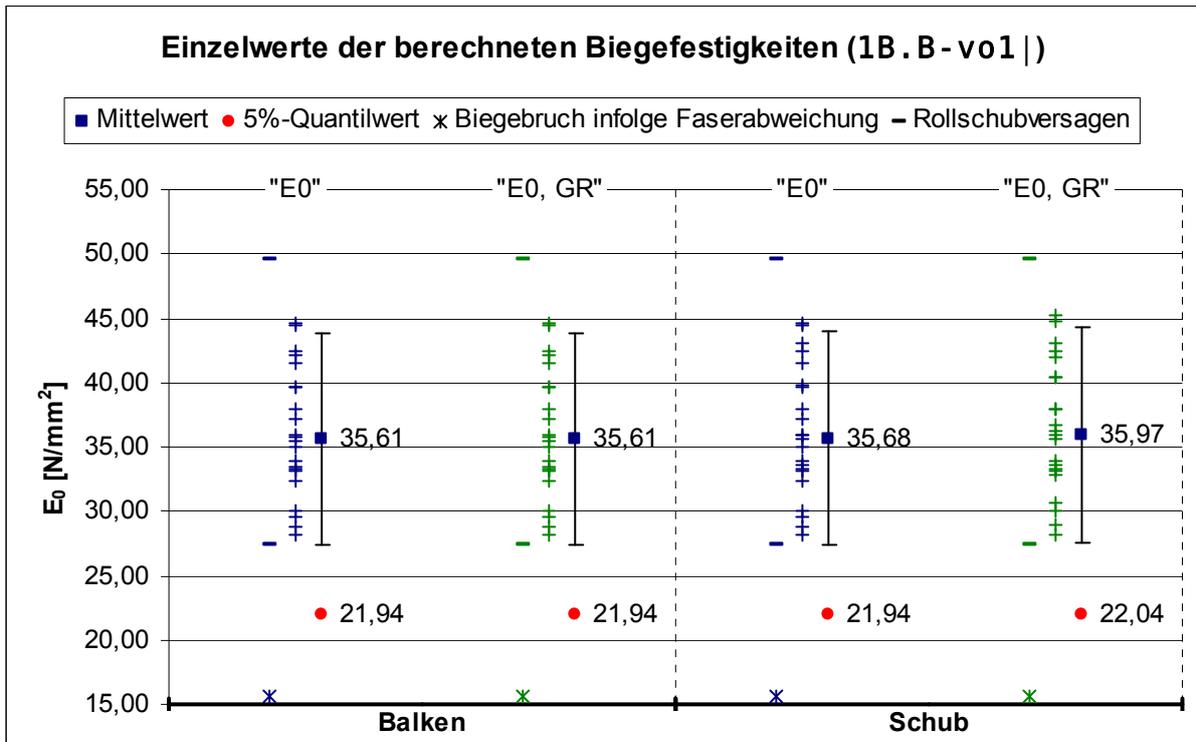


Diagramm F-33 Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-v01 |

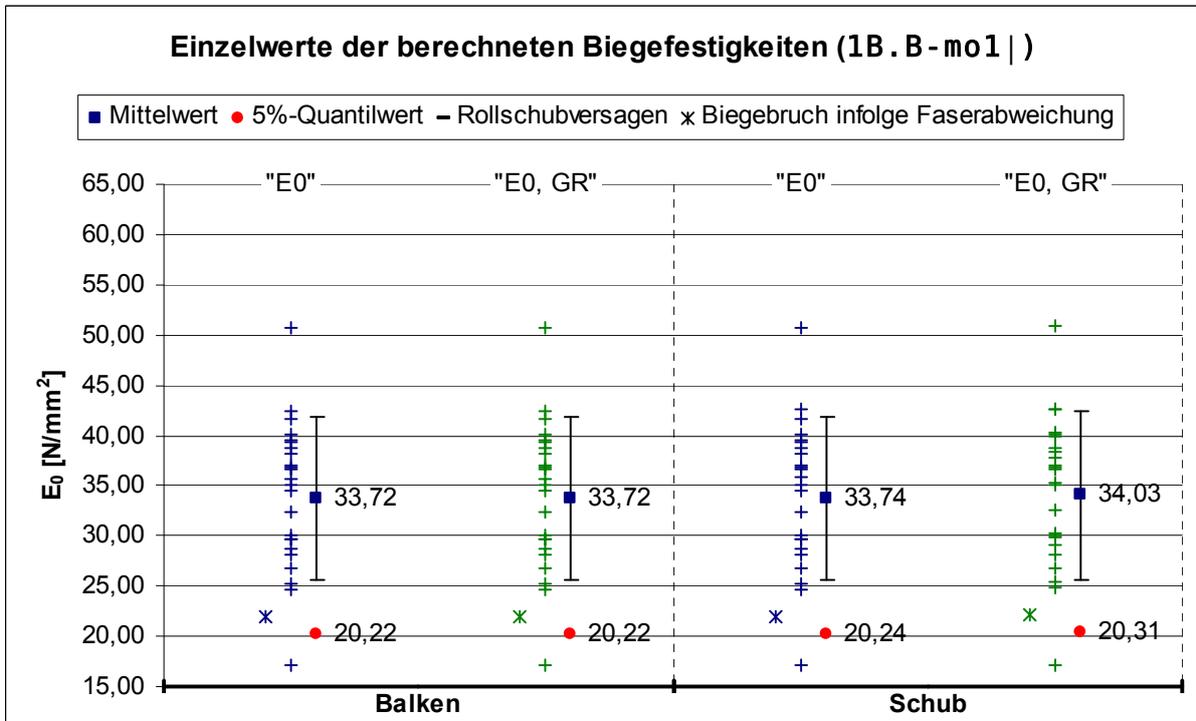


Diagramm F-34 Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-m01 |

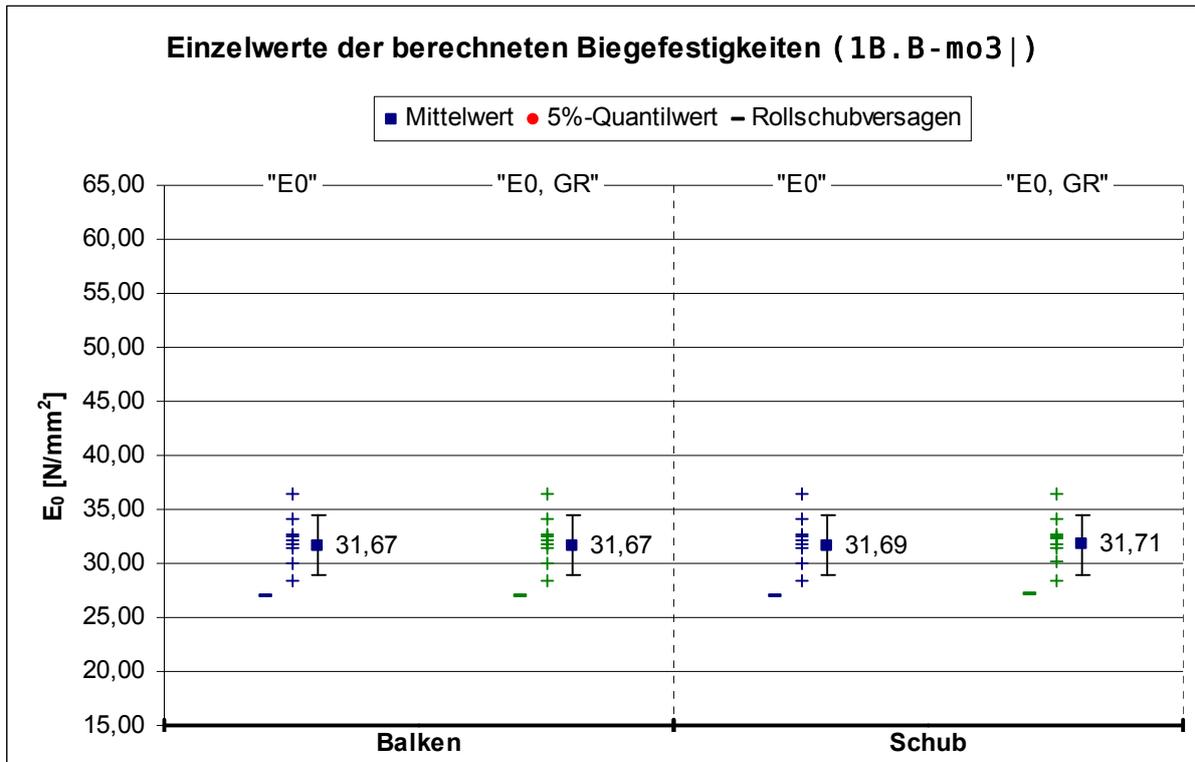


Diagramm F-35 Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo3 |

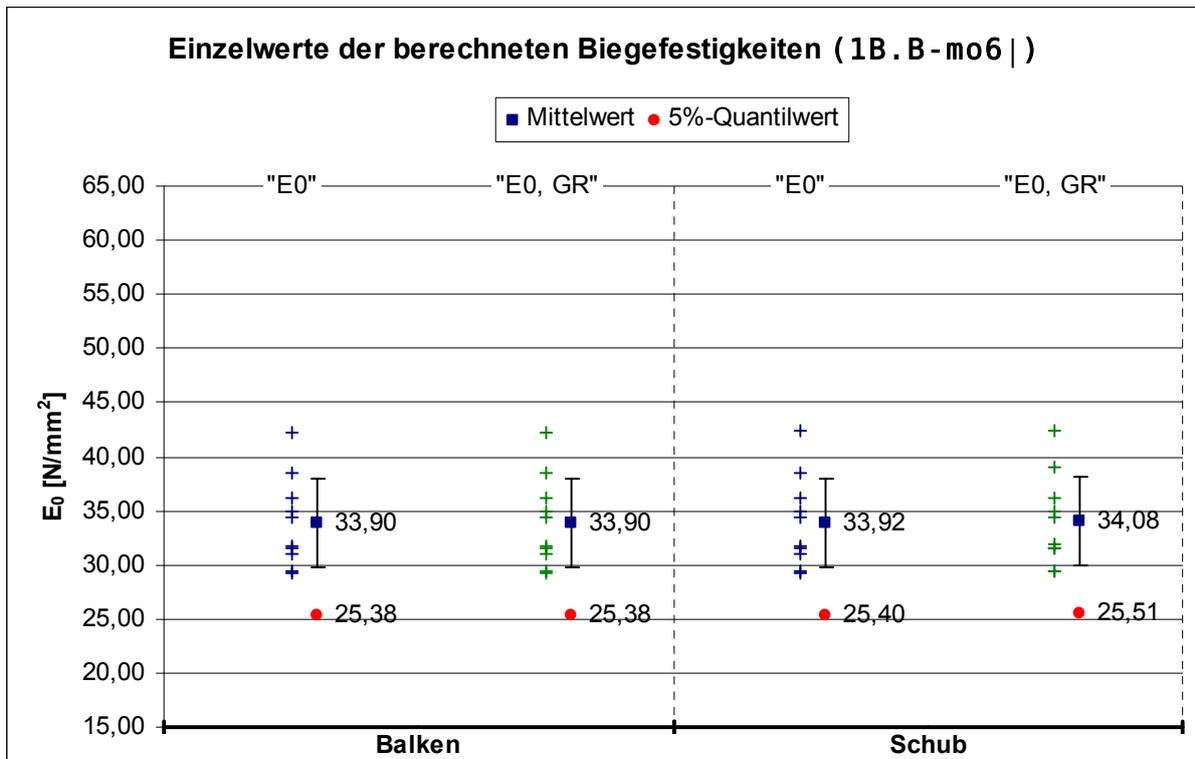


Diagramm F-36 Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo6 |

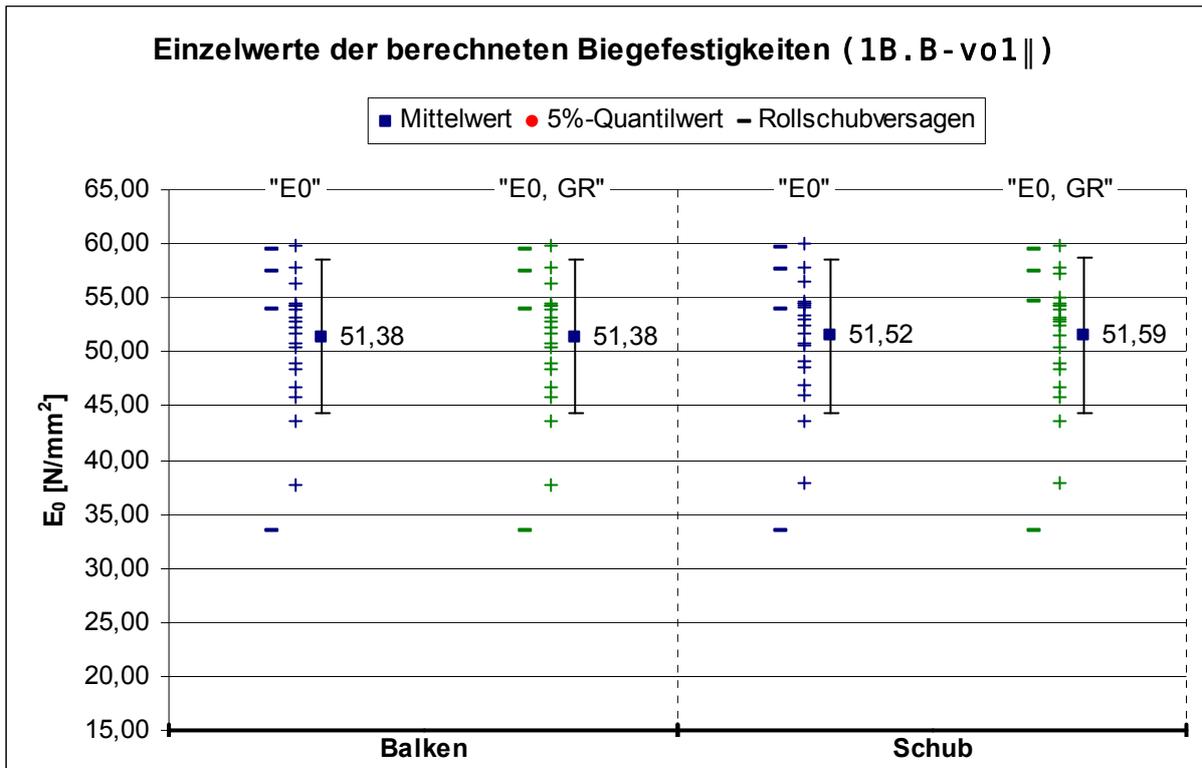


Diagramm F-37 Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-vo1||

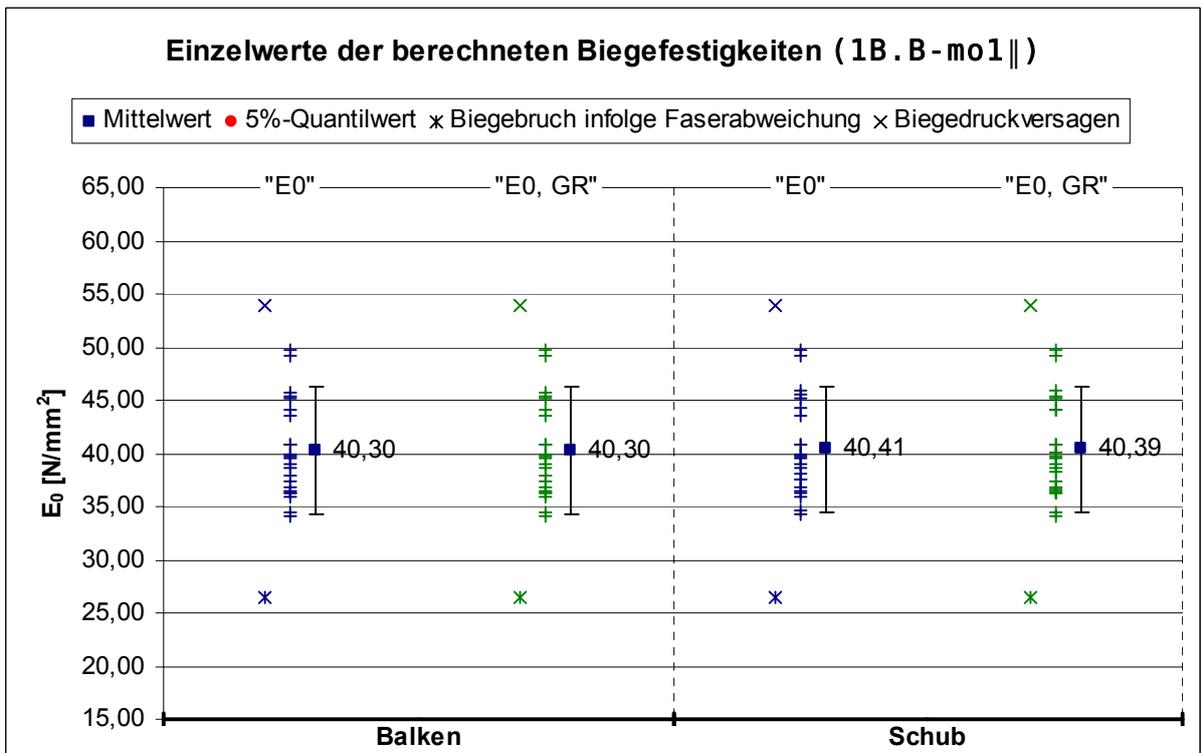
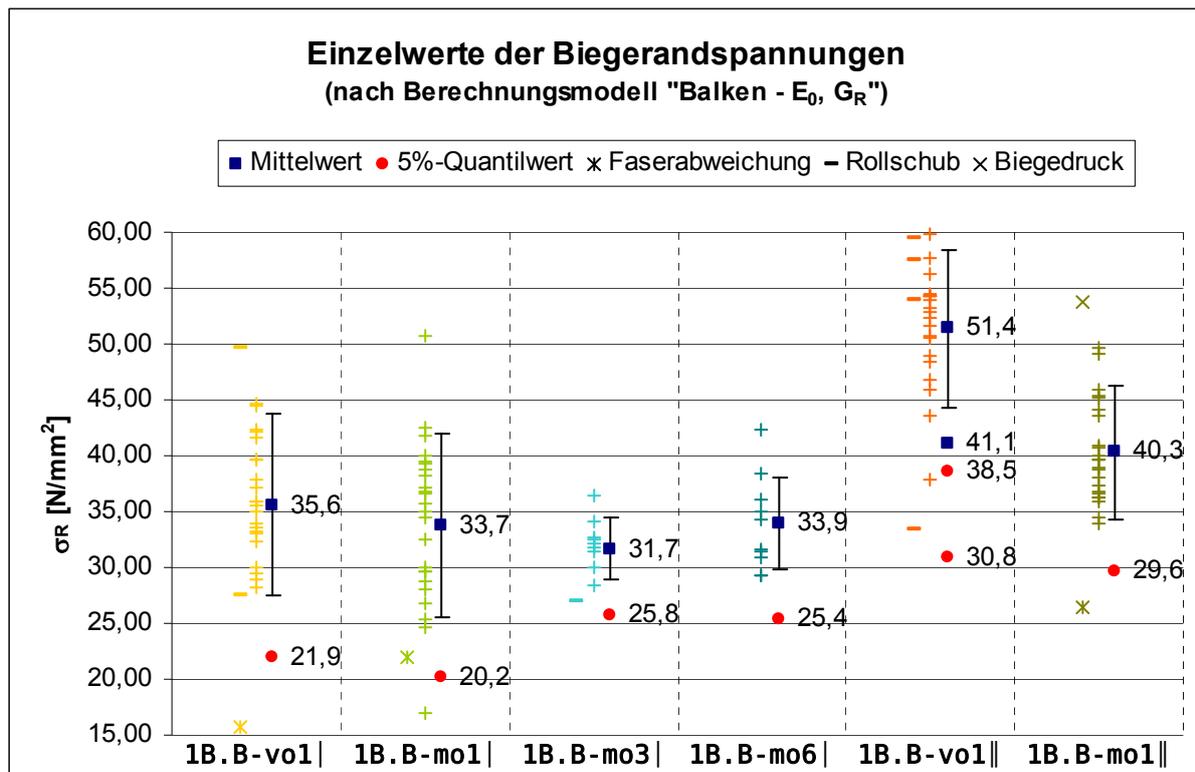


