

**Berner Fachhochschule**

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB  
Burgdorf, Biel

Abteilung F+E

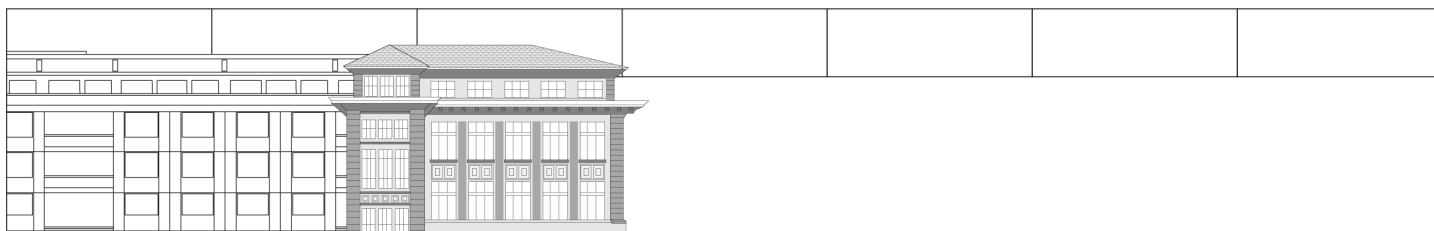
# Forschungsbericht

## Schlussbericht

Zugfestigkeit von BSH-Lamellen

Modul 3 und Modul 4

|                 |                                |
|-----------------|--------------------------------|
| Bericht Nr.     | 2631-SB-11                     |
| Auftrag Nr.     | 2631.HO                        |
| Klassifizierung | Gesperrt bis September 2006    |
| Gegenstand      | Zugfestigkeit von BSH-Lamellen |
| Datum           | 30.09.2004                     |



|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Auftraggeber                    | Stuber & Cie AG<br>Herr Andres Lüthi<br>Sägestrasse 22<br>CH-3054 Schüpfen   |
| Adresse der<br>Forschungsstelle | Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB<br>Abteilung F+E, Werkstoffe und Holztechnologie<br>Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel<br>Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391 |
| Verfasser                       | Isabel Engels  |
| Abteilungsleiter                | Marc-André Gonin   |
| Einheitsleiter                  | Dr. Frédéric Pichelin  |
| Projektverantwortlicher         | Dr. Christophe Sigrist   |

**HSB**  
**www.hsb.bfh.ch**



## ABSTRACT

### Ausgangslage

Gegenstand des Projekts "Zugfestigkeit von BSH Lamellen" ist die Qualitätssicherung der BSH-Produktion und die Feststellung der erzielten Lamellenqualität. Das Projekt ist in 2 Phasen aufgebaut, wovon die erste vorgängig abgeschlossen wurde. In der 1. Phase des Projektes ging es darum, die Sortierpraxis für jeden der 10 beteiligten Betriebe zu erfassen und zu beurteilen. Der 2. Teil der Untersuchungen befasste sich mit der Prüfung der Zugfestigkeiten von 495 BSH-Lamellen verschiedener Hersteller. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass in den Betrieben korrekt sortiert und verarbeitet wird, dass jedoch die von der Norm geforderte Zugfestigkeit der Einzellamellen nicht immer erreicht wird.

### Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist es, die Wirksamkeit der visuellen Sortierung von Lamellen nach DIN 4074 zur Produktion von BSH gemäss SIA 265 "Holzbau" zu überprüfen.

### Vorgehensweise

Die 495 Lamellen wurden auf ihre Zugfestigkeit geprüft und je Betrieb wurde die 5%-Fraktile errechnet, mit dem Ziel die Qualität der Lamellen der einzelnen Hersteller zu ermitteln. Zudem wurden die möglichen Zusammenhänge zwischen den erhaltenen Resultaten und den Eigenschaften der Lamellen geprüft. Zum Schluss wurden die Lamellen mit geringer Festigkeit visuell nachsortiert und eine Auswertung über die gesamte Stichprobe gemacht.

### Ergebnisse

Die Zugversuche an den BSH-Lamellen ergaben eher niedrige Zugfestigkeiten und eine mittlere Streuung über die Proben der Hersteller.

Der Zusammenhang verschiedener Sortiermerkmale mit der Zugfestigkeit der Lamellen lässt nach einer Auswertung der einzelnen Betriebe und der gesamten Stichprobe, folgende Aussagen zu:

- eine geringe Rohdichte, ein tiefer E-Modul und markante Abweichungen von der vorgeschriebenen Lamellenfeuchte während der Herstellung bedingen nicht unbedingt tiefe Festigkeitswerte,

- nur wenige der Lamellen mit zu geringer Zugfestigkeit können auf Grund visueller Kriterien (schlecht sortiert) eliminiert werden,
- die Zugfestigkeit der Lamellen ist unabhängig von ihrer Herkunft (Rohstofflieferant).

Bei einer visuellen Nachsortierung der Lamellen mit geringer Festigkeit kann gesagt werden, dass mit wenigen Ausnahmen korrekt visuell sortiert wurde, die Festigkeitswerte trotzdem unter den Anforderungen der SIA 265/1 liegen.

Als Hauptursache für die geringen Festigkeiten sind vor allem Äste, oder Astansammlungen in den Lamellen verantwortlich.

### Schlussfolgerung

Das Fazit der Untersuchung stellt sich wie folgt dar:

- Mit den Sortierkriterien der DIN 4074 sind die geforderten Lamellenqualitäten eventuell nicht zu erreichen.
- Es stellt sich die Frage, ob bei den geforderten Festigkeiten der SIA 265/1 an eine Einzellamelle die Systemwirkung im Verbund des BSH berücksichtigt wird.
- Möglicherweise entspricht die Modellannahme zur Bestimmung der zu erfüllenden Anforderungen an die Zugfestigkeit von  $14.5\text{N/mm}^2$  für eine Einzellamelle nicht realen Praxisbedingungen.

Aus diesen Gründen scheint es nach Abschluss des Projektes "Zugfestigkeit von BSH-Lamellen" sinnvoll, zusätzliche Untersuchungen an Lamellenpaketen, welche die "Gurte" von mittleren bis hohen BSH Trägern simulieren, durchzuführen. Zudem können theoretische Betrachtungen (Modelle) oder Bauteilversuche zu weiteren Erkenntnissen führen.

Keywords: BSH-Lamelle, Qualität, Zugfestigkeit, Zugversuche



**INHALTSÜBERSICHT**

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1</b>  | <b>AUSGANGSLAGE</b>                              | <b>3</b>  |
| <b>2</b>  | <b>ZIELSETZUNGEN DER MODULE 3 UND 4</b>          | <b>4</b>  |
| <b>3</b>  | <b>VORGEHENSWEISE</b>                            | <b>4</b>  |
| <b>4</b>  | <b>PROJEKTBETEILIGTE</b>                         | <b>5</b>  |
| <b>5</b>  | <b>ZUGVERSUCHE AN BSH LAMELLEN</b>               | <b>6</b>  |
| <b>6</b>  | <b>STATISTISCHE AUSWERTUNG</b>                   | <b>14</b> |
| <b>7</b>  | <b>ERGEBNISSE DER ZUGVERSUCHE</b>                | <b>15</b> |
| <b>8</b>  | <b>EINZELAUSWERTUNG DER DATEN DER FIRMEN</b>     | <b>27</b> |
| <b>9</b>  | <b>SCHLUSSFOLGERUNGEN DER GESAMTAUSWERTUNG</b>   | <b>28</b> |
| <b>10</b> | <b>BESTIMMUNGEN ZU DIESEM FORSCHUNGSBERICHT</b>  | <b>30</b> |
| <b>11</b> | <b>VERZEICHNISSE</b>                             | <b>31</b> |
|           | <b>ANHANG A: DATA SHEET</b>                      | <b>35</b> |
|           | <b>ANHANG B: EINZELAUSWERTUNGEN DER BETRIEBE</b> | <b>37</b> |
|           | <b>ANHANG C: LAMELLEN-AUSWAHLVERFAHREN</b>       | <b>39</b> |