Diagramm F-38 Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden für die Prüfkörper der Prüfreihe 1B.B-mo1||

**Tabelle F-33 Statistische Werte der Biegerandspannungen der Bauteile in  $N/mm^2$  für die einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 1B.B (mit „Ausreißer“) – Berechnungsmethode „Balken –  $E_0, G_R$ “**

Statistischer Wert	1B.B vo1	1B.B mo1	1B.B mo3	1B.B mo6	1B.B vo1	1B.B mo1
Anzahl n	25	25	10	10	24	25
Minimum $x_{min}$	15,63	17,04	26,99	29,20	33,37	26,44
Maximum $x_{max}$	49,56	50,64	36,43	42,29	59,84	53,82
Mittelwert $x_m$	35,61	33,72	31,67	33,90	51,38	40,30
Standardabweichung $s_x$	8,20	8,18	2,74	4,10	7,08	5,95
Variationskoeffizient $v_x$	23,0%	24,3%	8,7%	12,1%	13,8%	14,8%
Beiwert Anzahl $k_n$	2,02	2,02	2,34	2,34	2,03	2,02
5%-Quantilwert $x_{05}$	21,94	20,22	25,78	25,38	38,55	29,64



**Diagramm F-39 Einzelwert, Mittelwerte und 5%-Quantilwerte der Biegerandspannungen der einzelnen Versuchsreihen der Prüferserie 1B.B (mit „Ausreißer“) Berechnungsmethode „Balken –  $E_0, G_R$ “**

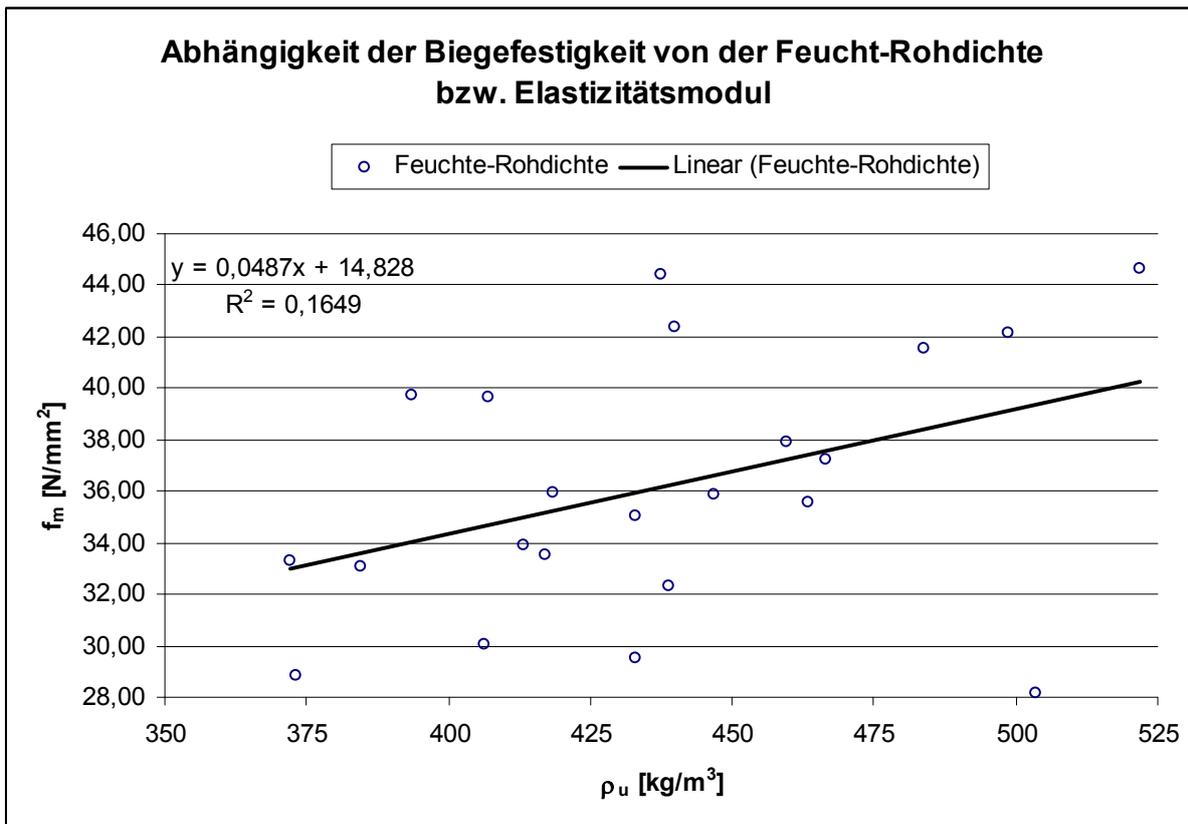


Diagramm F-40    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-vo1 | (ohne „Ausreißer“)

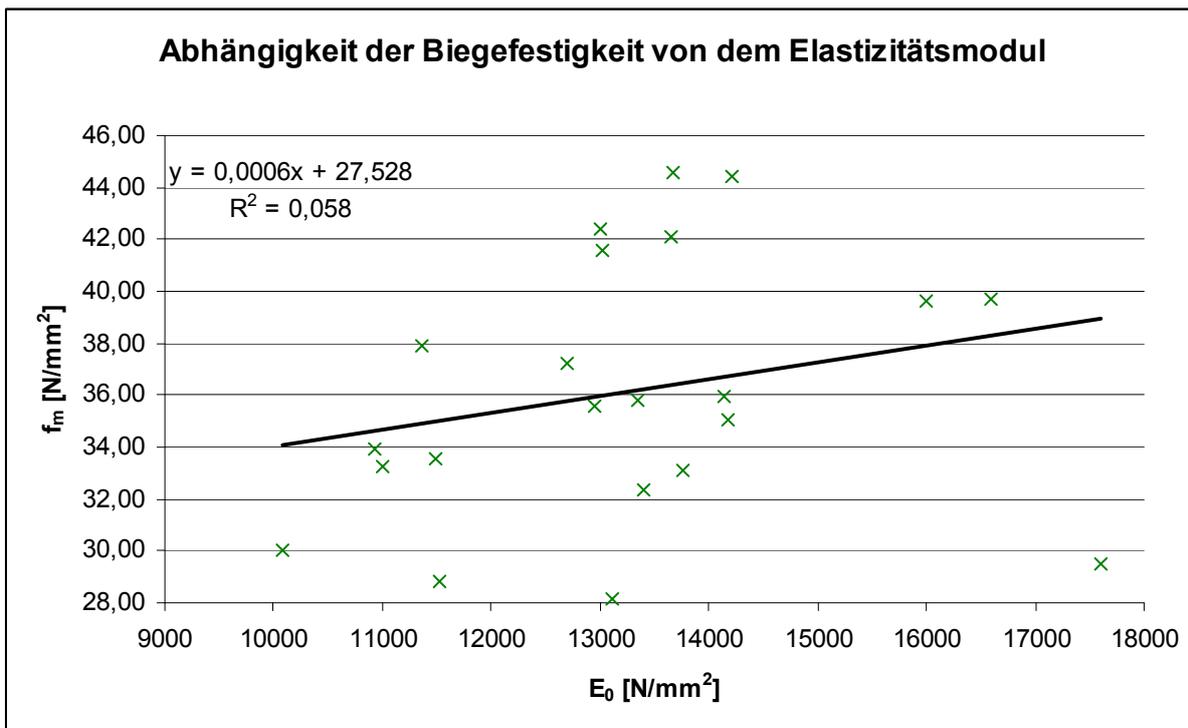


Diagramm F-41    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-vo1 | (ohne „Ausreißer“)

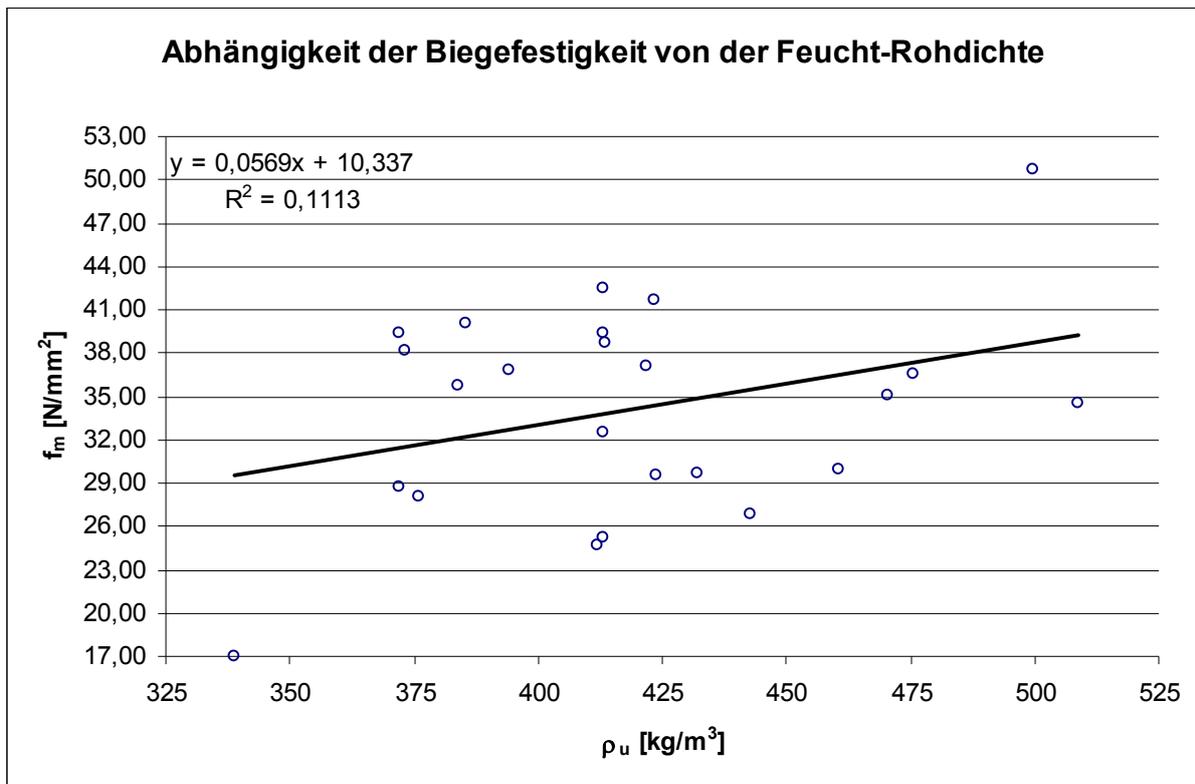


Diagramm F-42 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo1 | (ohne „Ausreißer“)

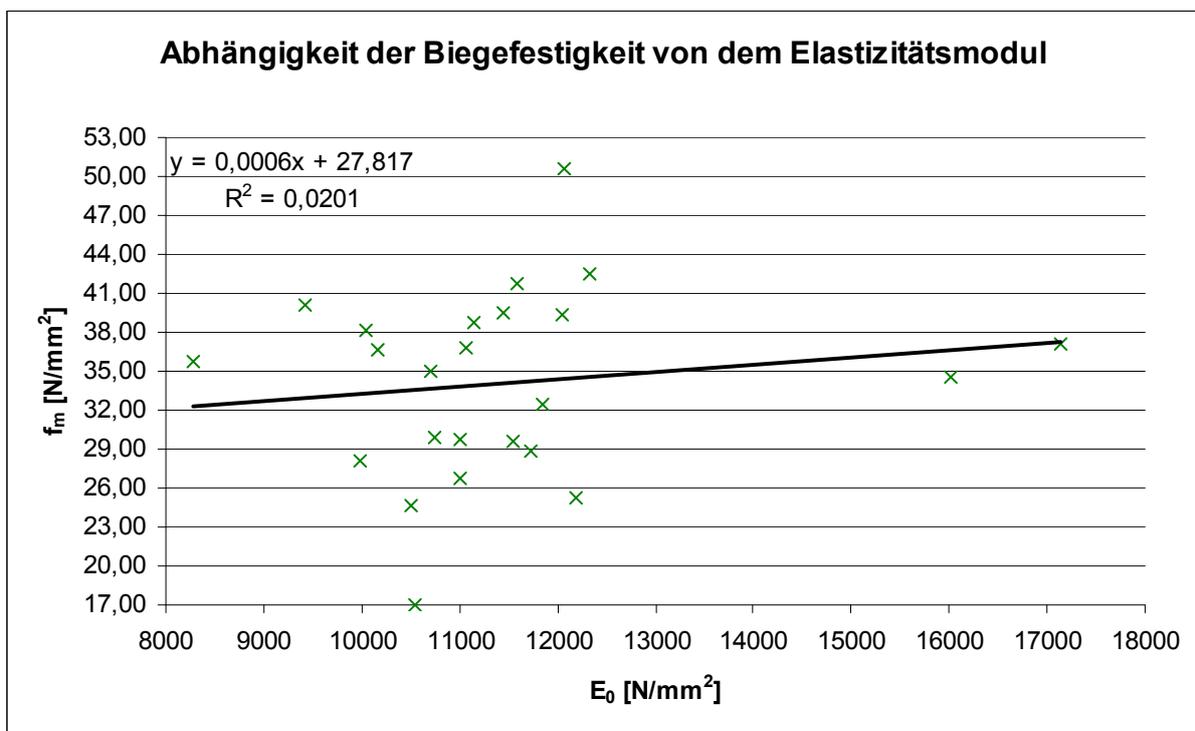


Diagramm F-43 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo1 | (ohne „Ausreißer“)

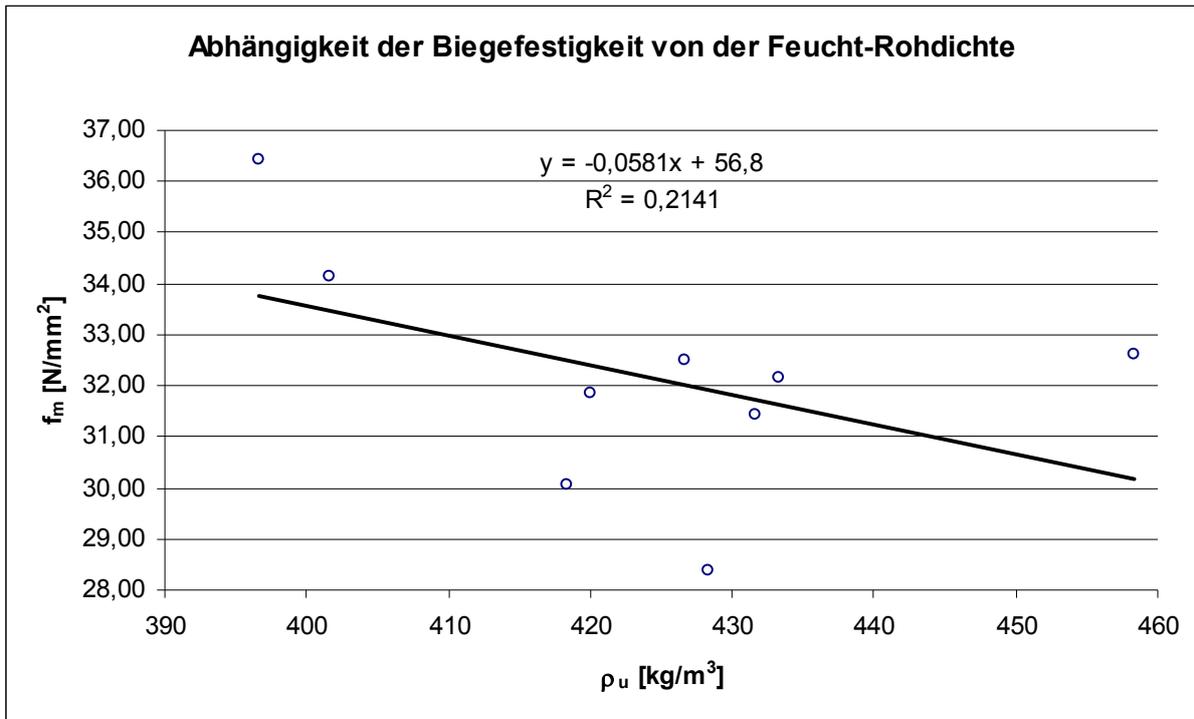


Diagramm F-44    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo3 | (ohne „Ausreißer“)

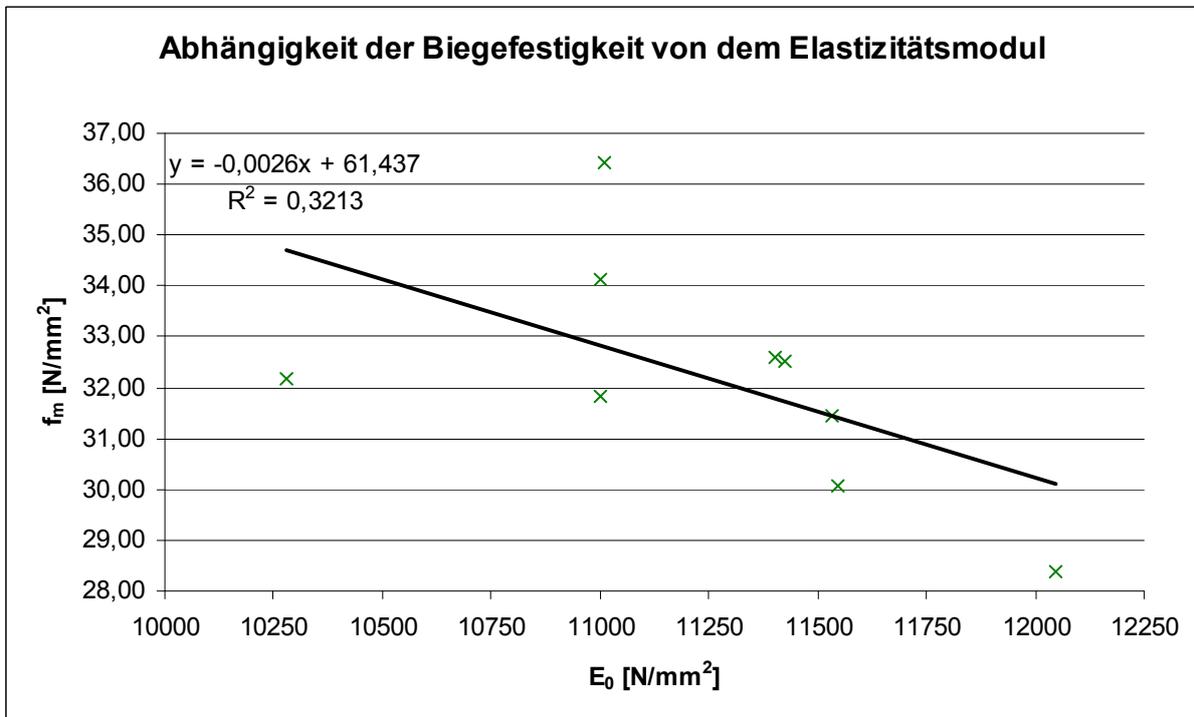


Diagramm F-45    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo3 | (ohne „Ausreißer“)

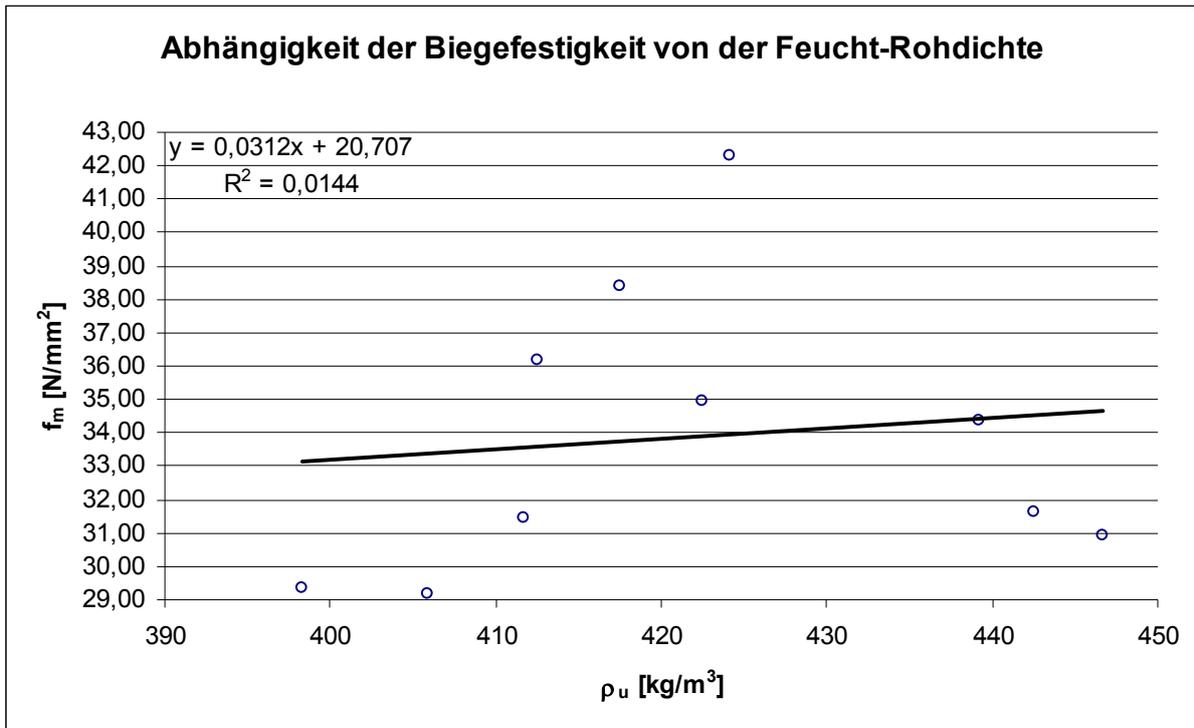


Diagramm F-46    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo6 | (ohne „Ausreißer“)**

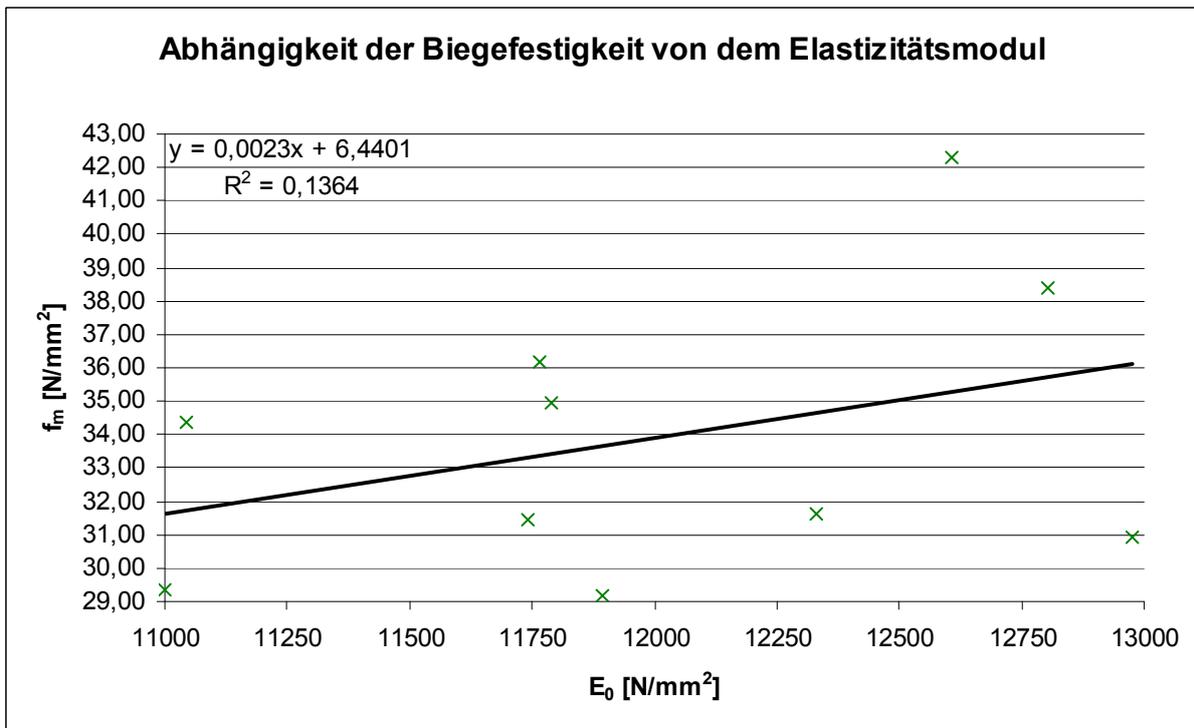


Diagramm F-47    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo6 | (ohne „Ausreißer“)**

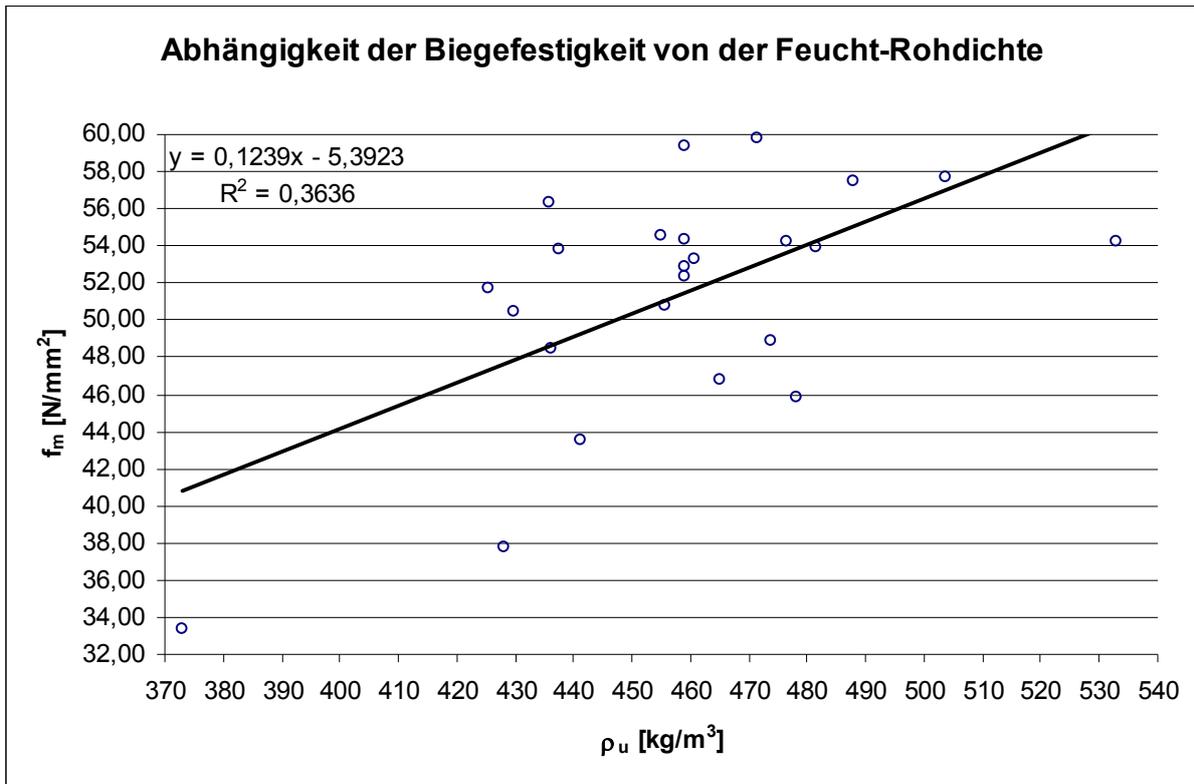


Diagramm F-48    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-vo1|| (ohne „Ausreißer“)

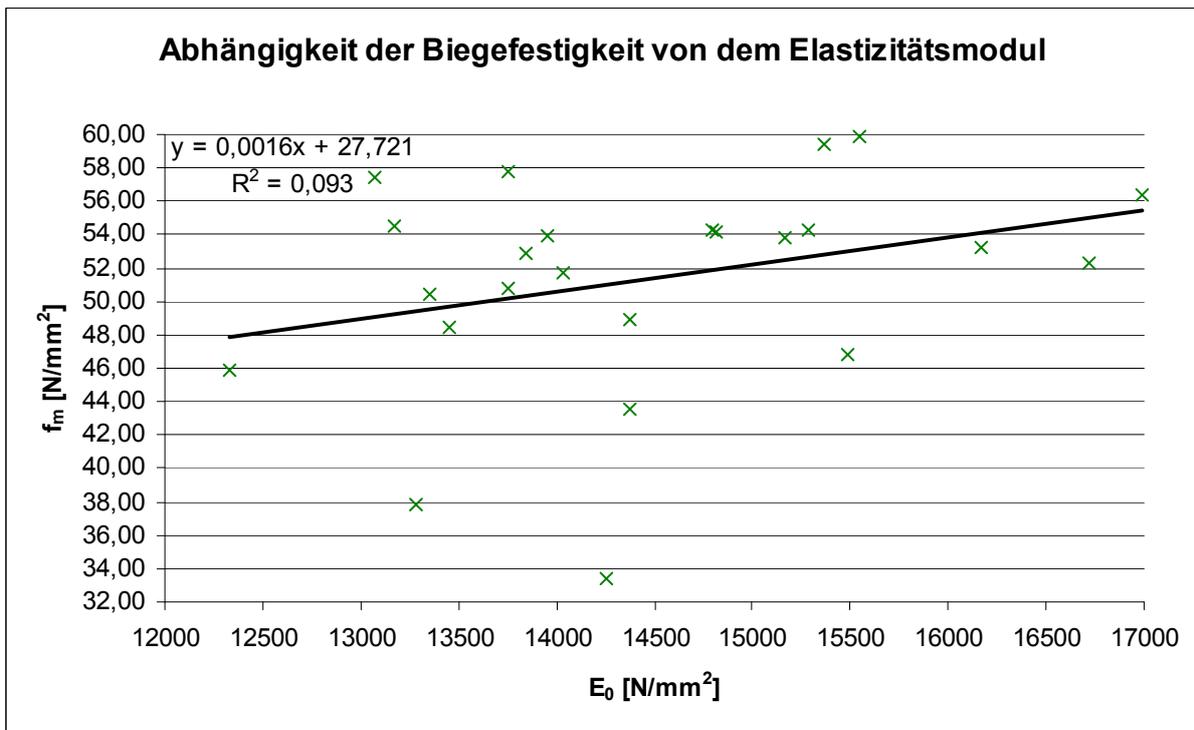


Diagramm F-49    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-vo1|| (ohne „Ausreißer“)

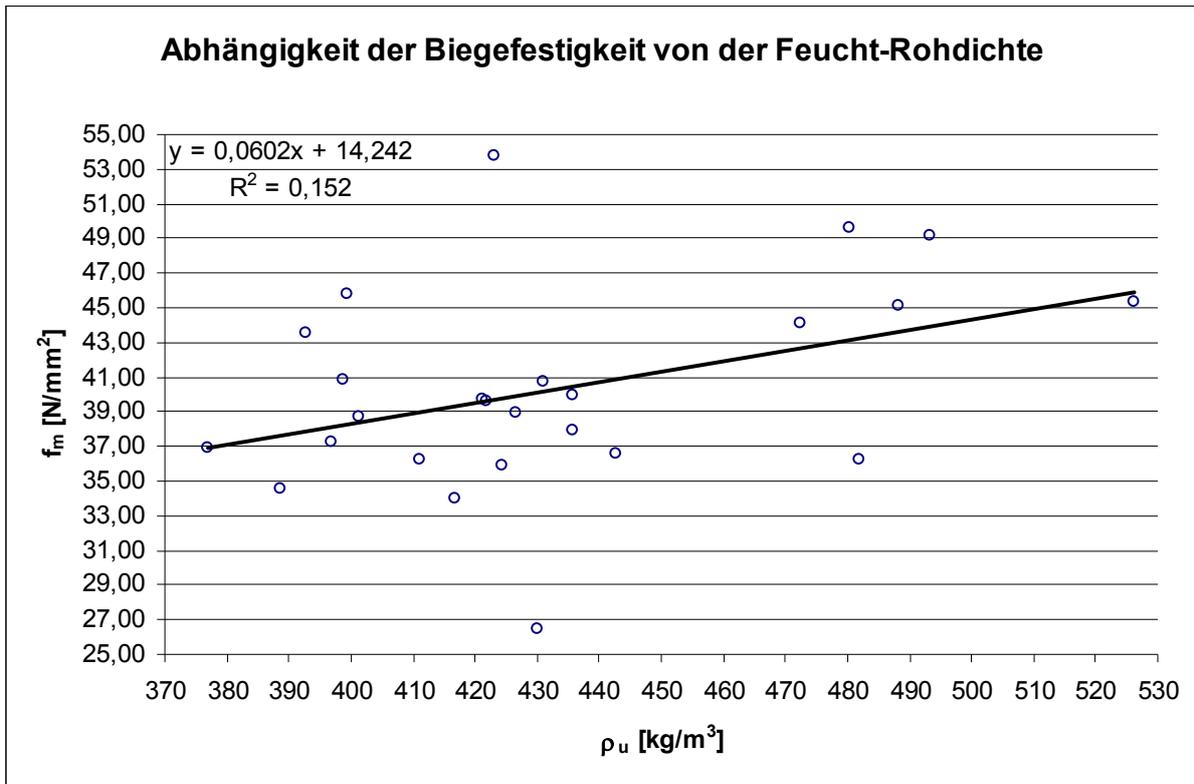


Diagramm F-50    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 1B.B-mo1|| (ohne „Ausreißer“)

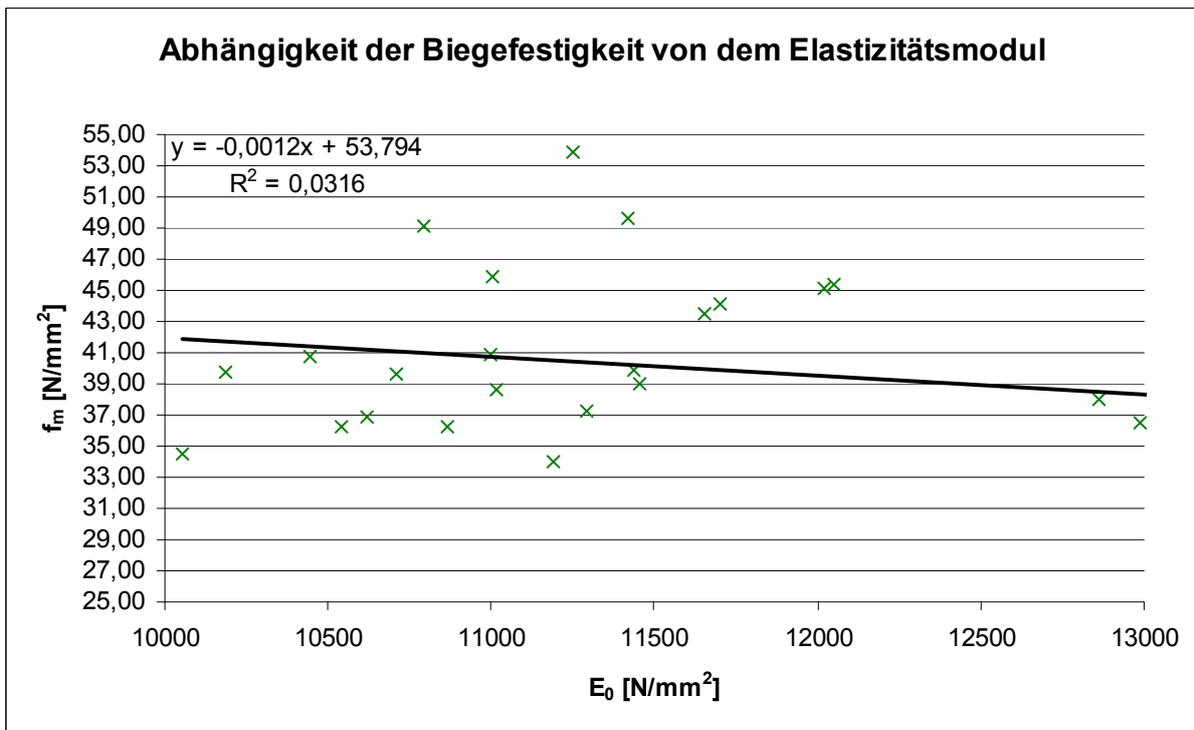


Diagramm F-51    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von dem Elastizitätsmodul für die Prüfreihe 1B.B-mo1|| (ohne „Ausreißer“)