## INHALTSVERZEICHNIS

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>AUSGANGSLAGE</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1  | Ausgangslage für das Gesamtprojekt.....                                | 3         |
| 1.2  | Ausgangslage für die Module 3 und 4.....                               | 3         |
| <b>2</b>   | <b>ZIELSETZUNGEN DER MODULE 3 UND 4</b>                                | <b>4</b>  |
| <b>3</b>   | <b>VORGEHENSWEISE</b>  | <b>4</b>  |
| 3.1  | Bestimmung der Zugeigenschaften von BSH Lamellen (Modul 3) .....       | 4         |
| 3.2  | Umsetzung und Anpassung im Betrieb, Normvergleich (Modul 4) .....      | 4         |
| <b>4</b>   | <b>PROJEKTBETEILIGTE</b>   | <b>5</b>  |
| <b>5</b>   | <b>ZUGVERSUCHE AN BSH LAMELLEN</b>                                     | <b>6</b>  |
| 5.1  | Grundlagen der Versuchsdurchführung.....                               | 6         |
| 5.1.1  | Laboreinrichtungen .....   | 6         |
| 5.1.2  | Versuchskörper .....   | 6         |
| 5.1.3  | Anforderungen seitens der Norm .....                                   | 7         |
| 5.2  | Versuchsablauf .....   | 8         |
| 5.3  | Durchführung der Zugversuche.....                                      | 11        |
| 5.3.1  | Vorbereiten der Lamelle .....  | 11        |
| 5.3.2  | Versuchsablauf.....  | 12        |
| 5.3.3  | Dokumentation der Versuchsdurchführung .....                           | 13        |
| <b>6</b>   | <b>STATISTISCHE AUSWERTUNG</b>   | <b>14</b> |
| 6.1  | Grundlage .....  | 14        |
| <b>7</b>   | <b>ERGEBNISSE DER ZUGVERSUCHE</b>                                      | <b>15</b> |
| 7.1  | Auswertung der gesamten Stichprobe .....                               | 15        |
| 7.2  | Auswertung der Prüfergebnisse der Lamellen $< 14,5\text{N/mm}^2$ ..... | 20        |
| 7.2.1  | Vergleich Feuchtegehalt und Bruchspannung .....                        | 20        |
| 7.2.2  | Vergleich Dichte und Bruchspannung .....                               | 20        |
| 7.2.3  | Vergleich statischer E-Modul und Bruchfestigkeit.....                  | 21        |
| 7.3  | Nachsortierung der Lamelle an Hand der DIN 4074 .....                  | 22        |
| 7.4  | Vergleich der Betriebe.....  | 24        |
| <b>8</b>   | <b>EINZELAUSWERTUNG DER DATEN DER FIRMEN</b>                           | <b>27</b> |
| <b>9</b>   | <b>SCHLUSSFOLGERUNGEN DER GESAMTAUSWERTUNG</b>                         | <b>28</b> |
| 9.1  | Zusammenfassung.....   | 28        |
| 9.2  | Fazit .....  | 28        |
| 9.3  | Weiteres Vorgehen.....   | 29        |
| <b>10</b>  | <b>BESTIMMUNGEN ZU DIESEM FORSCHUNGSBERICHT</b>                        | <b>30</b> |
| 10.1   | Umfang des Forschungsberichtes.....                                    | 30        |
| <b>11</b>  | <b>VERZEICHNISSE</b>   | <b>31</b> |
| 11.1   | Tabellenverzeichnis .....  | 31        |
| 11.2   | Abbildungsverzeichnis.....   | 31        |
| 11.3   | Diagrammverzeichnis .....  | 31        |
| 11.4   | Literaturverzeichnis .....   | 32        |
| <b>ANHANG A: DATA SHEET</b>                      |  | <b>35</b> |
| <b>ANHANG B: EINZELAUSWERTUNGEN DER BETRIEBE</b> |  | <b>37</b> |
| <b>ANHANG C: LAMELLEN-AUSWAHLVERFAHREN</b>       |  | <b>39</b> |

## 1 Ausgangslage

Das Projekt "Zugfestigkeit von BSH Lamellen" ist auf vier Modulen aufgebaut.

- **Modul 1:** Bestimmen des statistisch signifikanten Untersuchungsumfangs für die einzelnen Betriebe und die gesamte Schweiz
- **Modul 2:** Erfassen der Sortierpraxis in den Betrieben, Probenentnahme
- **Modul 3:** Bestimmung der Zugeigenschaften der BSH Lamellen mittels Versuch
- **Modul 4:** Vergleich mit der Norm, Umsetzung und Anpassung im Betrieb

### 1.1 Ausgangslage für das Gesamtprojekt

Die Norm SIA 265 legt die Festigkeits- und Steifigkeitswerte von normalem BSH (visuell und maschinell sortierte Lamellen) und hochwertigem BSH (maschinell sortierte Lamellen) fest. Die Norm legt ebenso fest, dass die Produktion von Brettschichtholz eine fremdkontrollierte Eigenüberwachung der Betriebe, entsprechend den Richtlinien der SFH, bedingt. Vorausgesetzt wird gemäss der Definition von Qualität und Qualitätssicherung, dass die Betriebe die festgelegten Mindestanforderungen erfüllen und für deren Einhaltung verantwortlich sind. In der Norm sind keine Sortierparameter für Lamellen zur Erzeugung von BSH mehr festgelegt, die erforderlichen mechanischen Eigenschaften von Lamellen und Längsverbindungen sind jedoch klar vorgegeben. Sortiert wird in den Betrieben heute nach den Sortierkriterien der DIN 4074, da keine entsprechende SIA Norm vorliegt.

Unklar ist:

- ob die Sortiertätigkeit in den BSH Betrieben richtig durchgeführt wird,
- nach welchen Kriterien primär sortiert wird,
- ob das Kappen der in der DIN aufgeführten Strukturfehler zur gewünschten, visuellen Lamellenqualität führt,
- ob die Sortiergrenzen richtig sind,
- ob die visuelle Lamellenqualität die verlangten Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaft zur Folge hat.

Die Sortierpraktiken sind in allen Schweizer Betrieben identisch und bewähren sich. Unklar ist einzig, ob die statischen Anforderungen an die Lamellen erreicht werden oder nicht.

Es soll nun aufgezeigt werden, dass die in den Betrieben umgesetzte Sortierpraxis passt, und dass Lamellen der gewünschten Festigkeit zur Erzeugung von BSH produziert werden können. Da die Richtlinien zur Herstellung von BSH bestehen und von den Mitgliedern berücksichtigt werden, wird auf den Stand der Herstellung dieses Materials zurückgegriffen. Versucht wird:

- eine genügend grosse Anzahl Betriebe in die Untersuchung einzubinden,
- Schweizerholz und importierte Lamellen zu untersuchen,
- dem Markt entsprechende Lamellenqualität und Abmessungen zu erfassen,
- für einzelne Betriebe statistisch ausreichende Stichproben zu prüfen,
- gesamtschweizerisch die Lamellenproduktion statistisch richtig zu erfassen,
- die Sortierpraxis zu überprüfen und
- mittels Zugversuch die Lamellenfestigkeit und Steifigkeit zu ermitteln.

### 1.2 Ausgangslage für die Module 3 und 4

Die Module 1 und 2 wurden vorgängig abgeschlossen und ihre Ergebnisse in Berichten zusammengestellt. Das Ergebnis stellt sich wie folgt kurz dar:

Die Sortierpraxis von 10 Schweizer Brettschichtholzherstellern ist erfasst und beurteilt worden. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass in den Betrieben weitestgehend richtig und normgemäss sortiert wird. Astansammlungen und Einzeläste sind die häufigste Ursache für das Herausschneiden von Abschnitten. Durch die visuelle Sortierung im Durchlaufverfahren ist es nicht einfach, die Sortierkriterien immer genau einzuschätzen und zu kennzeichnen. Daraus ergaben sich teilweise für die klassierten BSH Lamellen bei der Nachsortierung geringere Festigkeitsklassen als nach DIN 4074 gefordert.

Auf der Grundlage dieser beiden Module wurden die Module 3 und 4 aufgebaut und ausgewertet.

## **2 Zielsetzungen der Module 3 und 4**

Ziel dieser Untersuchungen war, die Qualität der Einzellamellen der einzelnen Hersteller zu ermitteln. Weiterhin ist eine Einordnung der Lamellenqualität der einzelnen Betriebe an Hand der SIA 265/1: "Holzbau - ergänzende Festlegungen" vorzunehmen. Die Lamellen wurden von 9 verschiedenen BSH - Herstellern aus der Schweiz zur Verfügung gestellt. Die BSH-Lamellen wurden auf ihre Zugfestigkeit bis zum Bruch getestet. Ein Betrieb konnte auf Grund eines Brandes nicht in diese Untersuchung einbezogen werden.

Die Ergebnisse dieser Versuche wurden anschliessend statistisch ausgewertet, charakteristische Eigenschaften und die Streuung der Zugfestigkeit der verschiedenen Lamellen ermittelt. Die möglichen Zusammenhänge zwischen den erhaltenen Zugfestigkeiten und den Eigenschaften der Lamellen wurden geprüft. Die Ergebnisse zeigen den Firmen mögliche Schwachstellen auf und ermöglichen eine Verbesserung der Produktion und Sortierung ihrer Lamellen, falls notwendig kann dadurch die Qualität des Brettschichtholzes verbessert werden.

## **3 Vorgehensweise**

### **3.1 Bestimmung der Zugeigenschaften von BSH Lamellen (Modul 3)**

Für das Modul 3 wird den Betrieben angegeben, wie sie eine Stichprobe von BSH Lamellen aus dem laufenden Arbeitsprozess entnehmen müssen. Von diesen Lamellen werden die Parameter Rohdichte, Dimension, Feuchtigkeit und der statische E-Modul aufgenommen. Zwecks Nachvollziehbarkeit werden die visuellen Merkmale für jede Lamelle photographisch festgehalten. Die einzelnen Lamellen werden anschliessend geprüft, die Zugfestigkeit und der Zugmodul bestimmt. Alle Ergebnisse werden statistisch ausgewertet.

### **3.2 Umsetzung und Anpassung im Betrieb, Normvergleich (Modul 4)**

Zusätzlich zur statistischen Auswertung der Daten der einzelnen Betriebe werden die Daten nach Lamellenqualität, Abmessung und Herkunft untersucht. Die Schlussfolgerungen daraus werden mit Vorschlägen zum weiteren Vorgehen kombiniert und den Betrieben kommuniziert.



## 4 Projektbeteiligte

### AG Kämpf

Suhrhardweg 9  
CH-5102 Rapperswil  
Tel: 062/8891600

### Ansprechpartner:

Tobias Kämpf  
t.kaempf@kaempf.ch  
FAX: 062/8891601

### Ducret Orges SA

CH-1430 Orges  
Tel: 024/445 12 32

### Ansprechpartner:

Jean-Marc Ducret  
ducret@ducret-orges.ch  
FAX: 024/445 52 28

### Neue Holzbau AG

Obseestrasse 11  
CH-6078 Lungern  
Tel: 041/679 70 80

### Ansprechpartner:

Andreas Windisch  
windisch.andreas@nh-lungern.ch  
FAX: 041/679 70 59

### Peter Holzbau AG

CH-3638 Blumenstein  
Tel: 033/359 50 20

### Ansprechpartner:

Werner Peter  
info@peterholzbauag.ch  
FAX: 033/359 50 29

### Roth Holzleimbau und Stahlbau AG

Industrie Buchmatt  
CH-3400 Burgdorf  
Tel: 034/429 20 20

### Ansprechpartner:

Franz Lehnerr  
info@rothburgdorf.ch  
FAX: 034/429 20 20

### Schilliger Holz AG

Haltikon  
CH-6403 Küssnacht  
Tel: 041/854 08 00

### Ansprechpartner:

Ernest Schilliger  
info@schilliger.ch  
FAX: 041/854 08 01

### Stuber & Cie AG

Sägestrasse 22  
CH-3054 Schüpfen  
Tel: 031/879 59 66

### Ansprechpartner:

Andreas Lüthi  
a.luethi@stuber-holz.ch  
FAX: 031/879 59 67

### Urs Hüsler

Oberebenestrasse 22  
CH-5620 Bremgarten  
Tel: 056/633 14 34

### Ansprechpartner:

Andreas Dietz  
Holzleimbau@Huesser.com  
FAX: 056/633 15 43

### Vial SA Charpentes

Case postale 48  
CH-1724 Le Mouret  
Tel: 026/413 94 13

### Ansprechpartner:

Michael Kropf  
vial.charpentes@bluewin.ch  
FAX: 026/413 94 10

### Zöllig Holzleimbau AG

St. Gallerstrasse 34  
CH-9320 Arbon  
Tel: 071/447 20 40

### Ansprechpartner:

Andreas Dettwiler  
info@zollig.ch  
FAX: 071/446 86 50

## 5 Zugversuche an BSH Lamellen

### 5.1 Grundlagen der Versuchsdurchführung

#### 5.1.1 Laboreinrichtungen

Folgende Geräte wurden zur Durchführung der Untersuchungen eingesetzt.