## Anhang F.2 Tabellen und Diagramme der Versuchsserie 2B.B

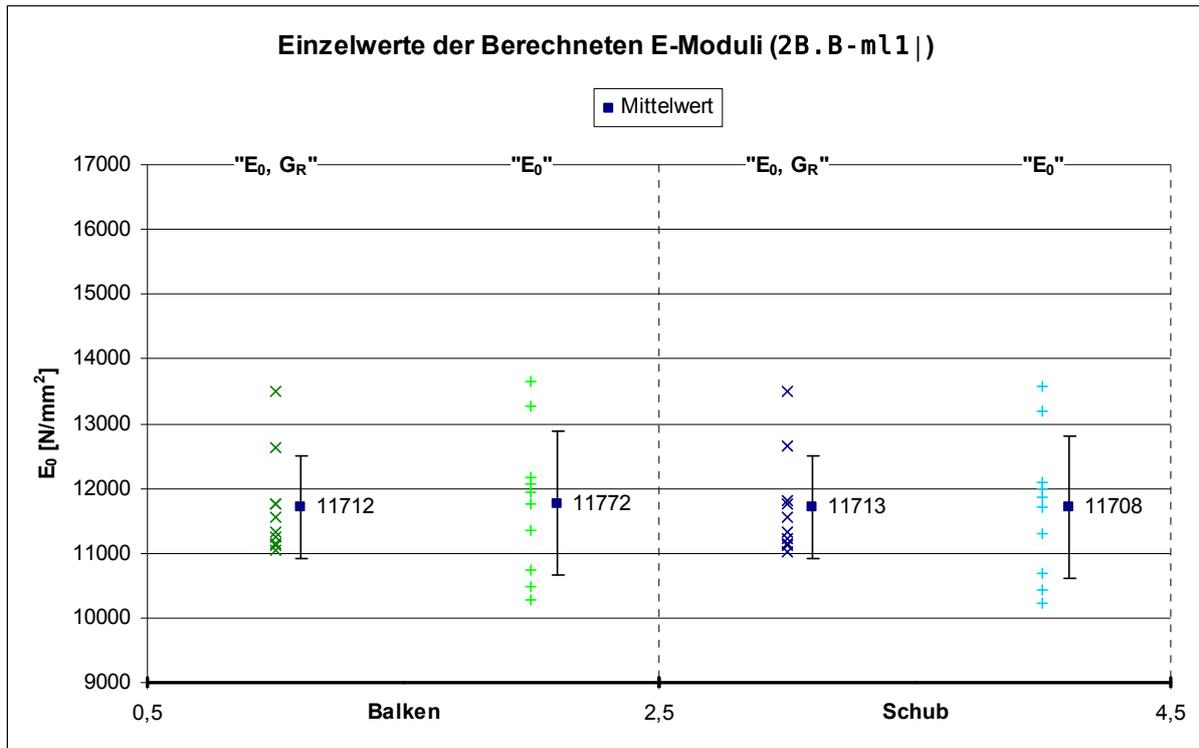


Diagramm F-52 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11 |

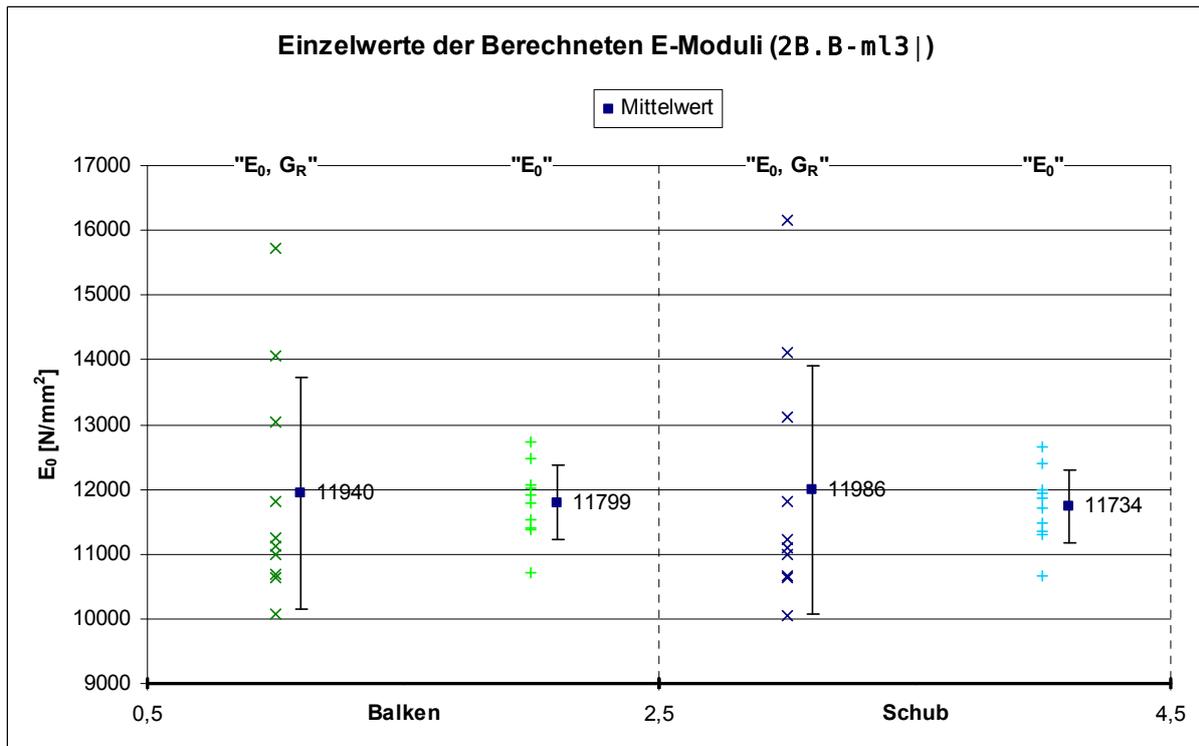


Diagramm F-53 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m13 |

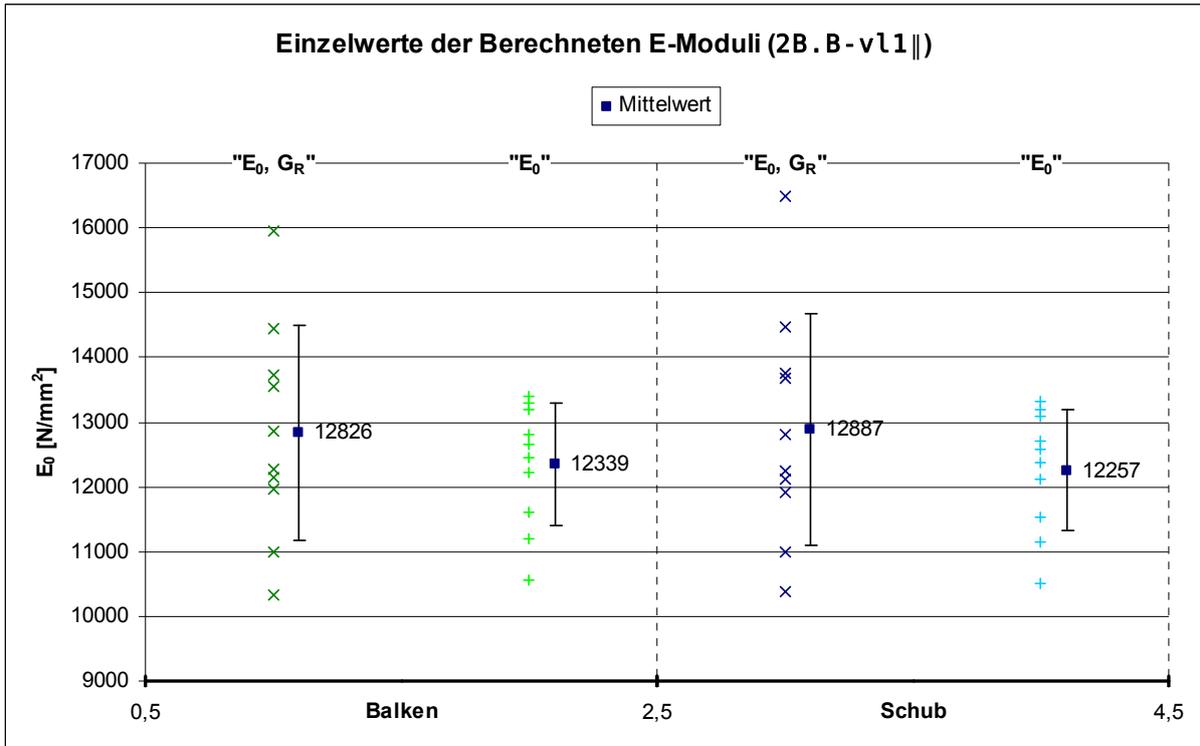


Diagramm F-54 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-v11||

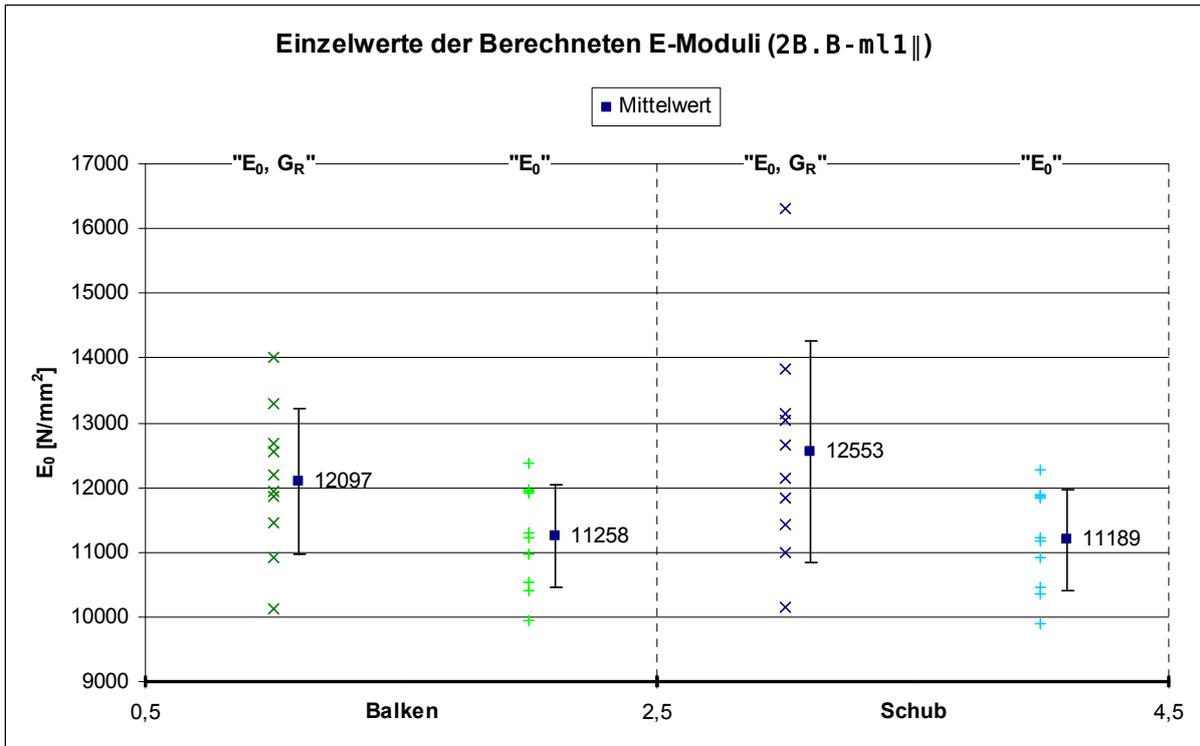


Diagramm F-55 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11||

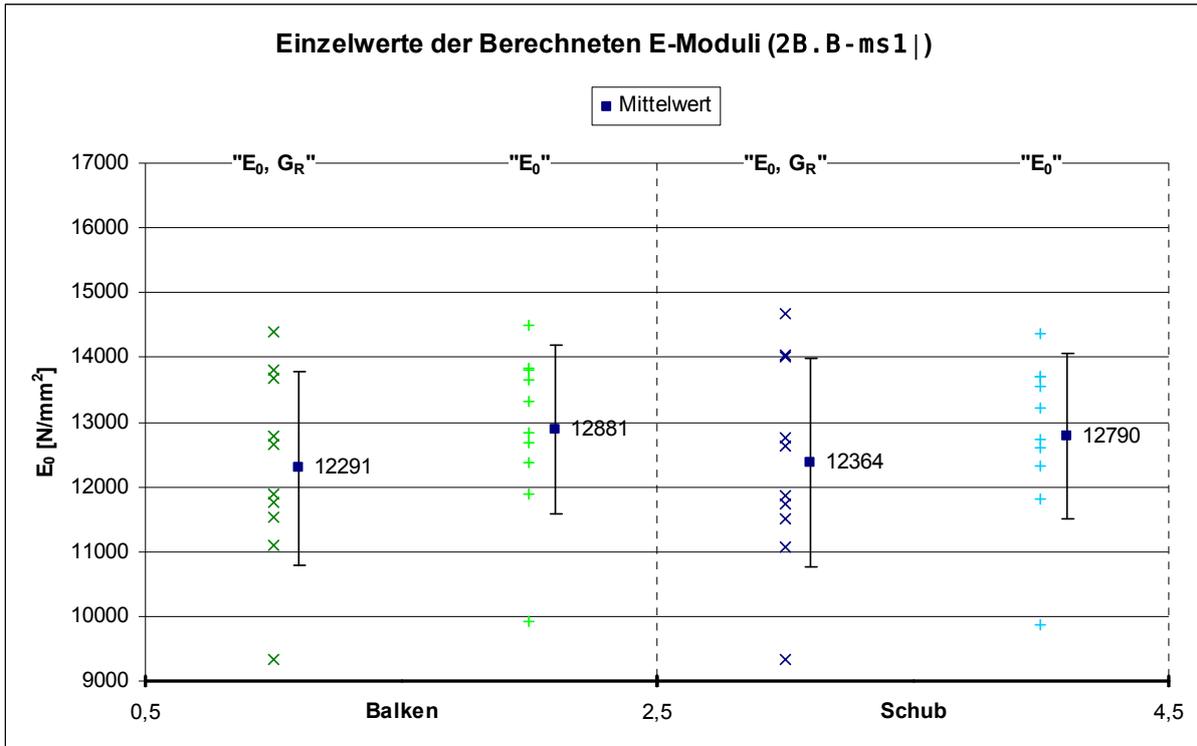


Diagramm F-56 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1 |

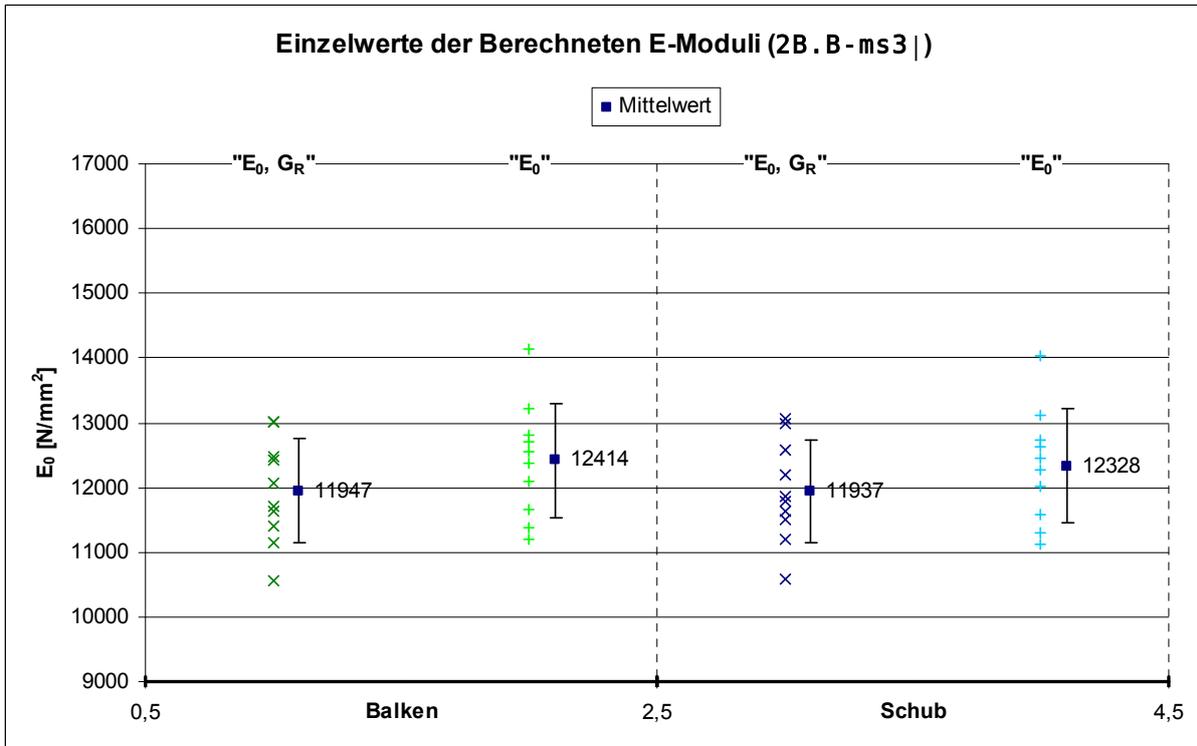


Diagramm F-57 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms3 |

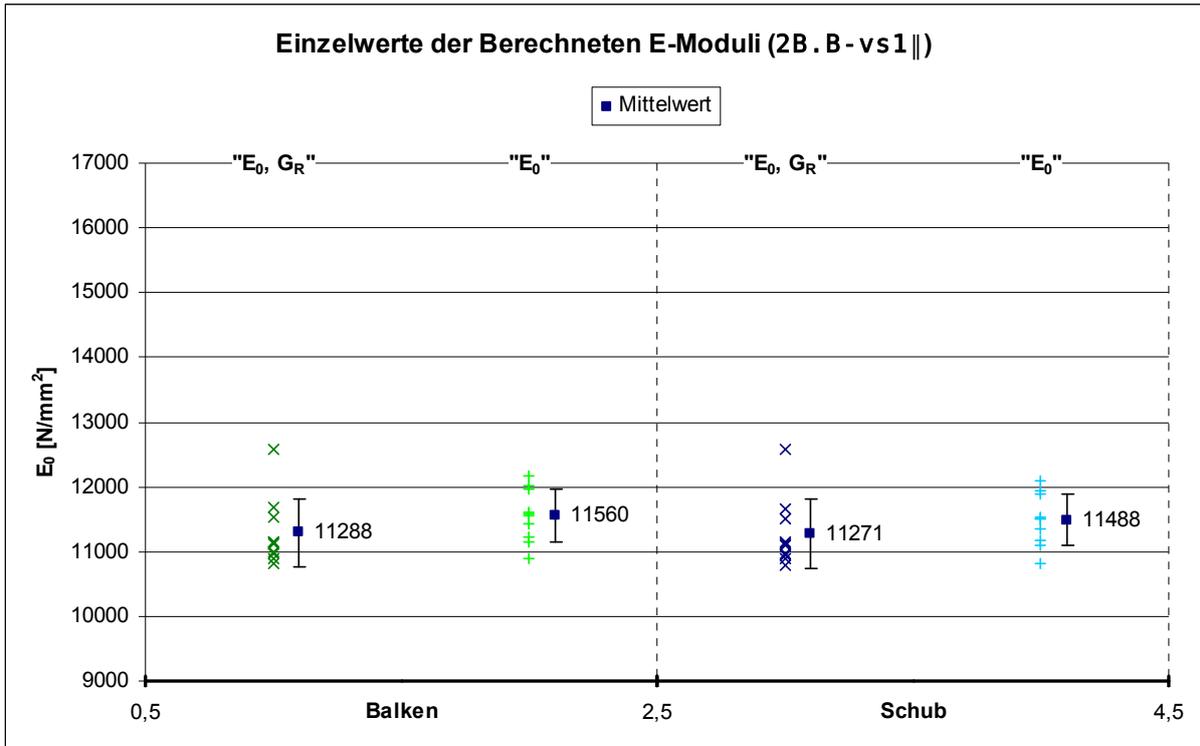


Diagramm F-58 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-vs1||

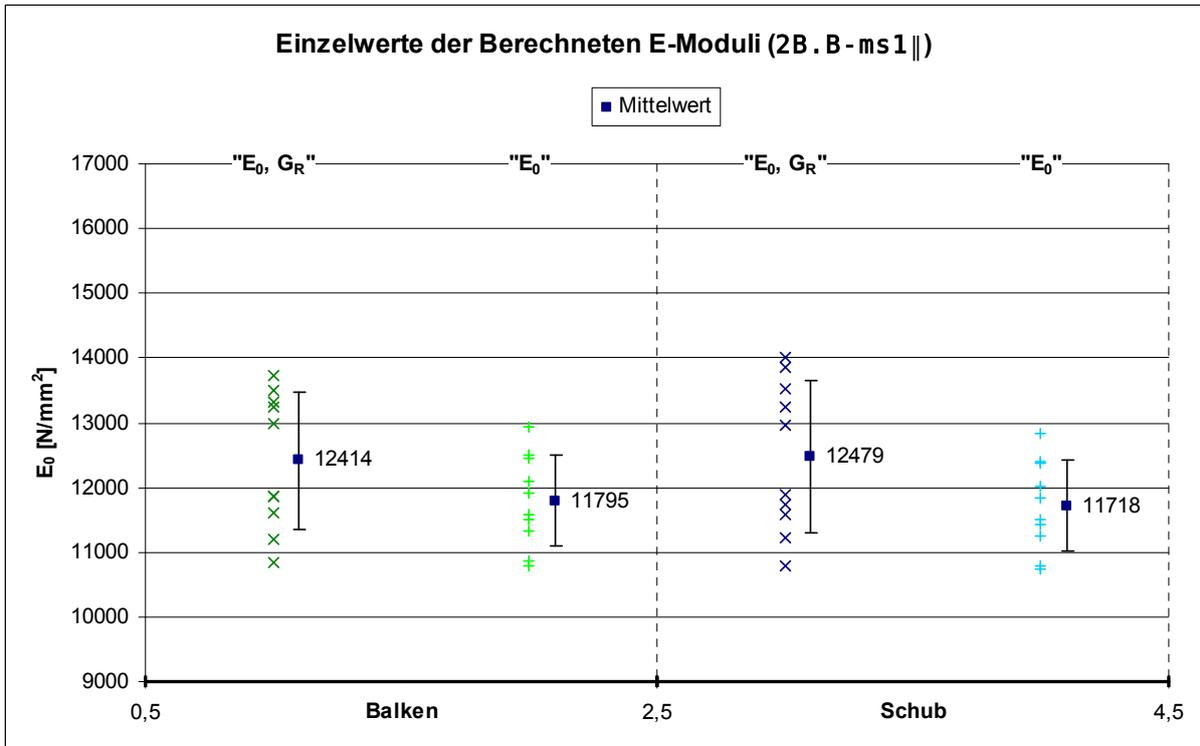


Diagramm F-59 Einzel- und Mittelwerte der E-Moduln für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1||

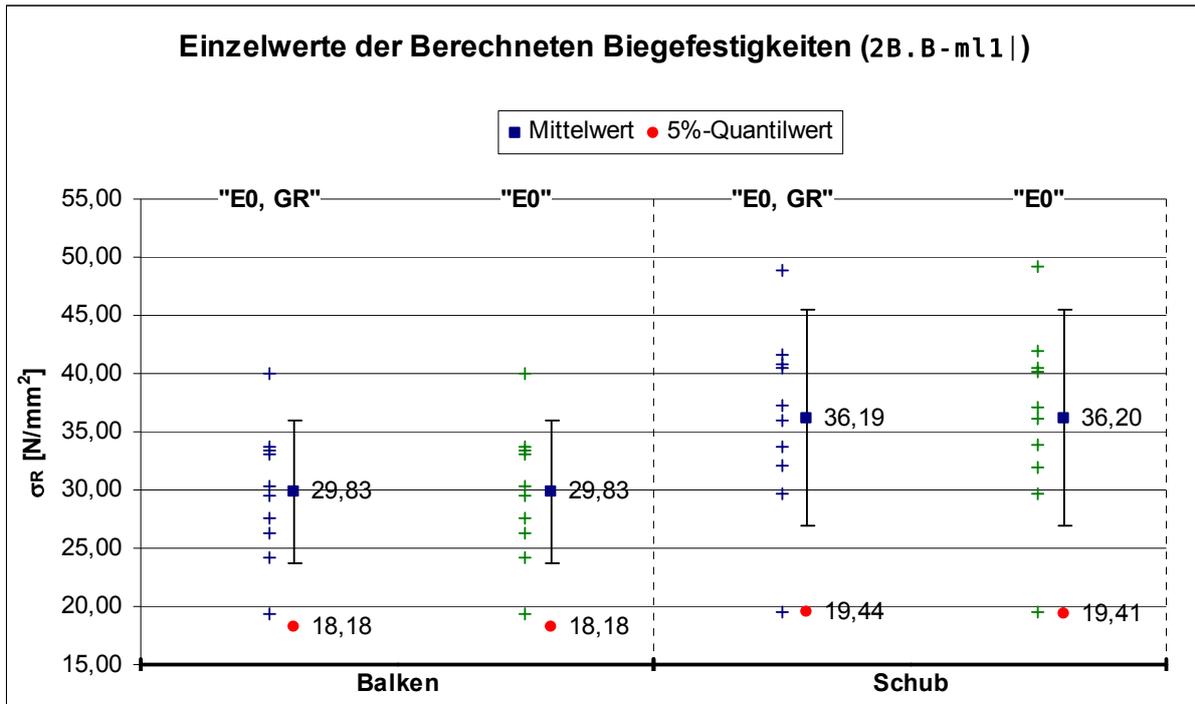


Diagramm F-60 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11 |

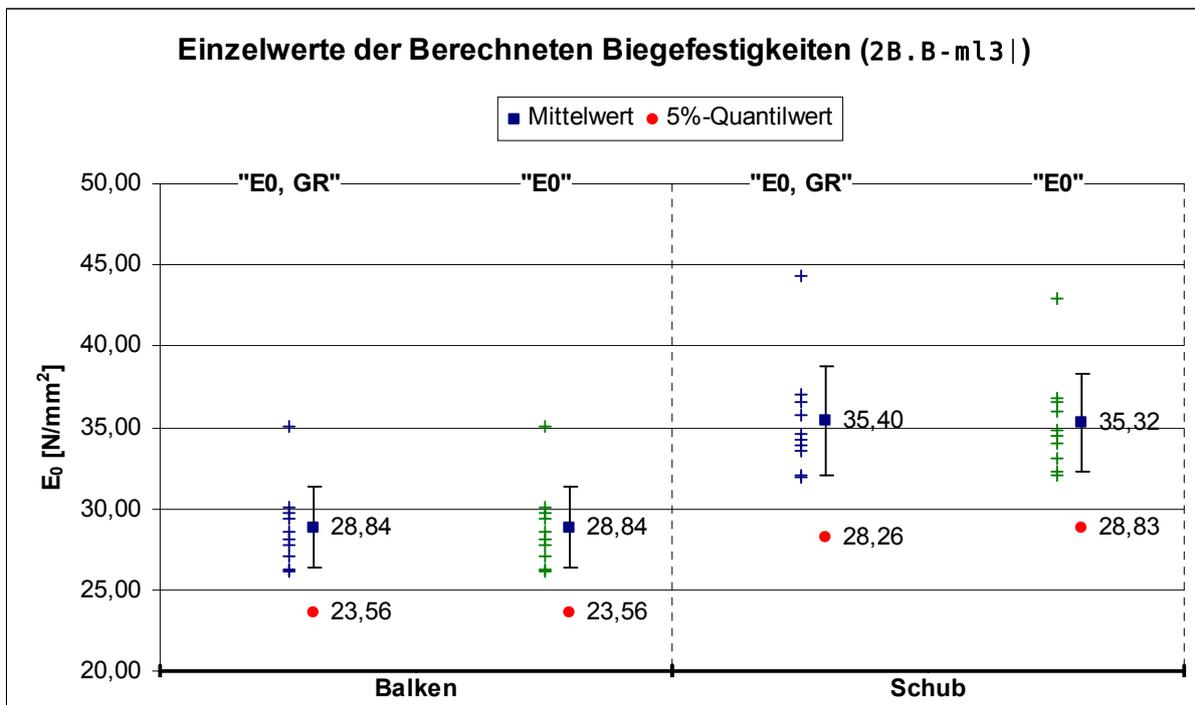


Diagramm F-61 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m13 |

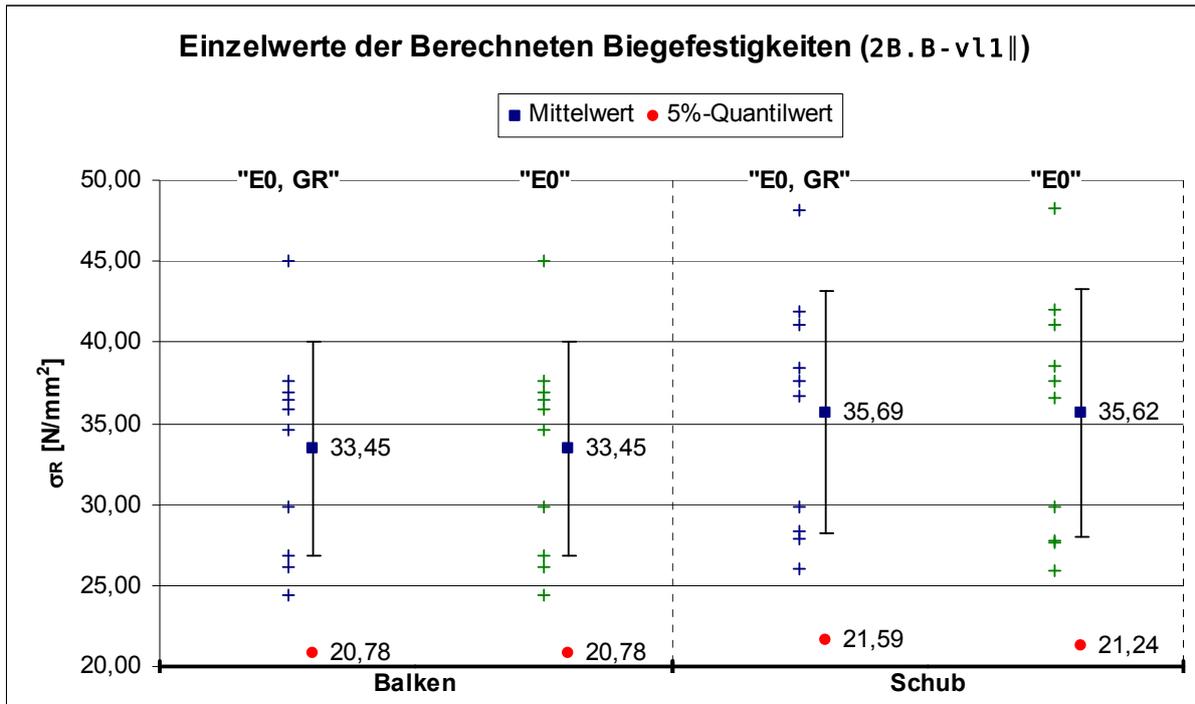


Diagramm F-62 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-v11||

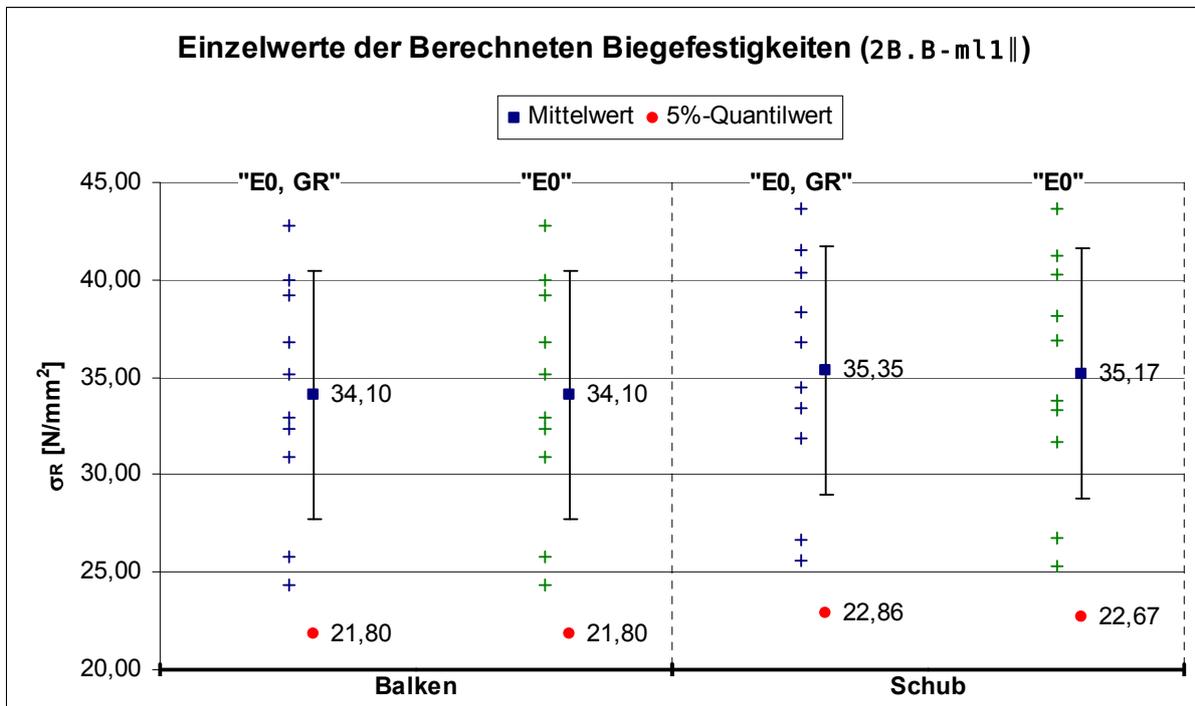


Diagramm F-63 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-m11||

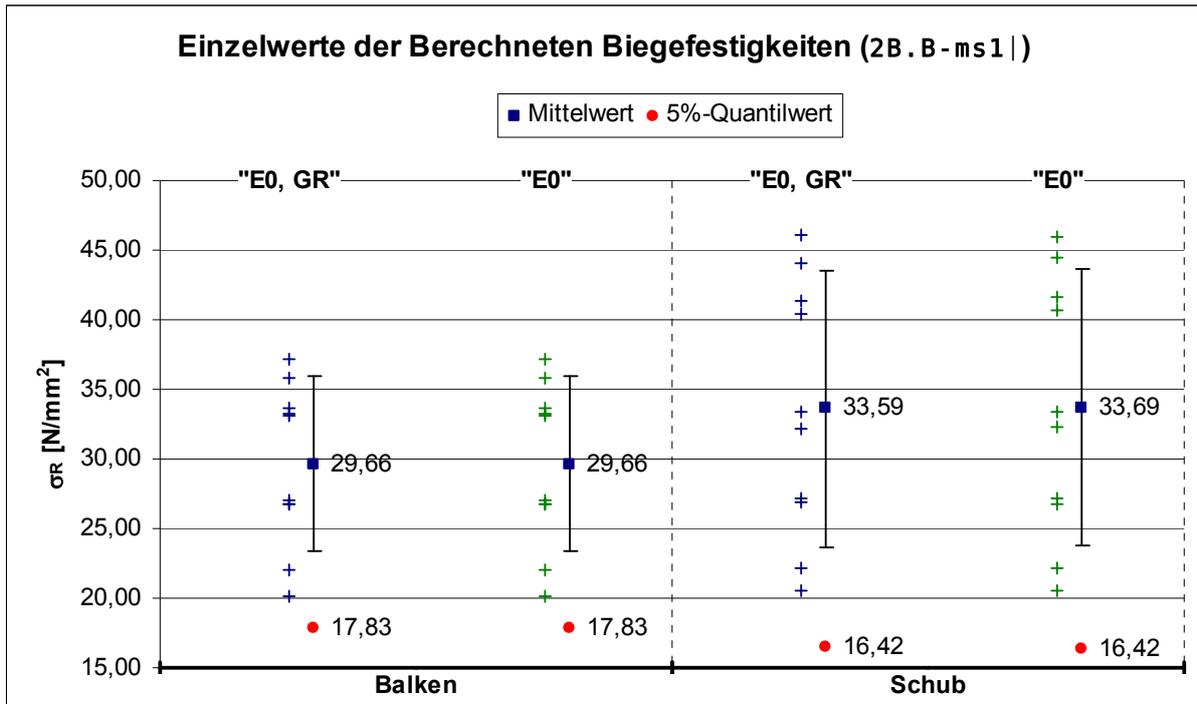


Diagramm F-64 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1 |

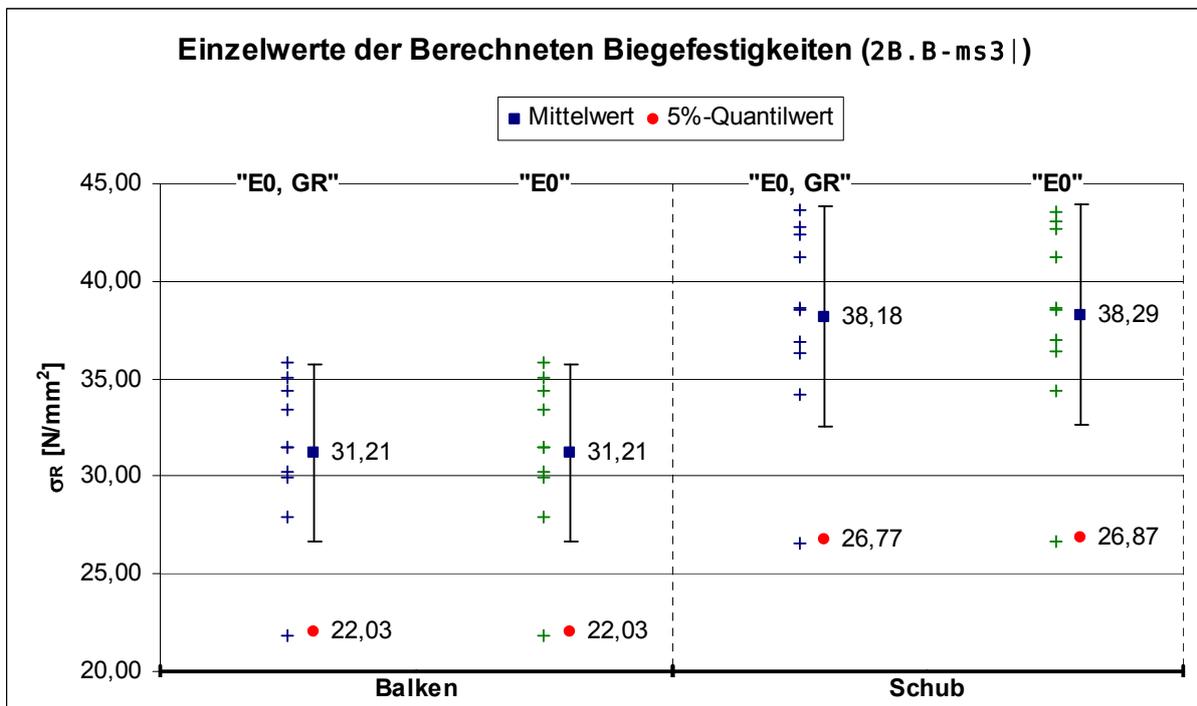


Diagramm F-65 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms3 |

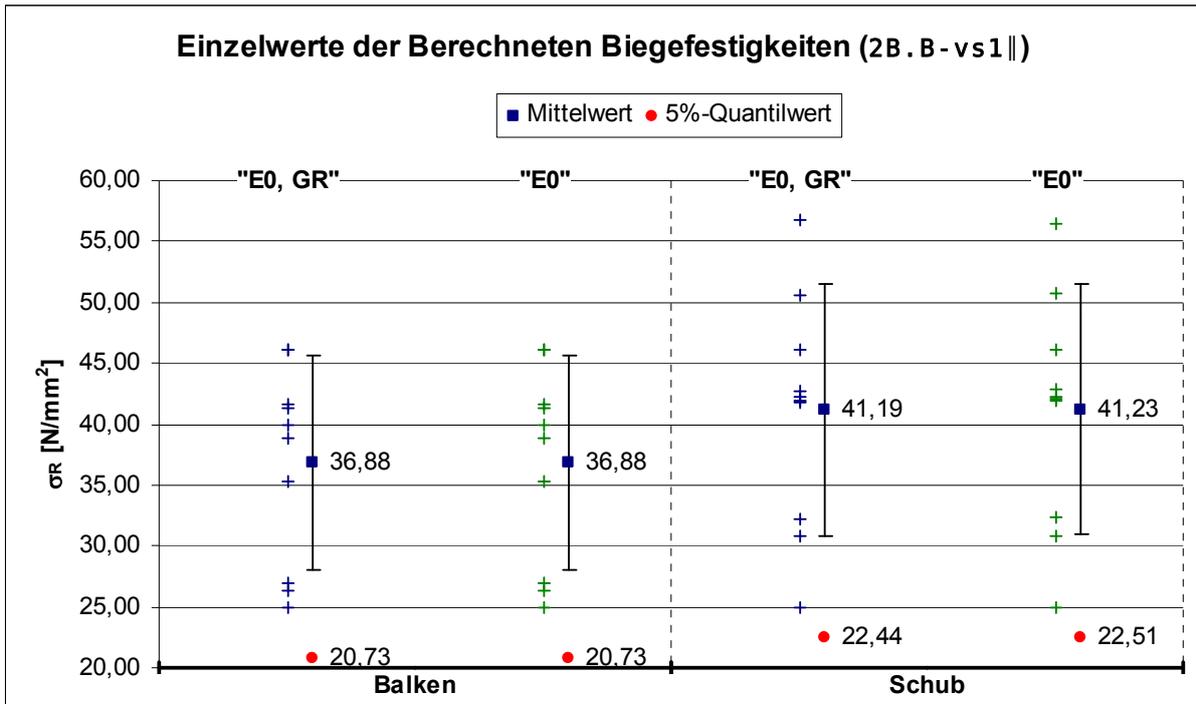


Diagramm F-66 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-vs1||

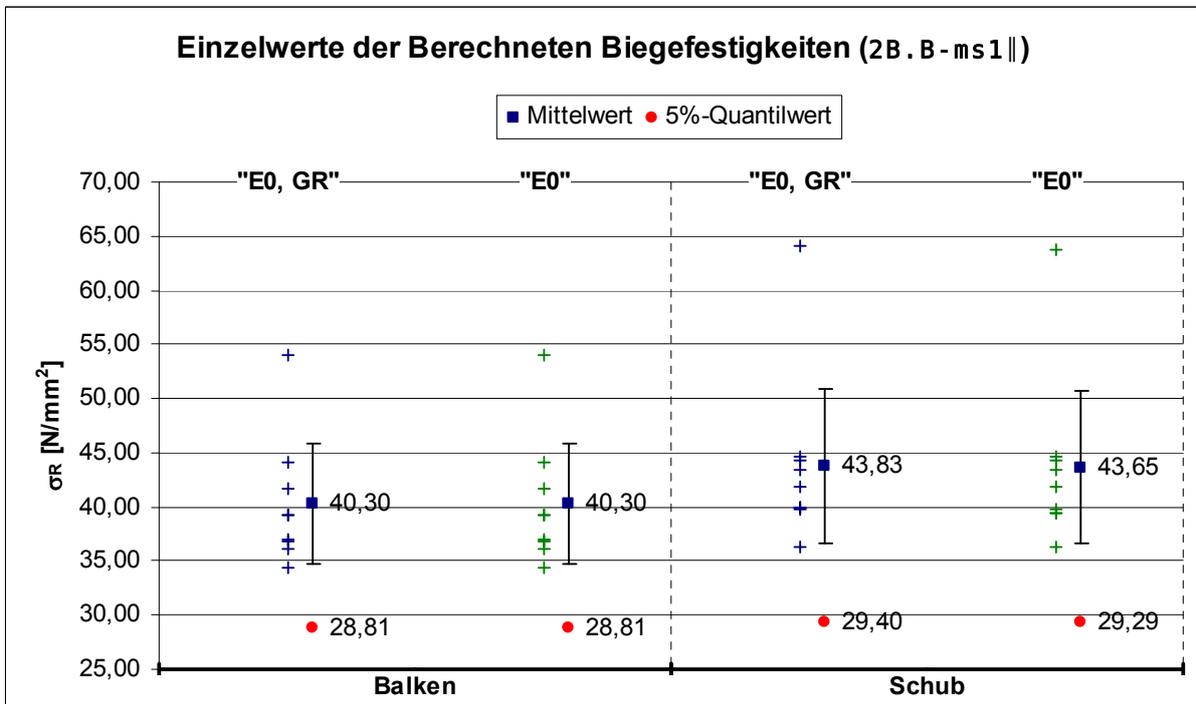


Diagramm F-67 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Bauteilbiegefestigkeiten für die verschiedenen Berechnungsmethoden der Prüfreihe 2B.B-ms1||