*Tabelle 1: Verwendete Laboreinrichtungen*

| Einrichtung          | Maschinenangaben        | interne Maschinennummer |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Feuchtemessgerät     | H-DI 3.10 Best/Bollmann | -                       |
| Waage                | Mettler PE 22           | 2.36.4012.0202          |
| Ultraschallmessgerät | Silvatest Duo           | -                       |
| Zugprüfmaschine      |                         | Hönggerberg ETH Zürich  |

#### 5.1.2 Versuchskörper

Die Lamellen die von den verschiedenen Herstellern geliefert wurden, hatten folgende Eigenschaften aufzuweisen:

*Tabelle 2: Eigenschaften der Versuchskörper je Betrieb*

| Proben/ Art         | Eigenschaften   |
|---------------------|---|
| Anzahl              | 55 Lamellen   |
| Dimension           | 160 x 40 mm   |
| Länge               | 3000 mm   |
| Qualität            | S10   |
| Holzart             | Fichte  |
| Keilzinken          | zufällig angeordnet   |
| Herkunft der Proben | durch Hersteller anzugeben → lokaler oder ausländischer Lieferant |



*Abbildung 1: Lamellenstapel bereit zur Prüfung*

Die Auswahl der Lamellen wurde, gemäss genauer Vorgabe, von den Betrieben selbstständig mit wenig Eingreifen der HSB durchgeführt. Der Auswahlprozess ist hier dargestellt. Die Entnahme musste folgenden Anforderungen genügen:

- Lamellen sind einzeln und zufällig zu entnehmen,
- Lamellen sind an verschiedenen Daten zu entnehmen,
- die Entnahme darf nicht kontrolliert und korrigiert werden,
- verschiedene Lamellenlieferanten sind anteilmässig zu berücksichtigen,
- wenn möglich sollte die Entnahme durch verschiedene Sortierer erfolgen.

Die exakte Vorgehensweise ist im Dokument im Anhang C: dargestellt. Die Entnahme der Lamellen erfolgte nach dem automatisierten Herstellungsprozess, wie im vereinfachten Flussdiagramm des BSH-Herstellung dargestellt.

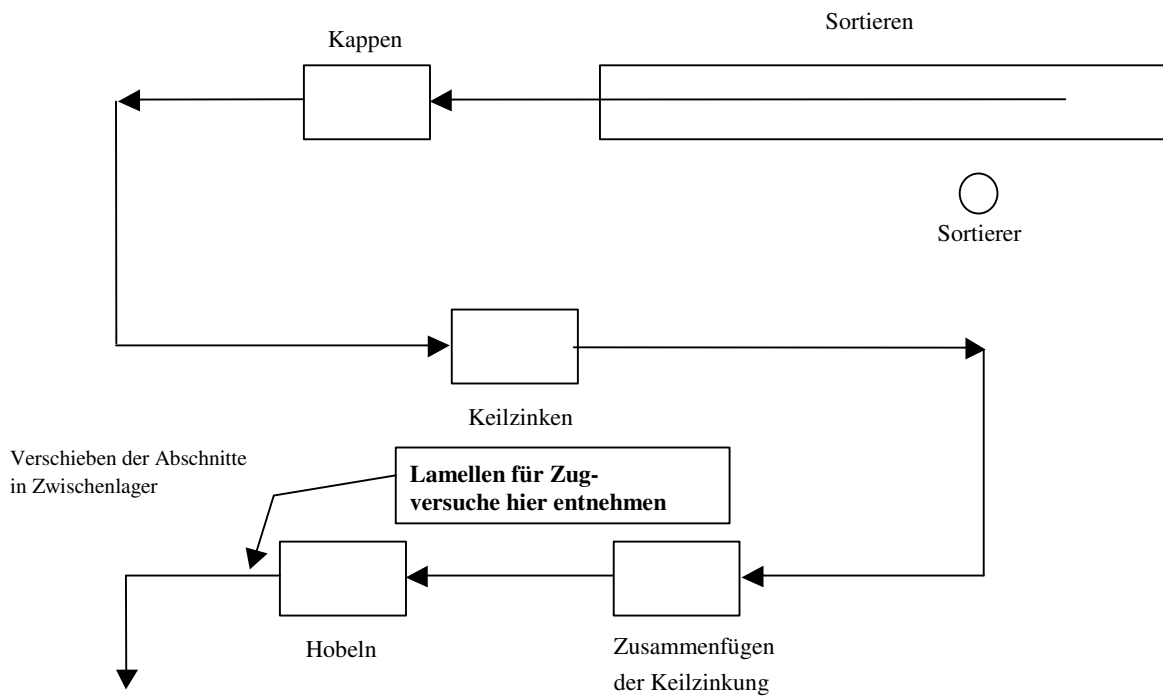


Abbildung 2: Flussdiagramm der Lamellenherstellung

Um einer Verfälschung der Probeentnahme durch den Sortierer möglichst entgegenzuwirken, wurde die Herstellung der Prüflamelle für die Zugversuche in die Tagesproduktion eingebaut.

### 5.1.3 Anforderungen seitens der Norm

Die Tabelle 11 der SIA 265/1 führt die charakteristische Zugfestigkeit und Steifigkeitsanforderung der Lamellen sowie der Keilzinkenstöße in N/mm<sup>2</sup> in Abhängigkeit der Holzqualität auf.

Tabelle 3: Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen an BSH Lamellen [Tabelle 11, SIA 265/1]

| Bezeichnung der Lamellen   | T11 | T14.5 | T18 | T22 <sup>3)</sup> | T26 <sup>3)</sup> |
|--|-----|-------|-----|-------------------|-------------------|
| Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> $f_{t,0,l,k}$ <sup>1)</sup>   | 11  | 14,5  | 18  | 22                | 26                |
| Mittlerer Zug-E-Modul in kN/mm <sup>2</sup> $E_{t,0,mean}$   | 9   | 11    | 12  | 13                | 14                |
| Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit der Keilzinkenstöße in N/mm <sup>2</sup> $f_{t,j,k}$ <sup>2)</sup>   | 16  | 20    | 23  | 27                | 31                |
| <sup>1)</sup> bestimmt für den vollen Brettquerschnitt und über eine freie Länge von 2000 mm<br><sup>2)</sup> bestimmt für den vollen Stossquerschnitt über eine freie Länge von $\geq 200$ mm<br><sup>3)</sup> Erhältlichkeit abklären (bedingt maschinelle Sortierung) |     |       |     |                   |                   |

Die Untersuchungen an dieser Stelle beschränken sich auf T14.5 Lamellen. Wie aus Tabelle ersichtlich ist, müssen 95% der Lamellen dieser Festigkeitsklasse eine charakteristische Zugfestigkeit von 14,5 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Im Bereich der Keilzinkenstöße muss die Zugfestigkeit 20 N/mm<sup>2</sup> erreichen, damit die Anforderungen der Norm erfüllt sind.

## 5.2 Versuchsablauf

Vor dem Zugversuch wurde jede Lamelle eingehend untersucht, die erforderlichen Parameter aufgenommen und in einem Datenblatt festgehalten. Folgende Parameter wurden festgelegt / aufgenommen:

- Lamellennummer,
- Elastizitätsmodul (statisch und dynamisch),
- Dimension,
- Holzfehler: fotografisch, um eine visuelle Klassierung im Rahmen weiterer Untersuchungen nach DIN 4074 zu ermöglichen<sup>1</sup>,
- Feuchtigkeitsgehalt,
- Gewicht → Dichte,
- Lieferant, Herkunft.

Wichtigstes Blatt bezüglich der Auswertung ist das Blatt "data sheet" der Exceldatei "Test Results". Es enthält die Zusammenfassung aller Daten. Teilweise sind dies berechnete Daten (E-Modul dynamisch, Dehnung) oder Messdaten (Dimension, maximale Kräfte) aus der Untersuchung. Die einzelnen Parameter werden im folgenden erklärt und allenfalls die Berechnungsformel aufgezeigt.

Tabelle 4: Beispiel der aufgenommenen Lamellenparameter

| Lamellennummer                           | XY   | Bemerkung  |
|--|--|--|
| dynamischer E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ] | 13000  | aus Ultraschallmessung   |
| Zug - E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]       | wird mittels Last-Deformation Diagramm berechnet |  |
| Masse [g]                                | 8'190  | Waage und Metermass zur Berechnung der Dichte                                      |
| Länge [mm]                               | 3'045  |  |
| Breite [mm]                              | 160  |  |
| Dicke [mm]                               | 40   |  |
| Holzfeuchte Ende 1 [%]                   | 11.4   | Feuchtemessgerät   |
| Holzfeuchte Ende 2 [%]                   | 12.3   |  |
| Durchschnittliche Holzfeuchte [%]        | 11.9   | höhere Genauigkeit bei Schwankungen über die Lamellenlänge                         |
| Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]    | 447  | aus Gewicht und Volumen wird die Dichte bei der vorliegenden Holzfeuchte berechnet |
| Lieferant                                | Mustermann                                       | vom Hersteller anzugeben   |

### Fotos - Kennzeichnung zur Identifikation

Für weitere Forschungsprojekte, sowie zur Auswertung der Resultate wurden 4 Fotos jeder einzelnen Lamelle angefertigt. Jeder fotografierte Abschnitt wurde wie folgt bezeichnet:

- Anfangsbuchstabe des Herstellers,
- Nummer der Lamelle,
- Seite der Lamelle (Splint oder Mark),
- Abschnitt der Lamelle (4 insgesamt, 2 auf jeder Seite).