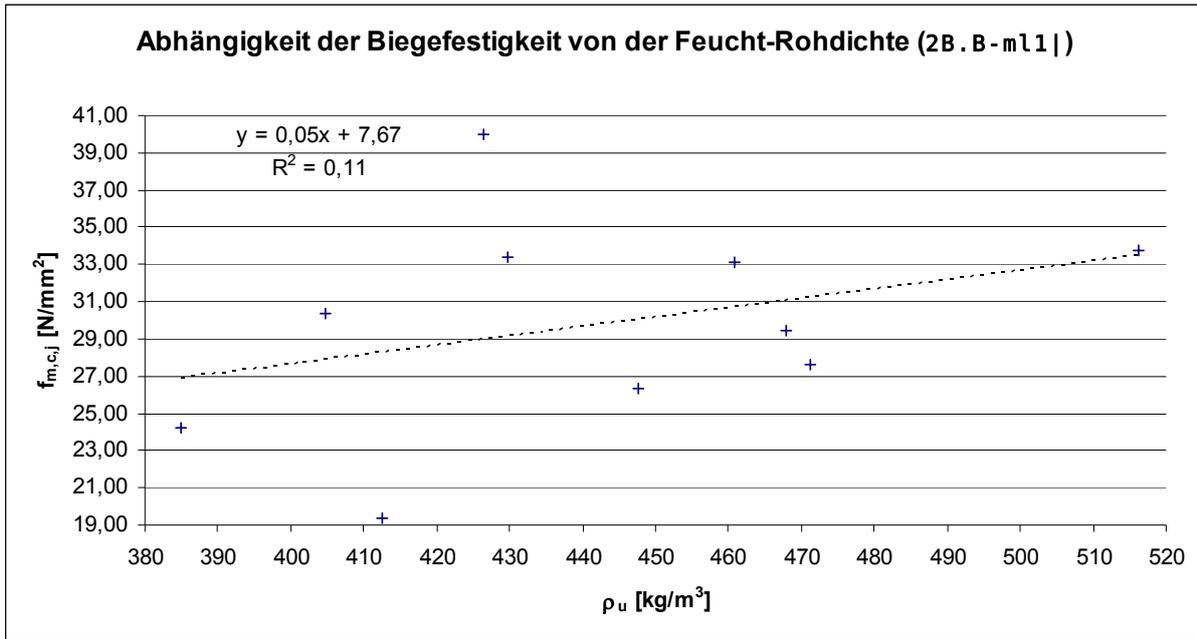


Diagramm F-68    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-m11 |**

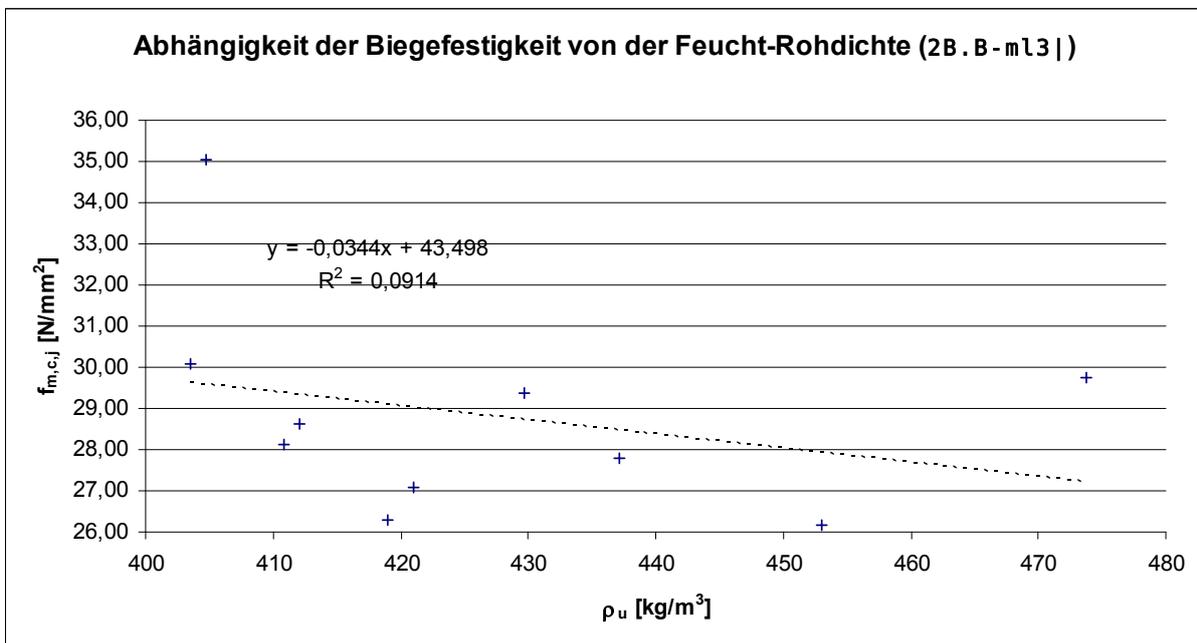


Diagramm F-69    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-m13 |**

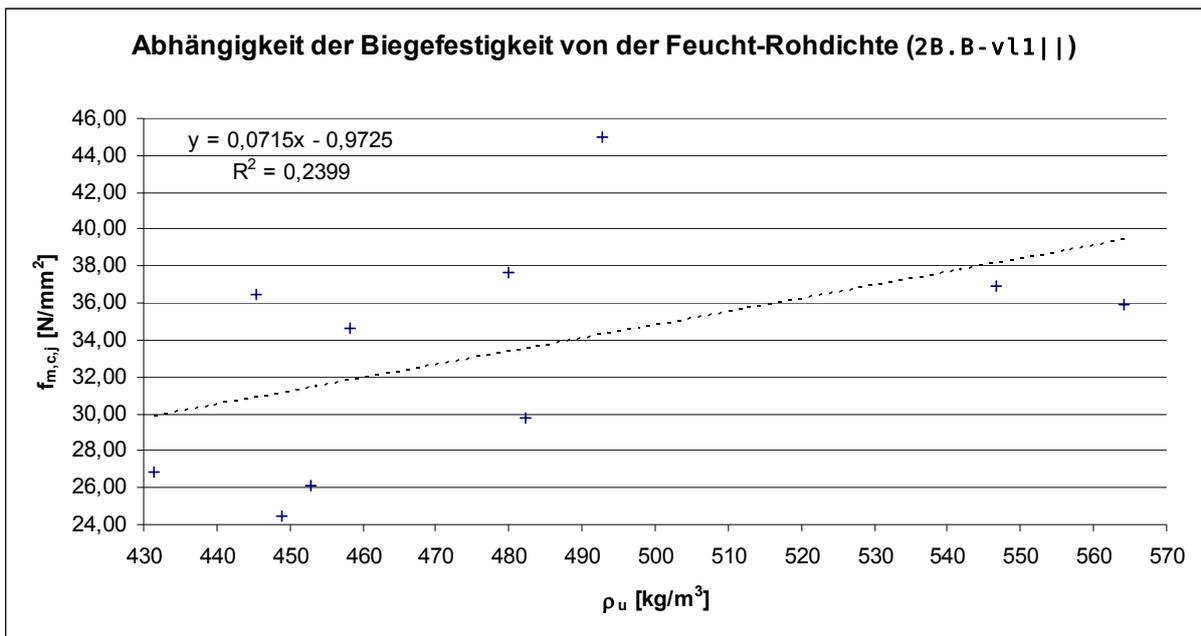


Diagramm F-70    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-v11||**

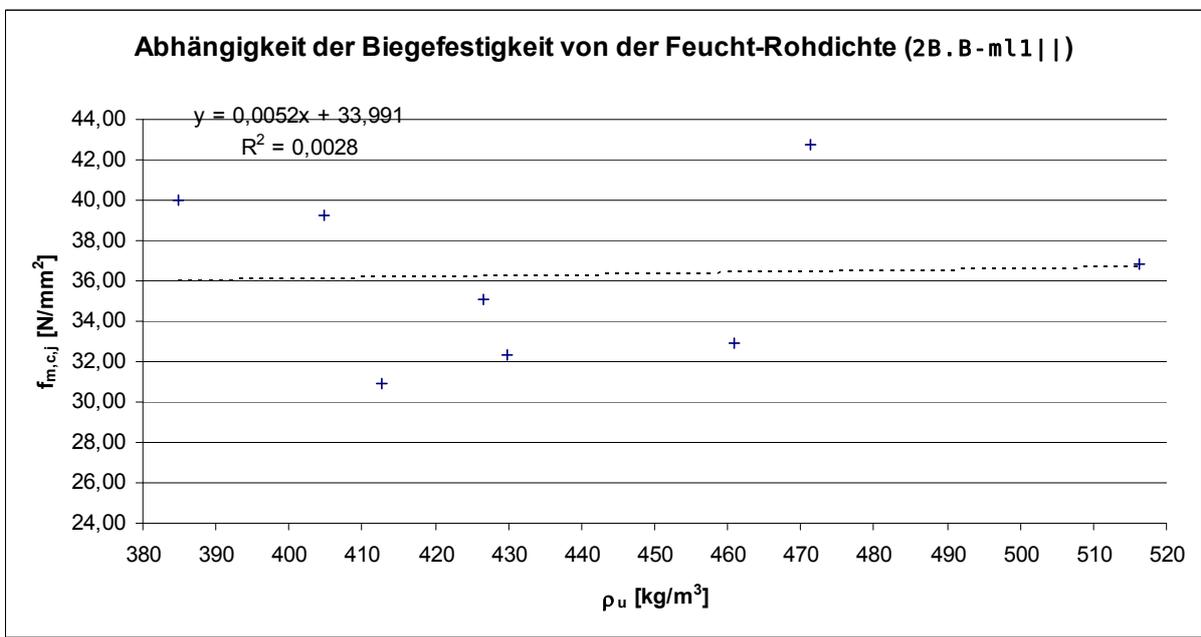
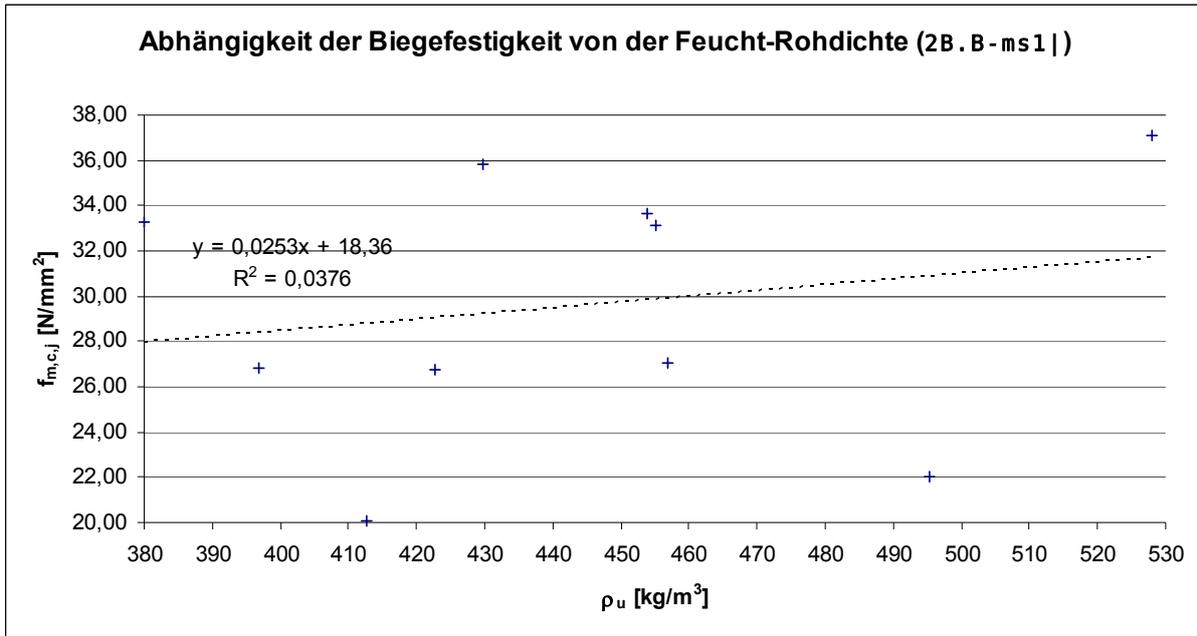
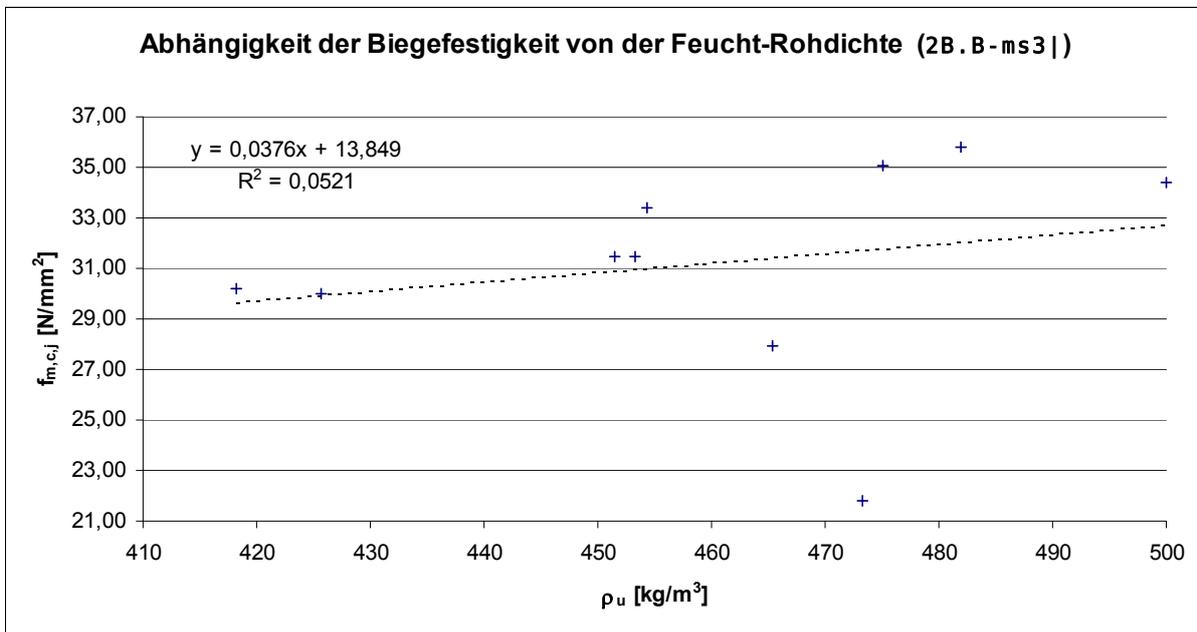


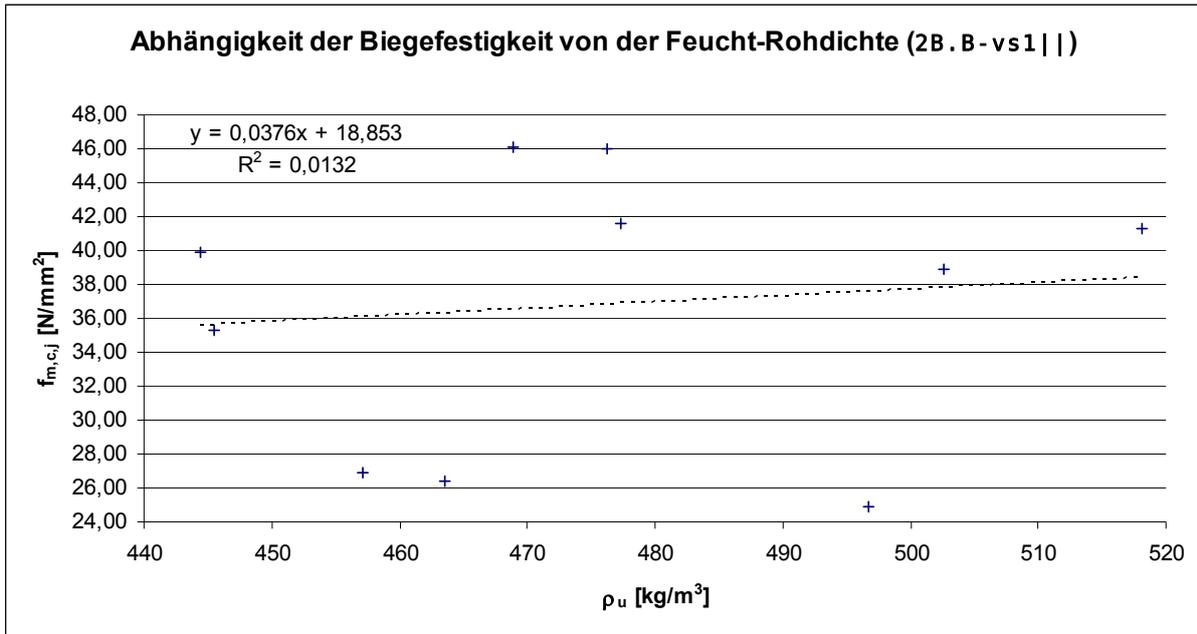
Diagramm F-71    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-m11||**



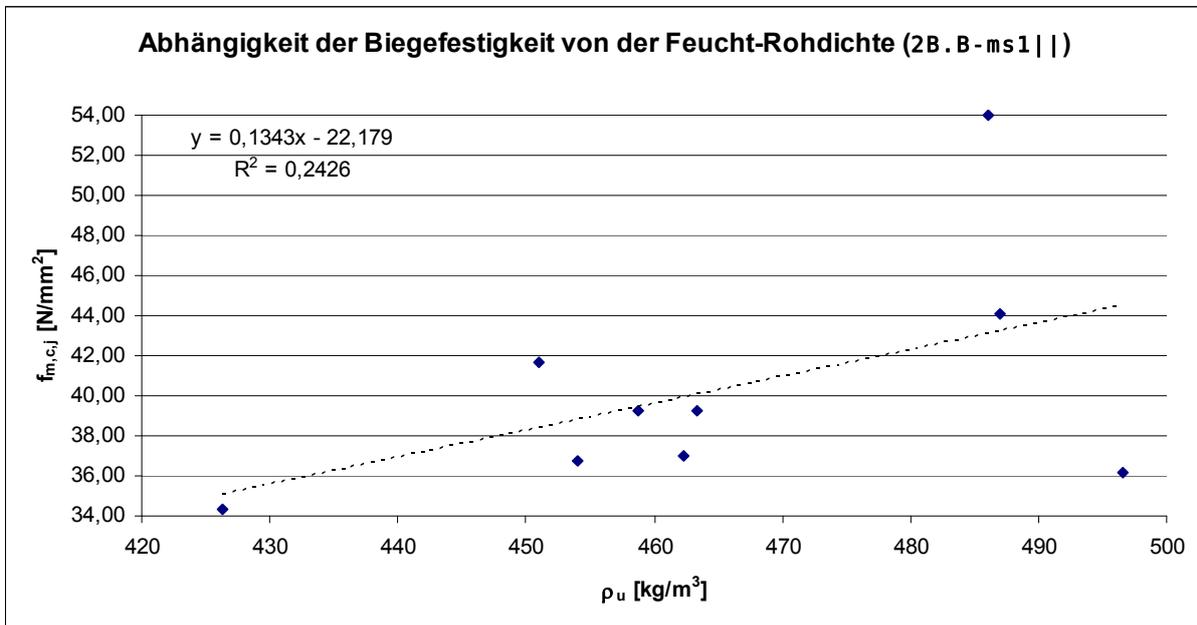
**Diagramm F-72** Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-ms1