<sup>1</sup> Datenbank mit den Fotos vor den Versuchen als DVD dem Bericht beigelegt

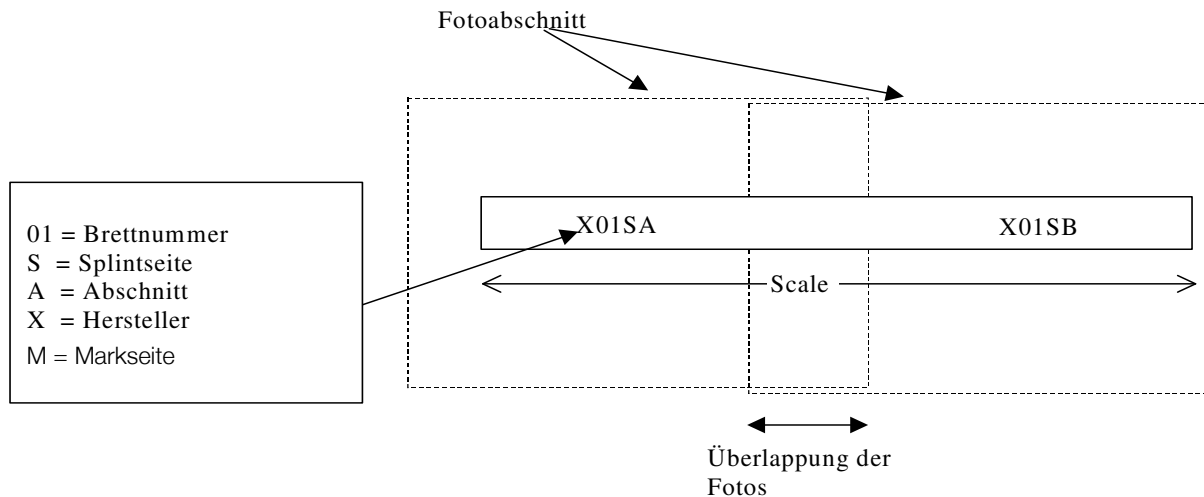


Abbildung 3: Layout des Fotoprozesses

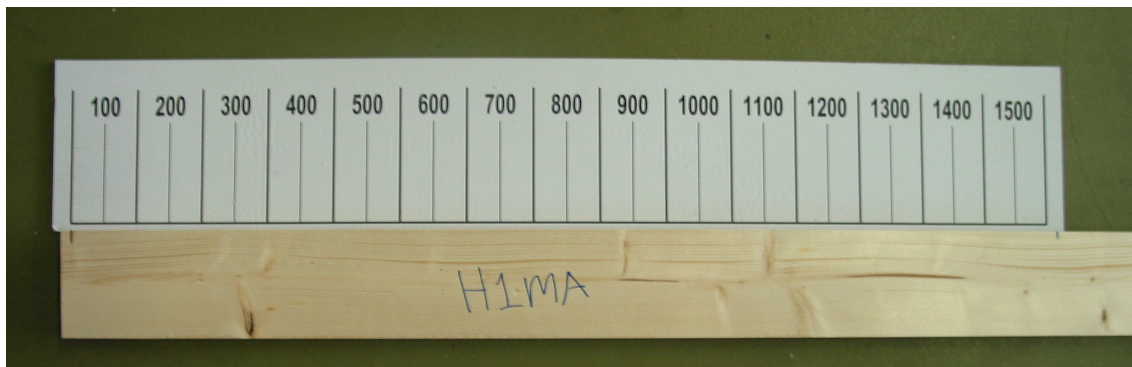


Abbildung 4: Beispiel der Beschriftung der Lamellen

### Feuchtigkeitsgehalt

Der mittlere Feuchtigkeitsgehalt wurde aus 2 Werten, gemessen an jedem Ende der Lamelle, ermittelt. Dazu wurde das Holzfeuchtemessgerät H-DI 3.10 (Best/Bollmann) verwendet. Der dynamische E-Modul wurde über die entsprechenden Umrechnungsformeln auf eine Ausgleichsfeuchte von  $u=12\%$  umgerechnet. Die Dichte wurde nicht auf die üblichen  $u=12\%$  umgerechnet, da diese Genauigkeit im Rahmen dieser Untersuchung nicht erforderlich ist.

### Silvatest - Bestimmung des dynamischen E-Moduls

Mittels Ultraschallmessung (Silvatest) wurde der dynamische Elastizitätsmodul (siehe :Data Sheet/ E-Dynamic) für jede einzelne Lamelle bestimmt. Mit einem kleinen Bohrer wurden Löcher in die Stirnseiten der Lamellen gebohrt, so dass anschliessend eine Person alleine die Messung durchführen konnte.

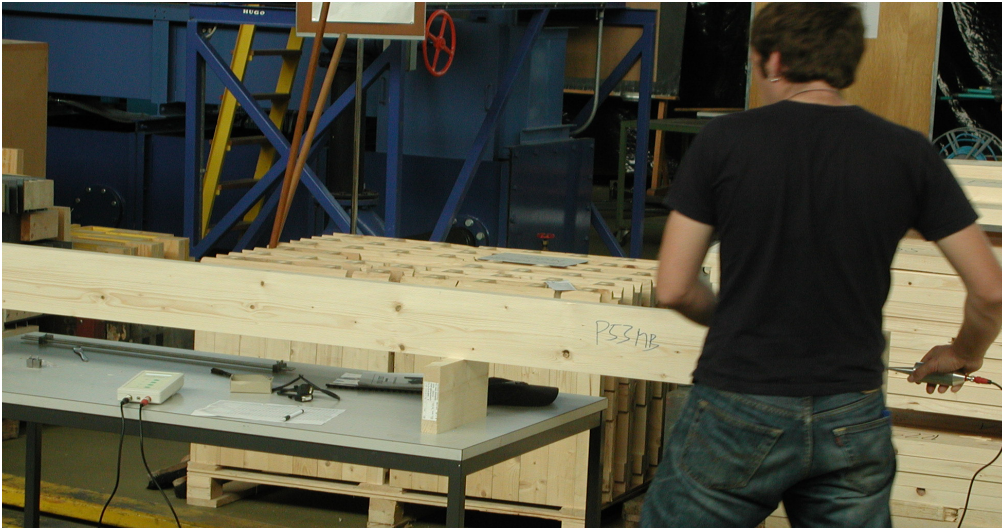


Abbildung 5: Bestimmen des dynamischen E-Moduls mittels Ultraschallmessung

Die Ultraschallgeschwindigkeit wird wie folgt auf die Einheitsfeuchte von 12% umgerechnet:

Gleichung 1: Feuchte grösser als 30%

$$v_{\text{ultra, u=12\%}} = v_{\text{ultra, grün}} + 2.5 \cdot (u_{\text{grün}} - 30) + 594$$

Gleichung 2: Feuchte kleiner als 30%

$$v_{\text{ultra, u=12\%}} = v_{\text{ultra, grün}} + 33 \cdot (u_{\text{grün}} - 12)$$

Der Wert für den dynamischen E-Modul für Bretter (Sawings), sowie deren Festigkeitsklassierung, kann der berechneten Ultraschallgeschwindigkeit entsprechend aus der untenstehenden Tabelle 5 entnommen werden:

Tabelle 5: Festigkeitssortierung mittels Ultraschallgeschwindigkeit

| <b>Speeds with Sylvatest Duo / Eurocode 5 values (Spruce)</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|   | <b>C14</b> | <b>C16</b> | <b>C18</b> | <b>C22</b> | <b>C24</b> | <b>C27</b> | <b>C30</b> | <b>C35</b> | <b>C40</b> | <b>C45</b> |
| MOR (N/mm <sup>2</sup> )                                      | 14         | 16         | 18         | 22         | 24         | 27         | 30         | 35         | 40         |            |
|   | <          | >          | >          | >          | >          | >          | >          | >          | >          |            |
| <b>Sawings V (m/s)</b>  | 4809       | 4809       | 4965       | 5121       | 5277       | 5432       | 5510       | 5588       | 5744       |            |
| MOE (N/mm <sup>2</sup> )                                      | 7000       | 8000       | 9000       | 10000      | 11000      | 12000      | 12000      | 13000      | 14000      |            |
| <b>Logs V (m/s)</b>   | < 4102     | > 4102     | > 4258     | > 4414     | > 4570     | > 4725     | > 4803     | > 4881     | > 5037     |            |

### Dichte

Parallel zur Ultraschallmessung wurden die Dimensionen der Lamellen kontrolliert und festgehalten. In den meisten Fällen konnte mit den Nennmassen gearbeitet werden. Das Gewicht jeder Lamelle wurde mit einer kalibrierten Waage aufgenommen.

Aus diesen Daten wurde die Dichte wie folgt berechnet:

Gleichung 3: Dichte  $\rho$

$$\text{Dichte } (\rho) = \text{Masse } (m) / \text{Länge } (l) * \text{Breite } (b) * \text{Dicke } (d)$$

### Statischer E-Modul

Der statische Elastizitätsmodul jeder Lamelle wurde über die Dehnung bei Belastungen zwischen 25kN und 35kN bestimmt. Auf diesem relativ niedrigen Kraftniveau kann davon ausgegangen werden, dass das Zugkraft-Deformationsdiagramm noch linear ist und somit eine genaue Ermittlung des E-Moduls möglich ist.

Zur Berechnung des statischen E-Moduls wurde die Formel aus der EN 408:2003(E) verwendet:

*Gleichung 4: statischer E - Modul*

$$E_{to} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)} = \frac{\Delta F * l_1}{\Delta w * A} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$$

$F_2 - F_1$  [N] ist die Lastzunahme im linearen Teil der Last-Deformations-Kurve und entspricht meist einem Lastintervall von etwa 10kN

$w_2 - w_1$  [mm] ist die Wegzunahme entsprechend  $F_2 - F_1$

Aus den Prüfprotokollen werden die Werte für den linearen Kraftbereich und die dazugehörigen Deformationen herausgesucht und die Dehnung rechnerisch ermittelt.

### Bruchspannung $\sigma_{\text{Bruch}}$

Die Bruchspannung wird über die Bruchkraft und den Lamellenquerschnitt (meistens nominelle Abmessungen) berechnet.

*Gleichung 5: Zugbruchspannung*

$$\sigma_{\text{Bruch}} = F_{\text{Bruch}} / b * d \quad [\text{N/mm}^2]$$

## 5.3 Durchführung der Zugversuche

Die Zugversuche der Lamellen wurden mit der Zugprüfmaschine der ETH Zürich gefahren.

### 5.3.1 Vorbereiten der Lamelle

Um die Dehnung der Lamellen zu messen, wurden links und rechts des Brettes Wegaufnehmer angebracht. Die Dehnung wird benötigt um das statische E- Modul der Proben zu ermitteln. Die Länge des zur Verfügung stehenden Messgerätes ergab eine freie Messlänge von 800mm und ist damit vorgegeben. Die Halterungen der Wegaufnehmer wurden ausserhalb der Klemmen seitlich an die Lamelle angeschraubt (Abbildung 6).

Die Lamelle wurde zwischen den Klemmen platziert, der Klemmdruck wurde mittels einer zur Maschine gehörenden Tabelle ermittelt. Für Fichte liegt die Anpresskraft zwischen 280kN und 310kN. Das entspricht einer Druckspannung senkrecht zur Faser von  $5.83 \text{ N/mm}^2$  -  $6.45 \text{ N/mm}^2$  auf die Lamelle. Damit kann ein Gleiten in den Klemmen verhindert und Schädigungen im Pressbereich vermieden werden. Die Versuche zeigten, dass nur in seltenen Fällen der Bruch aufgrund der Einspannung ausgelöst wurde.



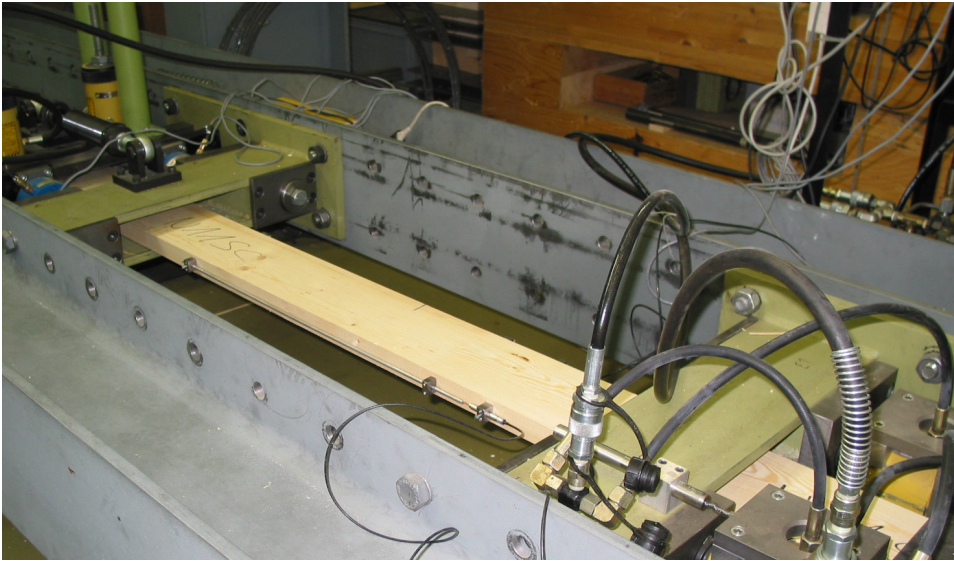


Abbildung 6: Lamelle mit montierten Wegaufnehmer in der Prüfmaschine

### 5.3.2 Versuchsablauf

Bei einer Zugkraft von 45kN, wurde die Maschine angehalten und die Wegaufnehmer entfernt. Es ist wichtig, dies vor dem Versagen der Lamelle zu tun, da die Wegaufnehmer allenfalls durch die Wucht des Bruches zerstört werden könnten. Eine Zugkraft von 45 kN war ausreichend um den statischen Zug-E-Modul zu ermitteln, da die Lamelle dann noch immer elastisch ist, und ein Versagen auf diesem Lastniveau eher unwahrscheinlich ist.



Abbildung 7: Entfernen der Wegaufnehmer bei 45kN

Nach dem Entfernen der Wegaufnehmer wurde der Versuch weitergefahren und die Lamelle bis zum Versagen geprüft. Laut DIN EN 408 darf die Dauer des Versuches 300 Sekunden nicht überschreiten.



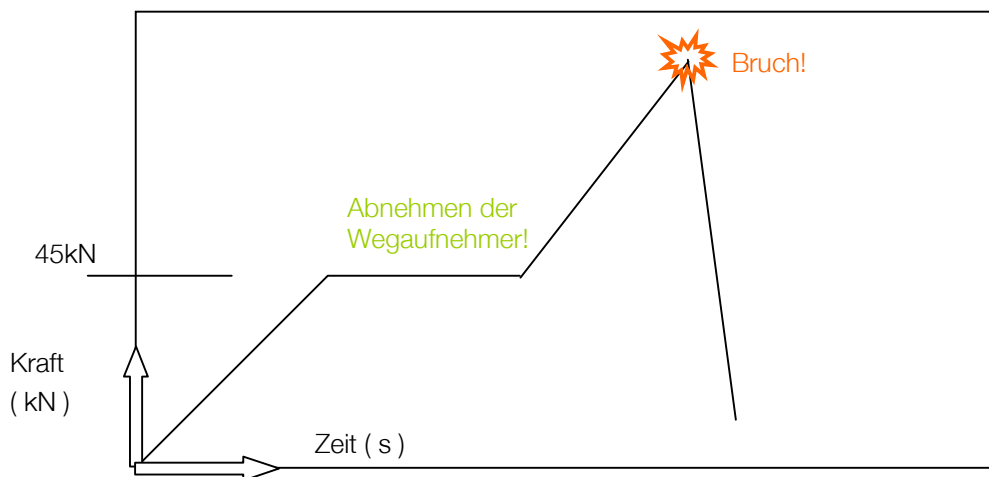


Abbildung 7: An der Maschine eingestellter Prüfablauf

### 5.3.3 Dokumentation der Versuchsdurchführung

Die Daten Zugkraft, Weg und Zeit wurden von der Maschine aufgezeichnet. Die Abbildung 8 zeigt die Daten eines Zugversuchs. Während der Haltezeit wurden die Wegaufnehmer abmontiert. Die verschiedenen Parameter wurden dann in die Auswertungstabelle (data sheet) übertragen, um die relevanten Versuchsergebnisse zu ermitteln.

### Prüfablauf

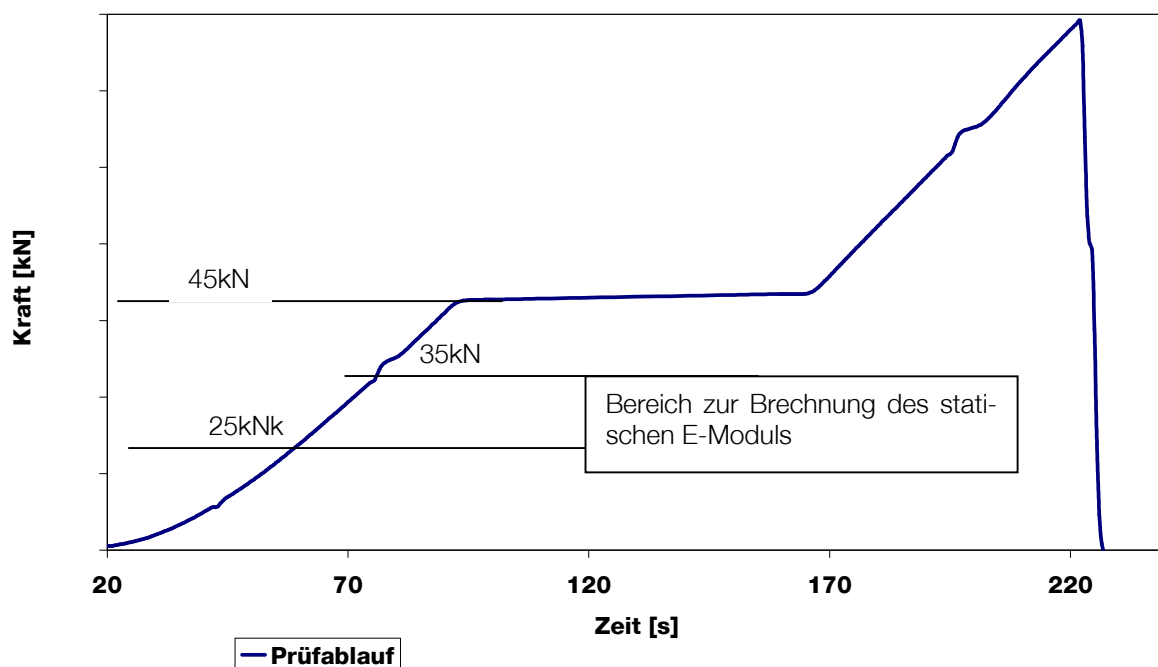


Abbildung 8: Beispiel eines Prüfprotokolls

Nach dem Versuch wurden die Lamellen auf die Bruchursache hin untersucht und wieder fotografiert. Die Lamellen, deren Bruchspannung unter  $14,5 \text{ N/mm}^2$  lagen, wurden gesondert gelagert um sie zu weiteren Untersuchungen an die HSB Biel zu transportieren.