**Diagramm F-73** Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-ms3



**Diagramm F-74**    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-vs1 ||**



**Diagramm F-75**    **Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 2B.B-ms1 ||**

**Tabelle F-34 Statistische Werte der Biegefestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> für die Prüfsreihe 2B.B (mit „Ausreißer“)**

Statistischer Wert	2B.B m11	2B.B m13	2B.B v11	2B.B m11	2B.B ms1	2B.B ms3	2B.B vs1	2B.B ms1
Anzahl n	10	10	10	10	10	10	10	9
Minimum $x_{\min}$	19,41	26,15	24,44	24,37	20,10	21,83	24,89	34,34
Maximum $x_{\max}$	39,95	35,04	45,02	42,75	37,13	35,81	46,15	53,98
Mittelwert $x_M$	29,83	28,84	33,45	34,10	29,66	31,21	36,88	40,30
Standardabweichung $s_x$	6,12	2,46	6,60	6,33	6,25	4,53	8,77	5,52
Variationskoeffizient $v_x$	20,5%	8,5%	19,7%	18,6%	21,1%	14,5%	23,8%	13,7%
Beiwert Anzahl $k_n$	2,338	2,338	2,338	2,338	2,338	2,338	2,338	2,397
5%-Quantilwert $x_{05}$	18,18	23,56	20,78	21,80	17,83	22,03	20,73	28,81

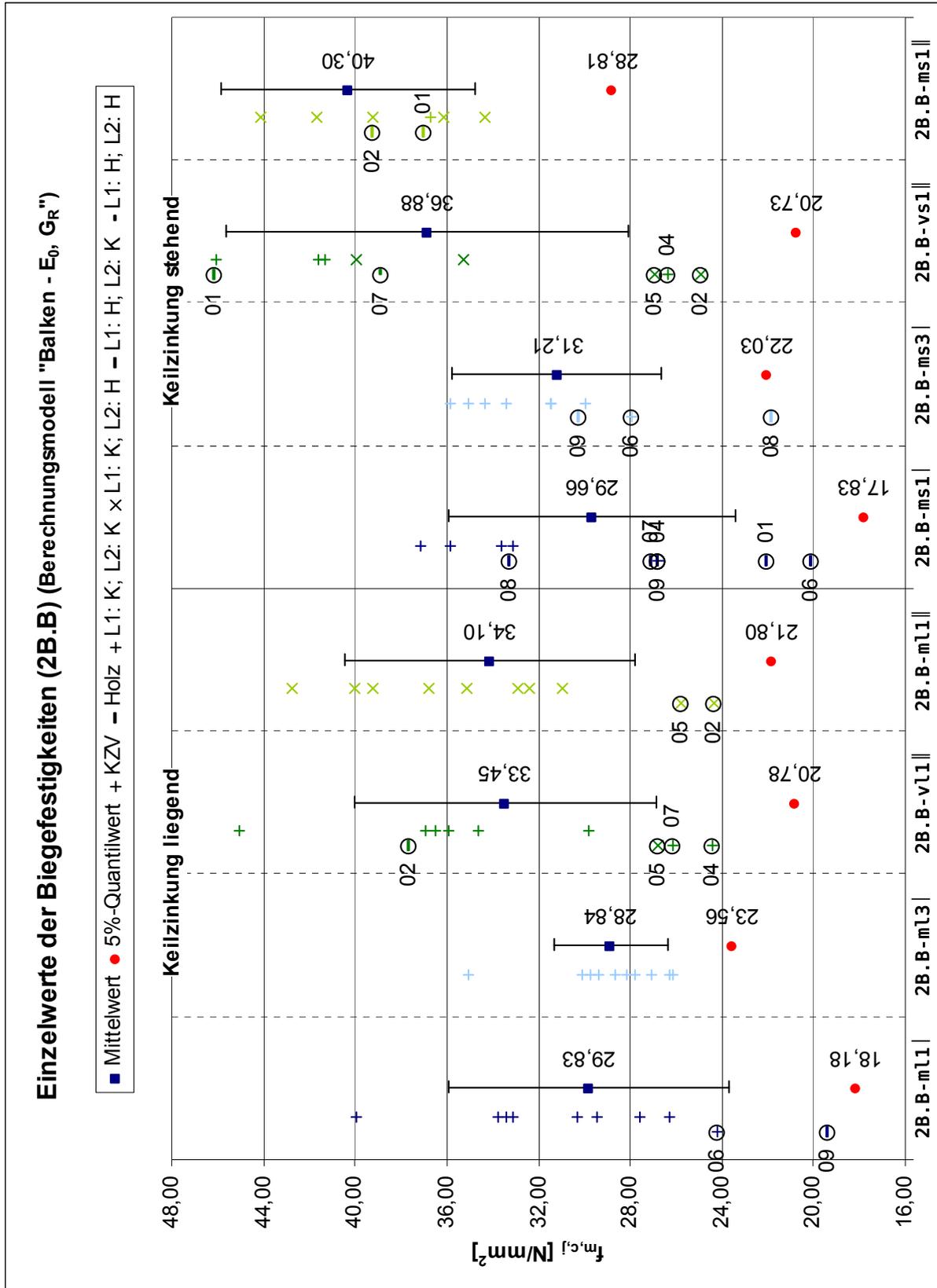


Diagramm F-76 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Biegefestigkeiten der Prüferserie 2B.B nach dem Berechnungsmodell „Balken – E<sub>0</sub>, G<sub>R</sub>“ (mit „Ausreißer“)

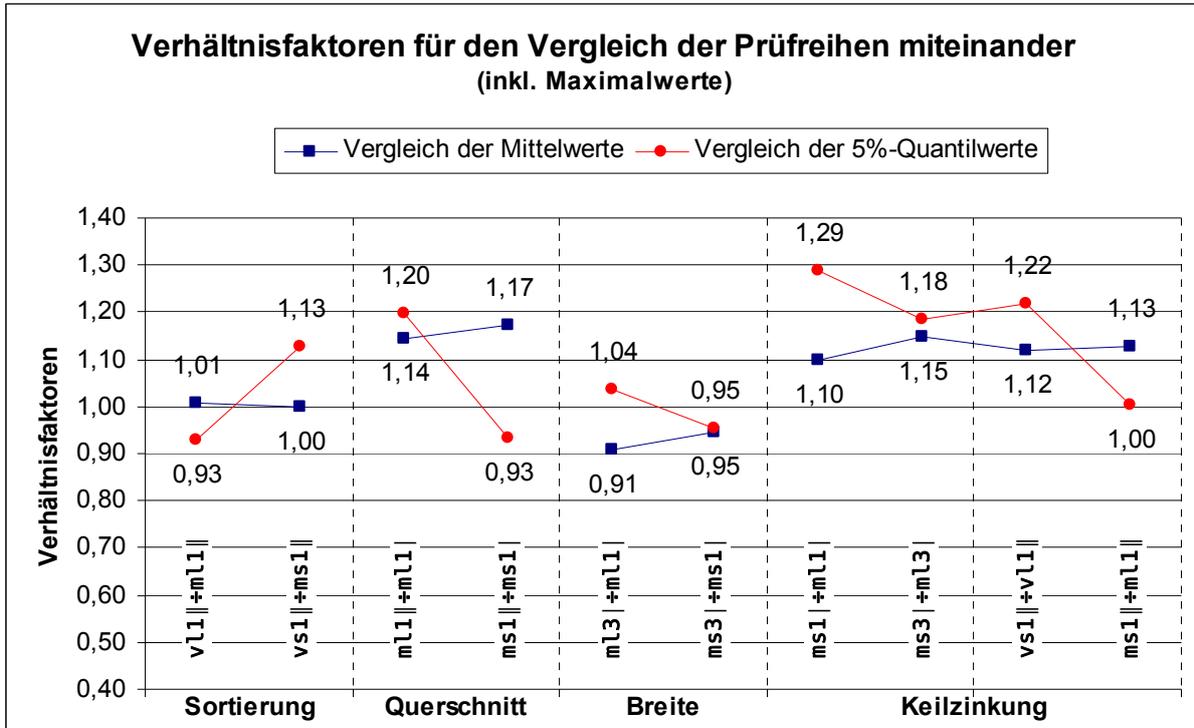


Diagramm F-77 Verhältnissfaktoren für den Vergleich der Prüfreihen miteinander der Prüfsreihe 2B.B (inkl. Maximalwerte)

### Anhang F.3 Tabellen und Diagramme der Versuchsserie 3B.B

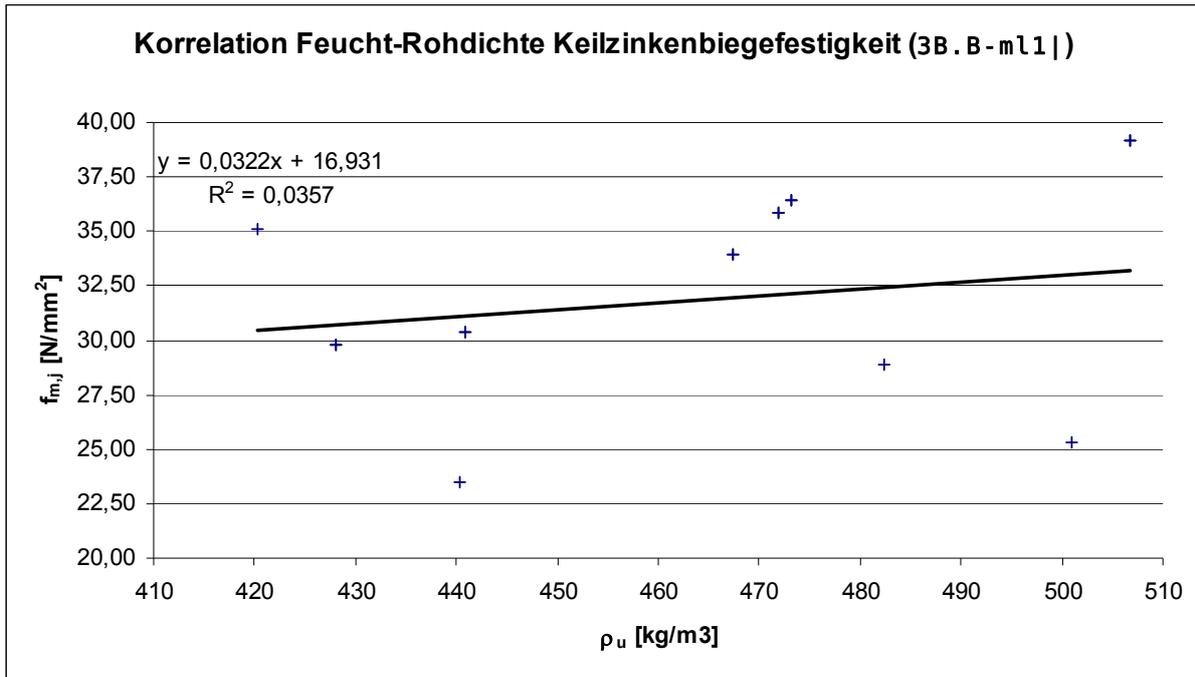


Diagramm F-78 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-m11|

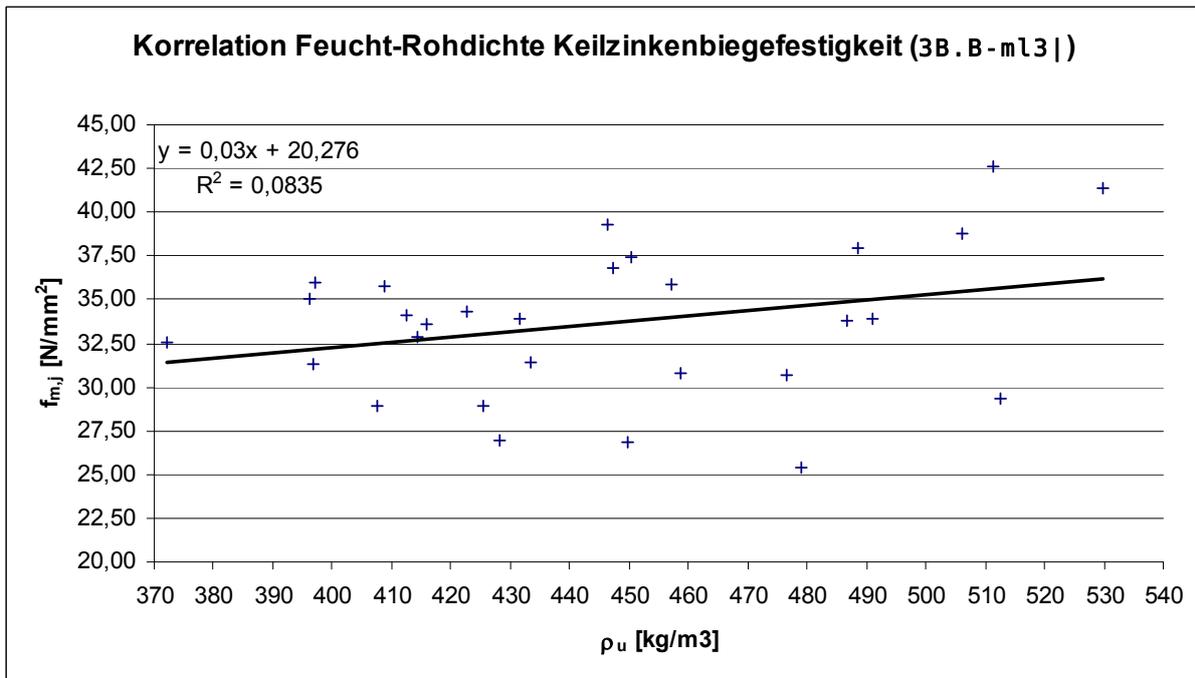
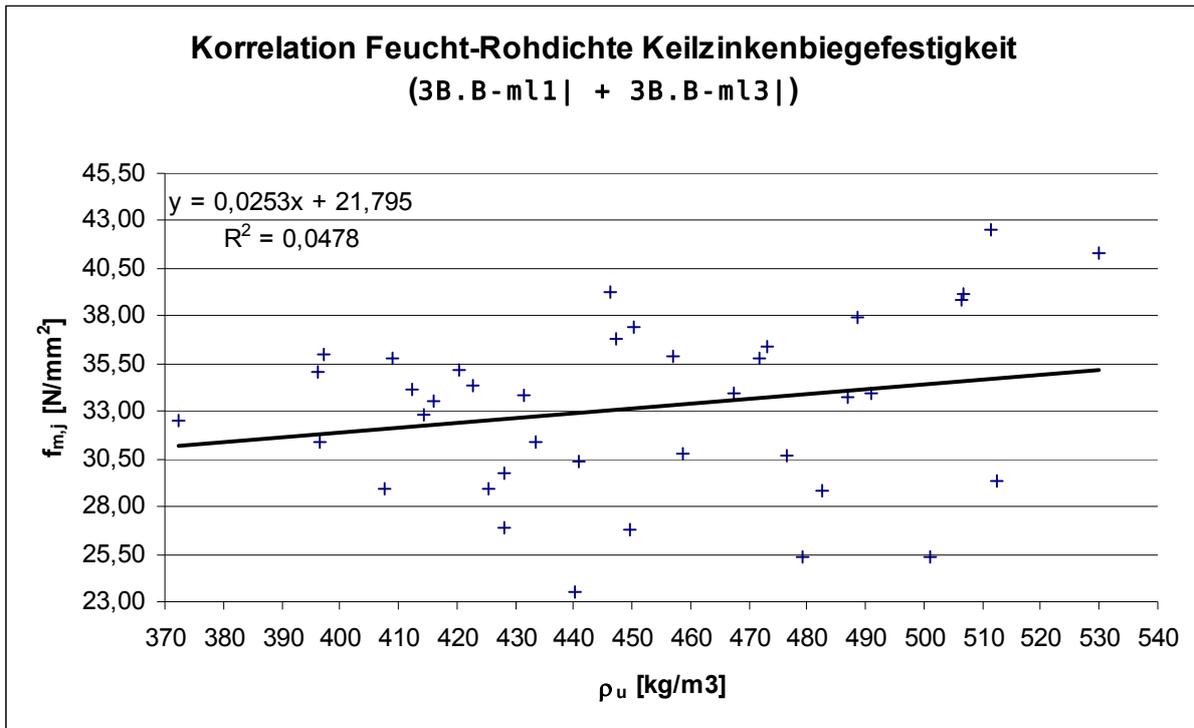
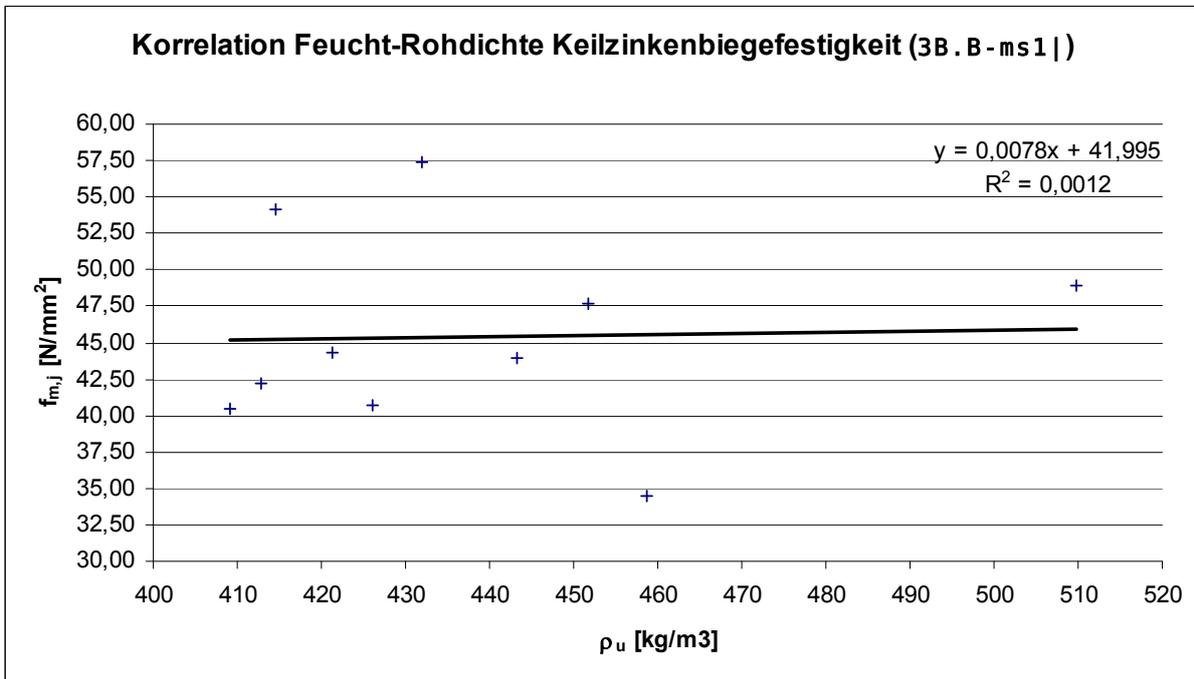