Die Bilder, welche das Bruchversagen dokumentieren, sind im Anhang für die jeweiligen Betriebe und auf der Daten-DVD abgelegt. Sie dienen einer allfälligen visuellen Nachsortierung der Lamellen.

## 6 Statistische Auswertung

### 6.1 Grundlage

Die Zugfestigkeit der Lamellen wurde statistisch ausgewertet. Es galt heraus zu finden, ob die Qualität der produzierten Lamellen den Anforderungen der SIA 265/ (Tabelle 11) entspricht. Da zur Untersuchung von Festigkeitseigenschaften im allgemeinen die Lognormal-Verteilung zur Anwendung kommt, wurde schliesslich diese Verteilung berücksichtigt. Die Voraussetzungen für eine versuchsgestützte Bemessung gemäss SIA 265/1 setzt Stichprobengrössen von mindestens 30 voraus und definiert den Vertrauensbereich eines Materialparameters auf 84.1%. Von besonderem Interesse ist für diese Untersuchung die Berechnung der 5%-Fraktile für jeden Betrieb einzeln mit je 55 Stichproben, und die Betrachtung an der kombinierten Stichprobe.

Im Holzbau wird allgemein akzeptiert, dass 5% aller Werte (Anteilsbereich) unter einer definierten Anforderung liegen dürfen. Die Anteilsgrenze (Quantil, Fraktile) kann aufgrund des zu geringen Probenumfanges streuen, und ein angemessenes Vertrauensniveau muss festgelegt werden. Aufgrund neuerer Untersuchungen darf die Anteilsgrenze innerhalb einer Standardabweichung schwanken. Dies ergibt schliesslich den Vertrauensbereich von 84.1%.

Die 5%-Fraktile mit einem Vertrauensbereich von 84.1% wird mittels folgender Formel ermittelt:

$$x_{05} = \frac{\text{Median}}{\exp(k_{05} \cdot s_y)}$$

$s_y$  = Standardabweichung der logarithmisierten Daten

Der Hilfswert  $k_{05}$  ist für  $n \geq 10$  wie folgt definiert [Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik, Graf / Hennig / Stange / Wilrich]:

$$k_{05} = \frac{2(n-1)}{2(n-1) - z_{1-\alpha}^2} \left( z_{1-p} + z_{1-\alpha} \sqrt{\frac{2(n-1) + n \cdot z_{1-p}^2 - z_{1-\alpha}^2}{2n(n-1)}} \right)$$

$n$  = Stichprobenumfang

$z_{1-\alpha}$  = Schranke der Standardnormalverteilung bezüglich des statistischen Anteilbereiches

$z_{1-p}$  = Schranke der Standardnormalverteilung bezüglich des Vertrauensbereiches (hier 84.1% Vertrauensniveau)

Dieser Wert wird mit den Anforderungen der SIA 265/1 verglichen. Die Daten der Lamellen welche unter dem in der SIA 265/1 festgelegten Grenzwert liegen, wurden gesondert analysiert und weiter ausgewertet.

## 7 Ergebnisse der Zugversuche

### 7.1 Auswertung der gesamten Stichprobe

Die folgenden Ergebnisse stammen von Zugversuchen der insgesamt 495 Lamellen von 9 Projektpartnern, die im Sommer 2003 an der ETH Zürich geprüft wurden.

Eine Zuverlässigkeitsanalyse der Zugfestigkeit der Lamellen wurde anhand der Lognormal-Verteilung durchgeführt, abgestützt auf die Vorgehensweise welche in Abschnitt 6 dargestellt worden ist. Die Resultate zeigen (Diagramm 1), dass das 5%-Fraktil der Bruchfestigkeit mit einem Vertrauensintervall von 84.1% über die gesamte Stichprobe bei **13.2 N/mm<sup>2</sup>** liegt. Dieser Wert liegt unter den Anforderungen für Lamellen zur BSH Herstellung gemäss SIA 265/1 (Tabelle 3).

### Auswertung von Diagramm 2 bis Diagramm 4

Die folgenden Diagramme stellen keine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse dar. Es wird nicht versucht Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Parametern und der Bruchfestigkeit zu untersuchen. Die Darstellungen dienen lediglich der Dokumentation der Ergebnisse und sollen verschiedene Problempunkte aufzeigen.

Das Diagramm 2 dokumentiert die Holzfeuchte während der Produktion. Während der Produktion sollte die Holzfeuchte der Lamellen gemäss Empfehlung der SFH  $u = 10\% \pm 2\%$  betragen, damit die Verleimqualität garantiert werden kann. Die gemessene Holzfeuchte beträgt hier  $u = 12\% \pm 6\%$ . Es ist zu erkennen, dass auch Lamellen mit Holzfeuchten ausserhalb des geforderten Bereichs oft ausreichend hohe Bruchfestigkeiten aufweisen.

Für die Rohdichte der Lamellen bestehen laut Norm keine Anforderungen. Die Verteilung der Rohdichte ist in Diagramm 3 dargestellt. Der Mittelwert aller gemessenen Rohdichten bewegt sich im üblichen Rahmen.

Gemäss Diagramm 4 liegt der mittlere Zug-E-Modul geringfügig über dem geforderten Mittelwert. Der Mittelwert des Zug-E-Moduls der gesamten Stichprobe liegt bei 11570N/mm<sup>2</sup> und erfüllt damit die Anforderungen der Norm. Trotz Sortierung und Vergütung der Lamellen bleibt die Streuung hoch. Lamellen mit extrem tiefen Zugfestigkeiten weisen sowohl tiefe als auch hohe Steifigkeitswerte auf.

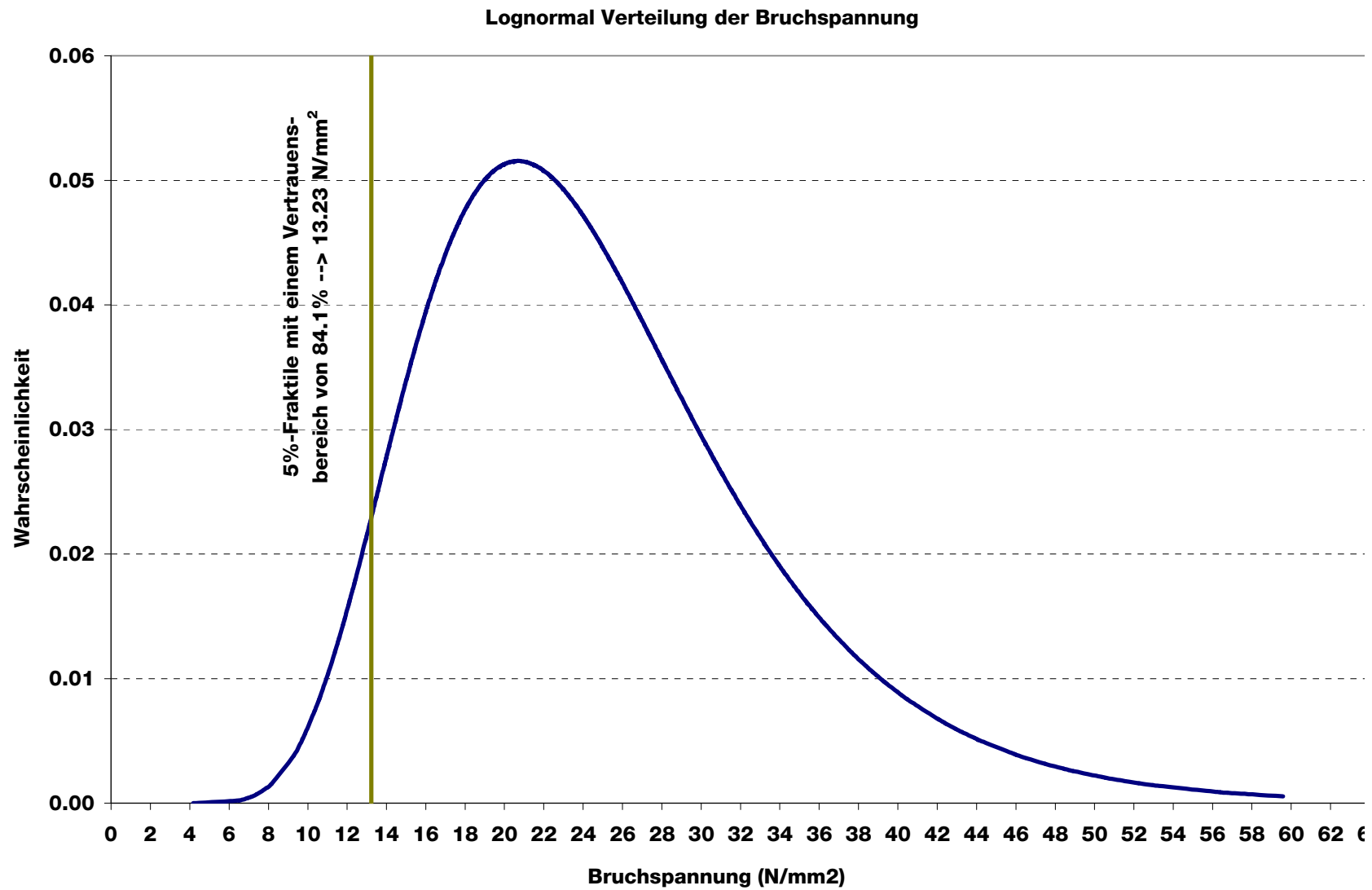


Diagramm 1: Lognormal Verteilung der Bruchspannung; 5% - Fraktile mit einem Vertrauensbereich von 84.1%:  $\sigma_{5\%, Bruch} = 13.23 \text{ N/mm}^2$

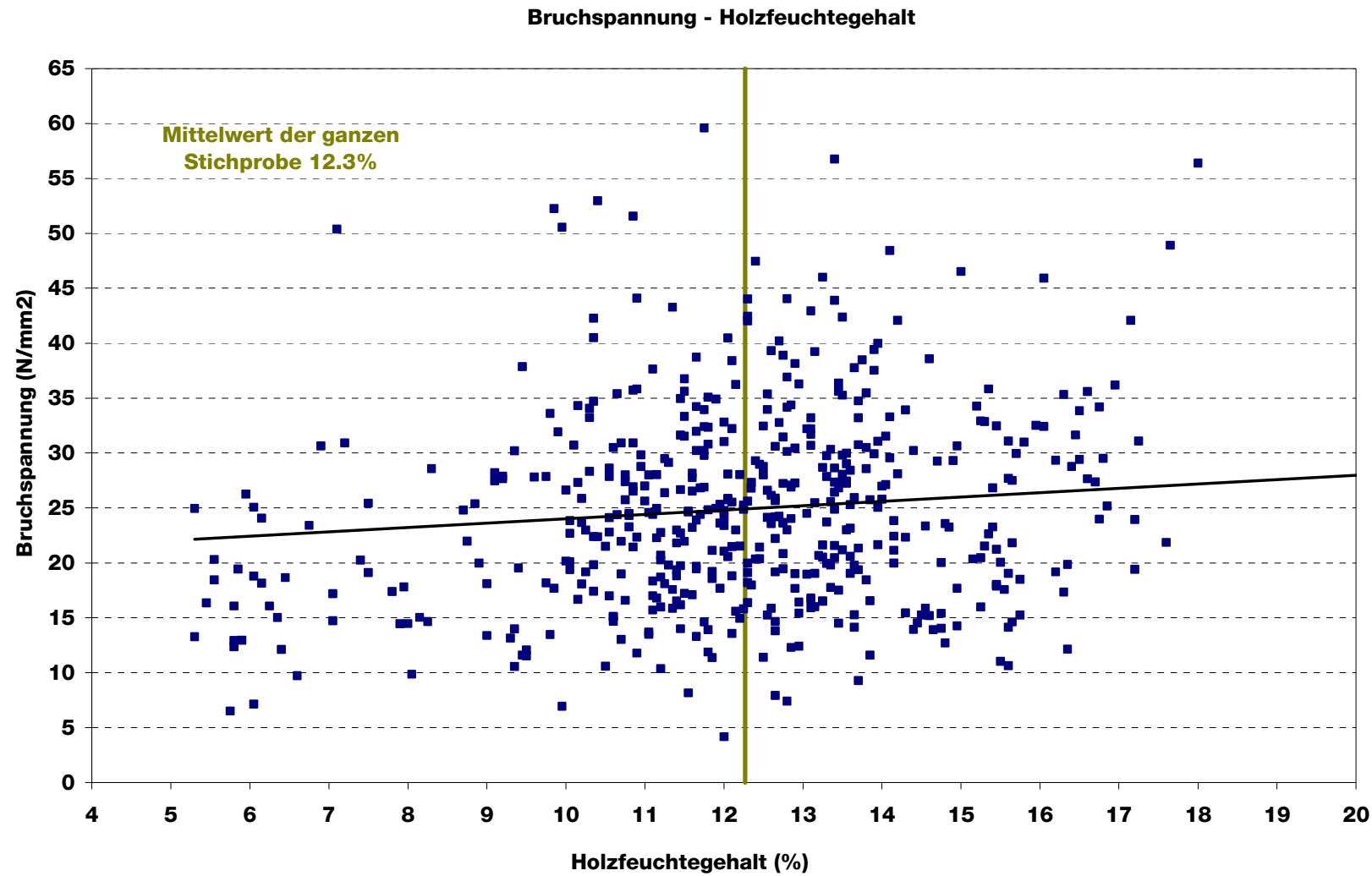


Diagramm 2: Bruchspannung - Feuchtigkeitsgehalt; Mittelwert der Lamellenfeuchtigkeit  $u = 12.3\%$  der gesamten Stichprobe

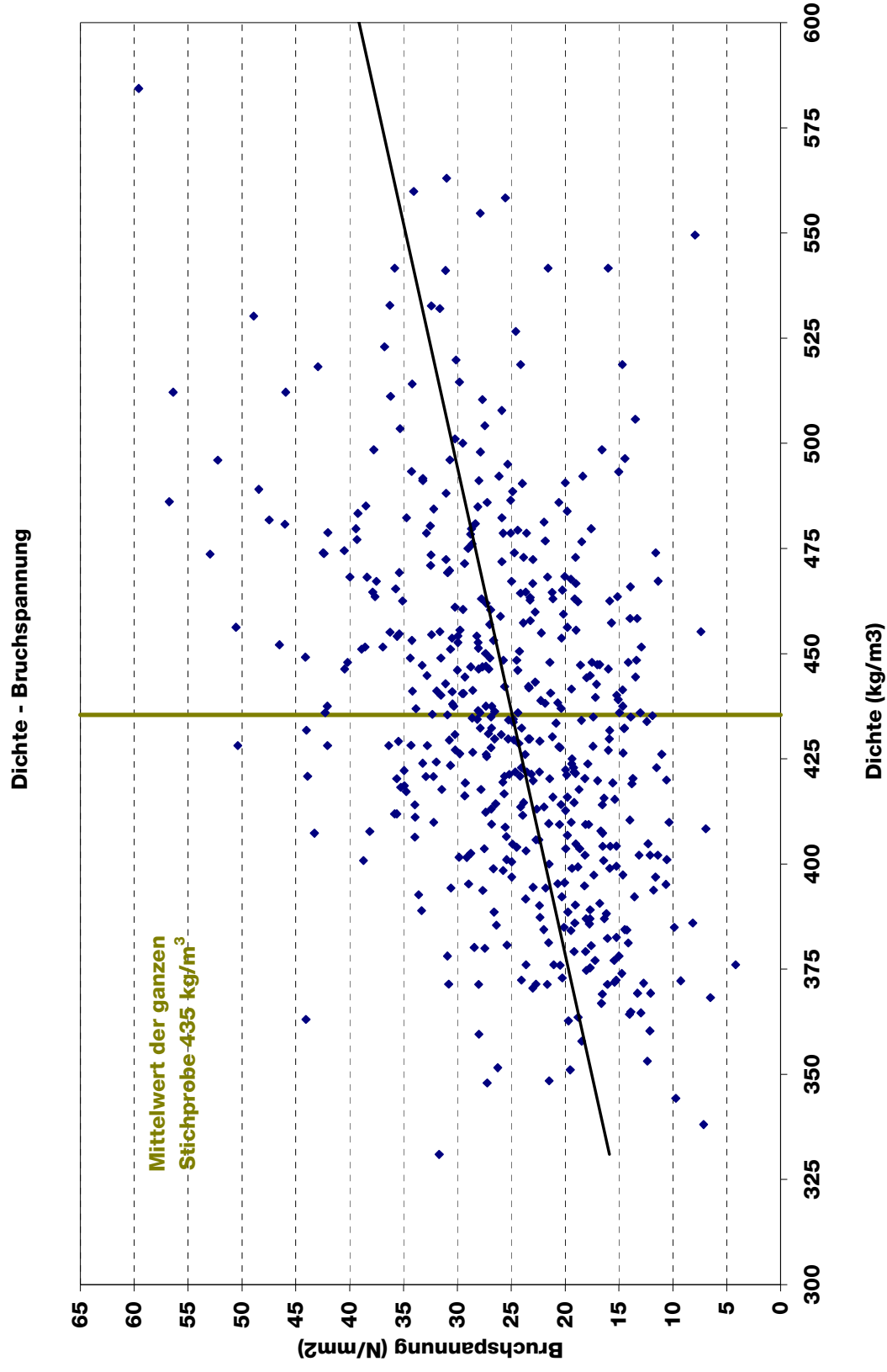


Diagramm 3: Dichte - Bruchspannung der gesamten Stichprobe, Mittelwert  $p = 435 \text{ kg/m}^3$