Diagramm F-79 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-m13|



**Diagramm F-80**    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-m11 | + 3B.B-m13 |



**Diagramm F-81**    Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-ms1 |

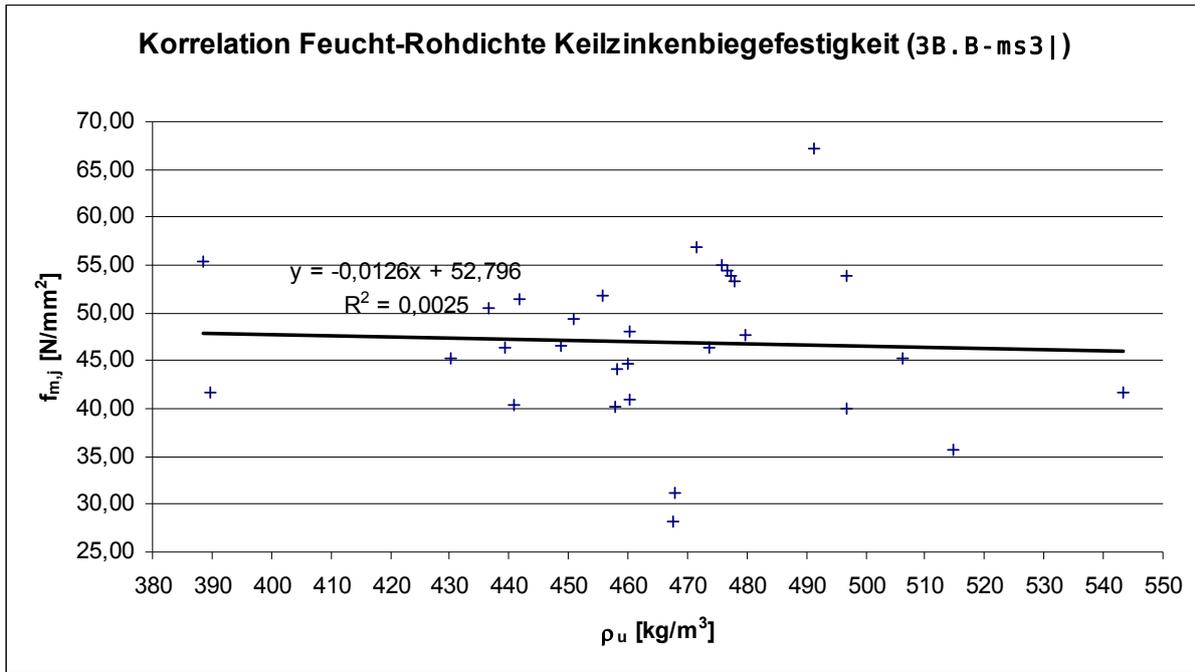


Diagramm F-82 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-ms3 |

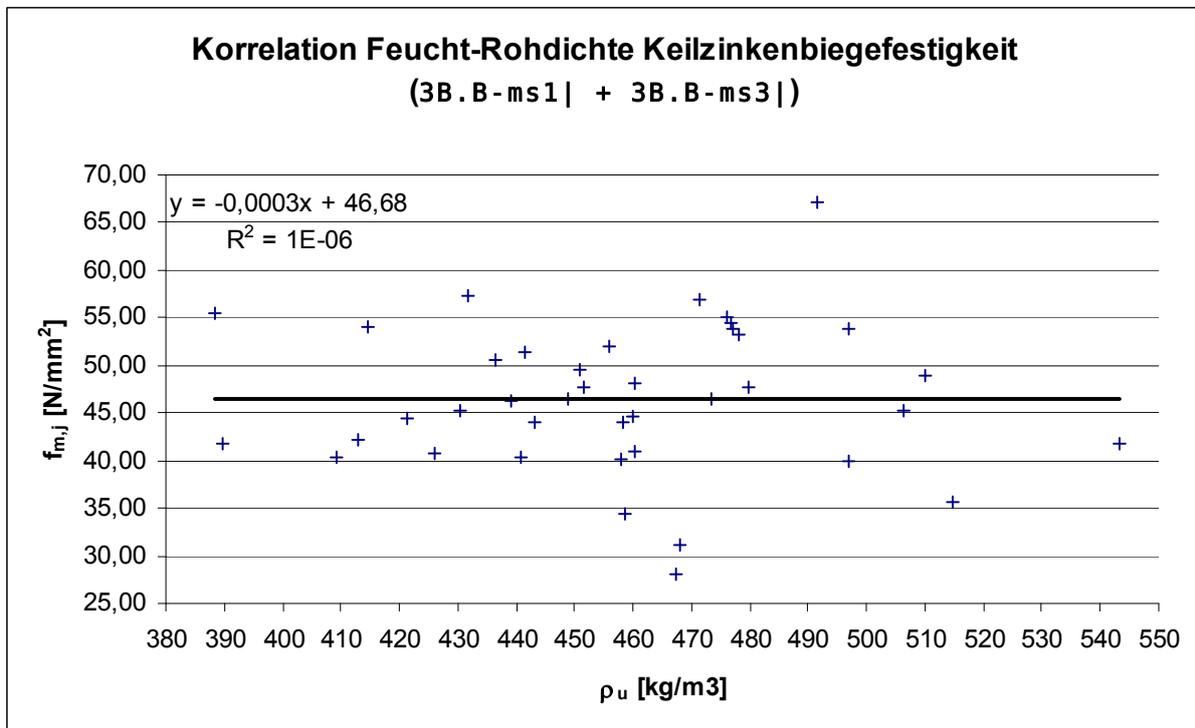
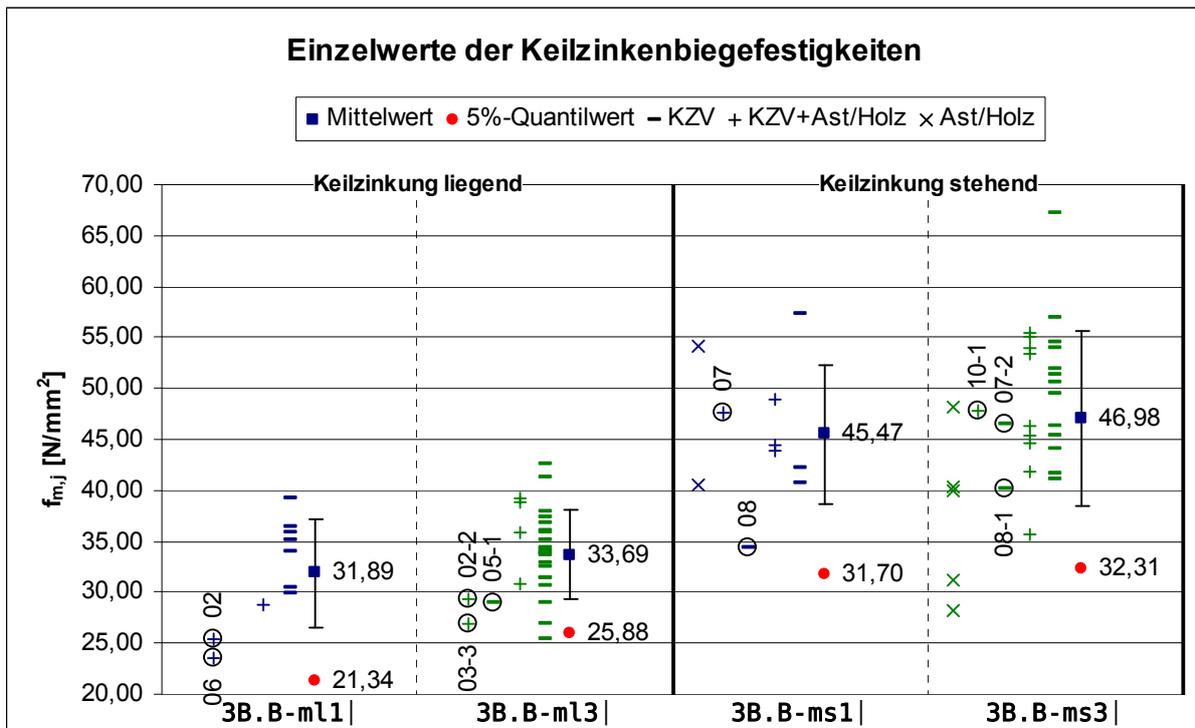


Diagramm F-83 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3B.B-ms1 | + 3B.B-ms3 |

**Tabelle F-35 Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in N/mm<sup>2</sup> der Prüferserie 3B.B (mit „Ausreißer“)**

Statistischer Wert	3B.B ml1	3B.B ml3	3B.B ms1	3B.B ms3
Anzahl n	10	29	10	30
Minimum $x_{\min}$	23,50	25,39	34,42	28,16
Maximum $x_{\max}$	39,15	42,56	57,34	67,17
Mittelwert $x_m$	31,89	33,69	45,47	46,98
Standardabweichung $s_x$	5,32	4,35	6,83	8,57
Variationskoeffizient $v_x$	16,7%	12,9%	15,0%	18,2%
Beiwert Anzahl $k_n$	2,338	1,986	2,338	1,979
5%-Quantilwert $x_{05}$	21,34	25,88	31,70	32,31



**Diagramm F-84 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3B.B (mit „Ausreißer“)**

## Anhang F.4 Tabellen und Diagramme der Versuchsserie 3K.B

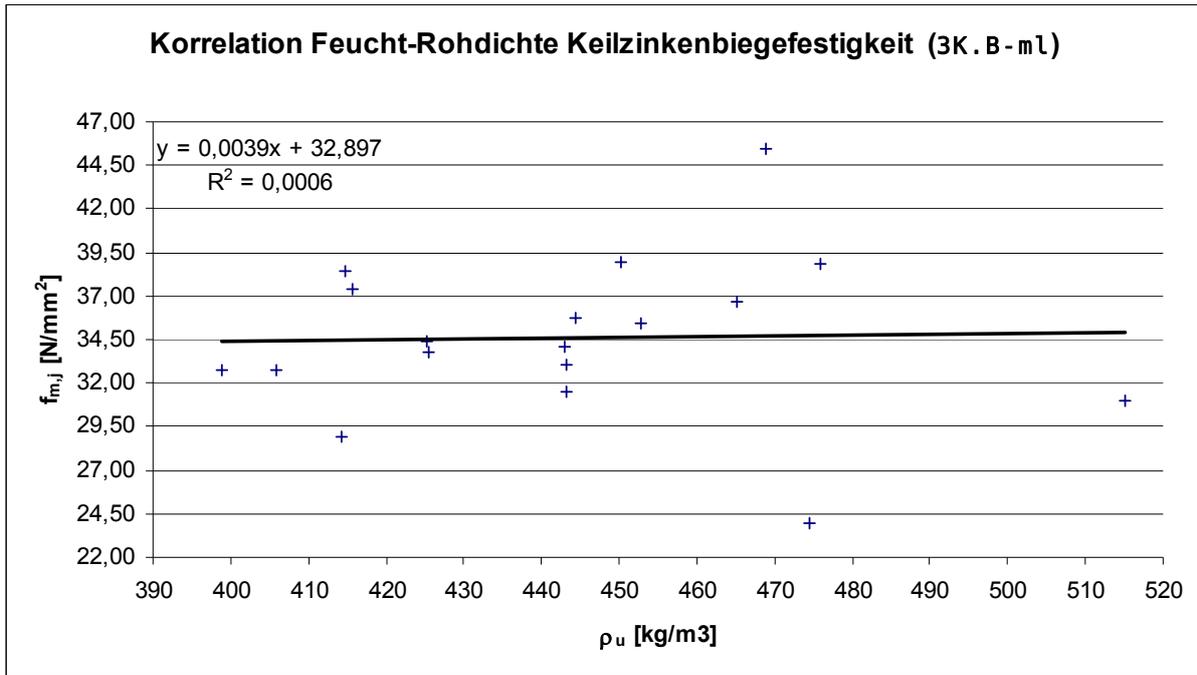


Diagramm F-85 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3K.B-mL

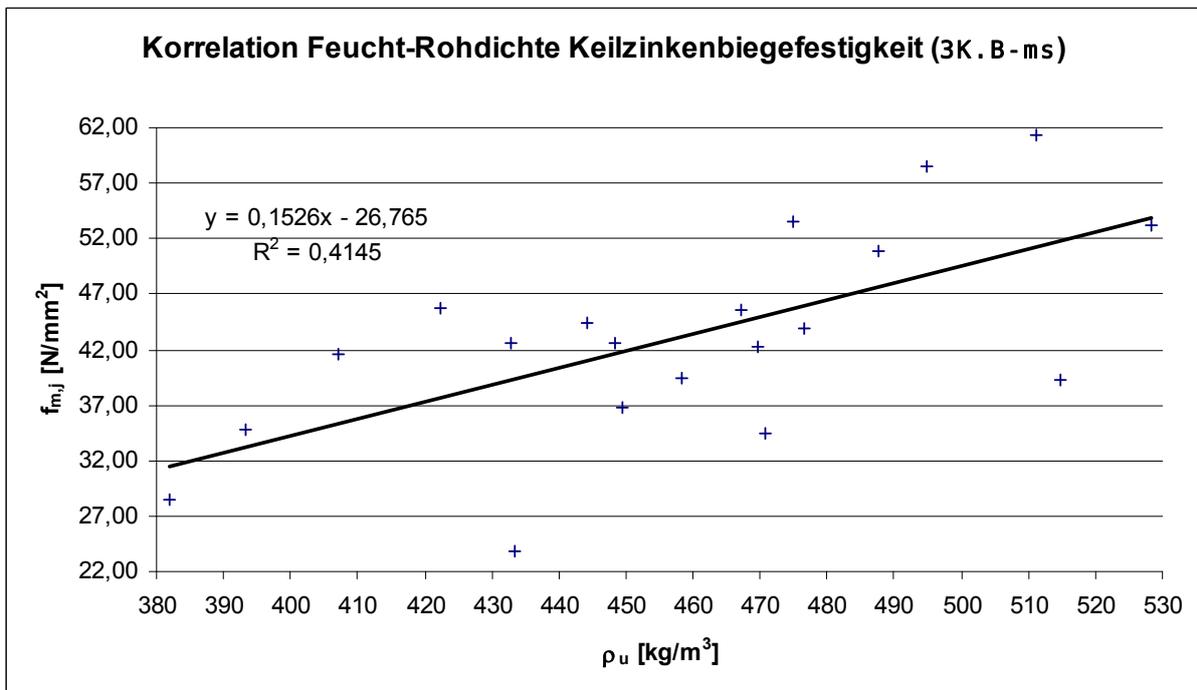
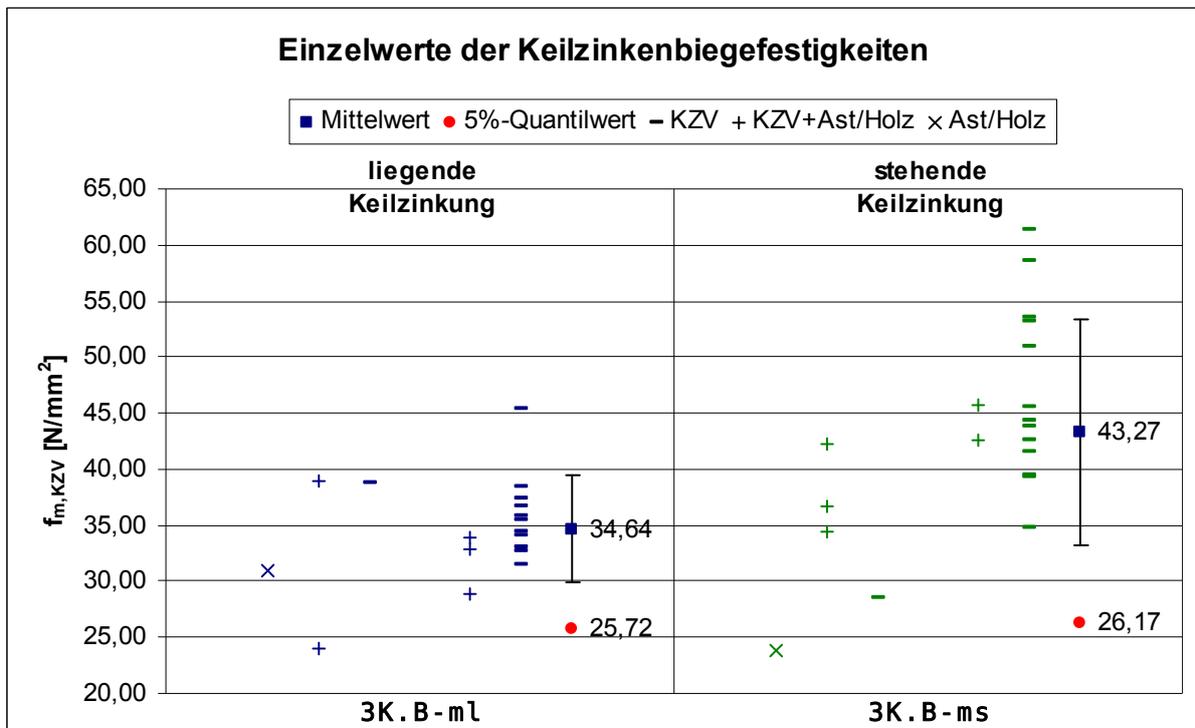


Diagramm F-86 Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Feucht-Rohdichte für die Prüfreihe 3K.B-ms

**Tabelle F-36** Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in  $\text{N/mm}^2$  der Prüferserie 3K.B (mit „Ausreißer“)

Statistischer Wert	3K.B ml	3K.B ms
Anzahl n	18	20
Minimum $x_{\min}$	23,98	23,74
Maximum $x_{\max}$	45,45	61,39
Mittelwert $x_m$	34,64	43,27
Standardabweichung $s_x$	4,77	10,07
Variationskoeffizient $v_x$	13,8%	23,3%
Beiwert Anzahl $k_{s,0841}$	2,105	2,074
5%-Quantilwert $x_{05}$	25,72	26,17



**Diagramm F-87** Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3K.B (mit „Ausreißer“)

## Anhang F.5 Tabellen und Diagramme der Versuchsserie 3K.Z

Tabelle F-37 Statistische Werte der Keilzinkenbiegefestigkeiten in  $\text{N/mm}^2$  der Prüferserie 3K.Z (mit „Ausreißer“)

Statistischer Wert	3K.Z ml	3K.Z ms
Anzahl n	18	20
Minimum $x_{\min}$	14,79	20,93
Maximum $x_{\max}$	33,45	35,10
Mittelwert $x_m$	24,46	27,66
Standardabweichung $s_x$	5,18	3,98
Variationskoeffizient $v_x$	21,2%	14,4%
Beiwert Anzahl $k_{s,0841}$	2,105	2,074
5%-Quantilwert $x_{05}$	15,40	20,34

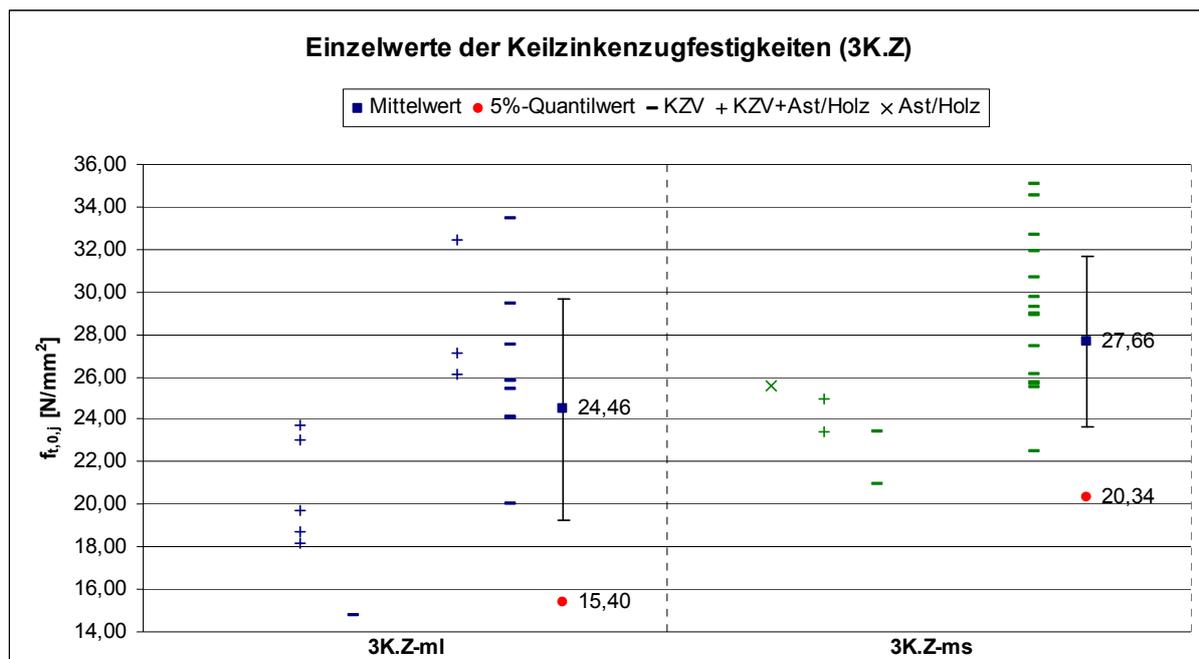


Diagramm F-88 Einzel-, Mittel- und 5%-Quantilwerte der Keilzinkenbiegefestigkeiten der Prüferserie 3K.Z (mit „Ausreißer“)