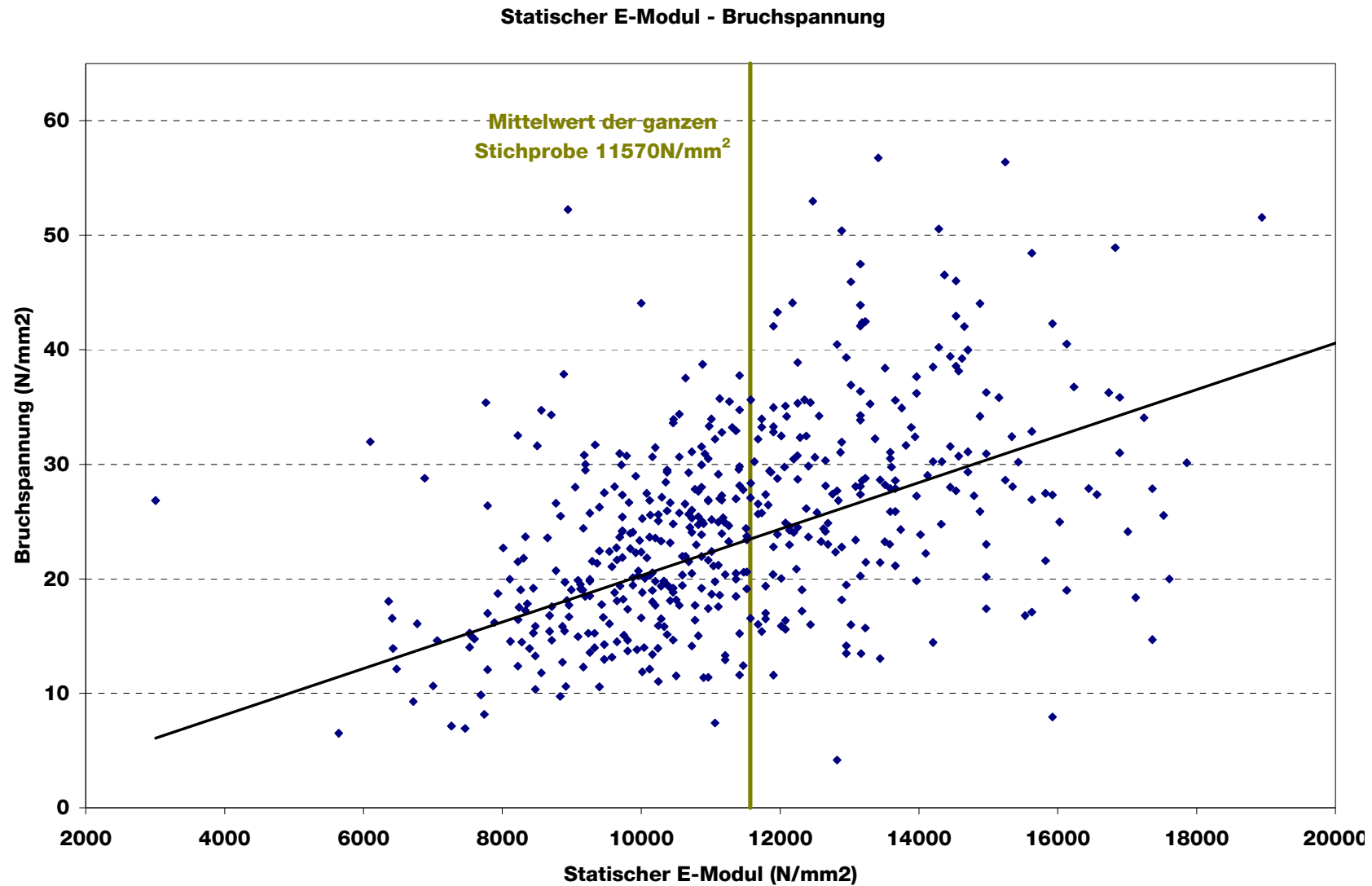


Diagramm 4: Zug-E-Modul zu Bruchspannung der gesamten Stichprobe, Mittelwert der ganzen Stichprobe  $E = 11570 \text{ N/mm}^2$

## 7.2 Auswertung der Prüfergebnisse der Lamellen < 14.5N/mm<sup>2</sup>

In der Folge wurden nun die Bruchwerte, welche unter den Anforderungen der SIA 265/1 liegen, genauer betrachtet. Ziel der Analyse ist zu ermitteln, ob auf Grund der Parameter Lamellenfeuchte, Rohdichte und Steifigkeit mögliche Argumente für die geringen Festigkeiten vorliegen. Im Sortierprozess im Betrieb wird die Lamellenfeuchte erfasst, was erlauben würde Lamellen mit zu hohen oder zu niedrigen Feuchtwerten zu eliminieren. Die Rohdichte kann allenfalls über die Jahrringbreite erfasst werden, dieser Sortierparameter fließt gemäss der Voruntersuchung jedoch nicht direkt in den Sortierprozess ein. Die Biegesteifigkeit kann im Durchlaufverfahren erfasst werden. In den untersuchten Betrieben wird diese heute noch nicht erfasst.

Die folgenden Diagramme stellen die Bruchfestigkeiten von Lamellen dar, welche eine geringere Bruchfestigkeit als die in der SIA 265/1 geforderten 14.5N/mm<sup>2</sup> aufweisen.

### 7.2.1 Vergleich Feuchtegehalt und Bruchspannung

Das Diagramm 5 zeigt die Zugfestigkeit der Lamellen in Abhängigkeit der Lamellenfeuchte. Die Holzfeuchten der Lamellen geringer Festigkeit liegen tendenziell unter dem Mittelwert der gesamten Stichprobe.

Die Streuung ist wie auch in der Gesamtbetrachtung größer als erwartet. Werden die Feuchteanforderungen ( $w = 10\% \pm 2\%$ ) besser eingehalten, kann jedoch kaum eine Verbesserung der Zugfestigkeit erreicht werden.

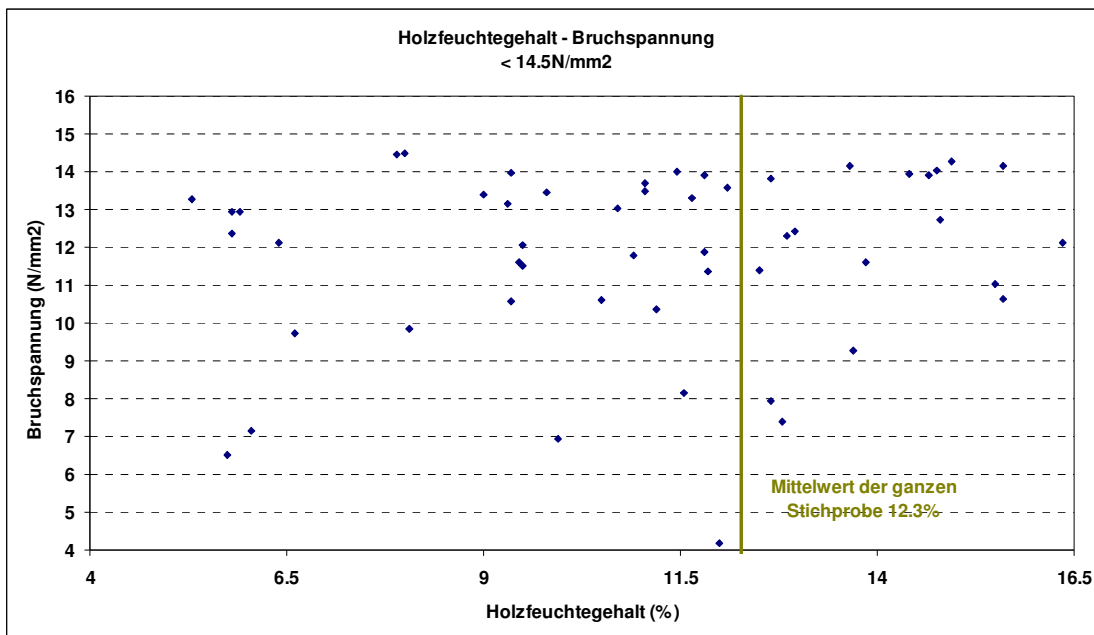


Diagramm 5: Feuchtegehalt - Bruchfestigkeit der Lamellen < 14.5N/mm<sup>2</sup>

### 7.2.2 Vergleich Dichte und Bruchspannung

Die Dichte (Diagramm 6) der Lamellen geringer Festigkeit liegt tendenziell unter dem Mittelwert der gesamten Stichprobe. Der Vergleich mit Diagramm 3 zeigt aber, dass der Grossteil der Lamellen mit ähnlichen Dichten den Grenzwert der Bruchfestigkeit ohne weiteres überschreiten.

Würden die Lamellen mit geringer Rohdichte aussortiert werden, könnten nur wenige Lamellen die auch eine geringe Zugfestigkeit aufweisen eliminiert werden. Daraus folgt, dass eine Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Rohdichte als Sortierkriterium nicht eingesetzt werden kann.



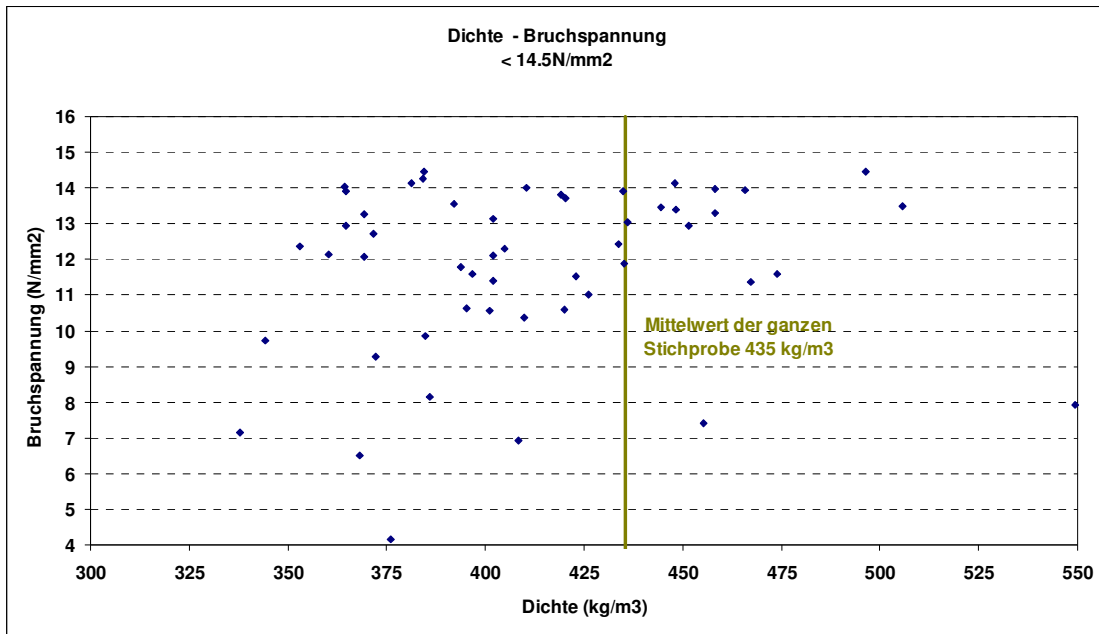


Diagramm 6: Dichte - Bruchfestigkeit der Lamellen  $< 14.5 \text{ N/mm}^2$

### 7.2.3 Vergleich statischer E-Modul und Bruchfestigkeit

Die Lamellen welche frühzeitig versagt haben, weisen einen E-Modul auf, der klar unter dem Mittelwert der ganzen Stichprobe liegt. Weiterführende Analysen (Kapitel 7.3) zeigen, dass in vielen Fällen nicht die mechanischen Eigenschaften, sondern Fehlerstellen im Holz und insbesondere Einzeläste und Astansammlungen zu einem frühen Zugversagen der Lamellen führen.

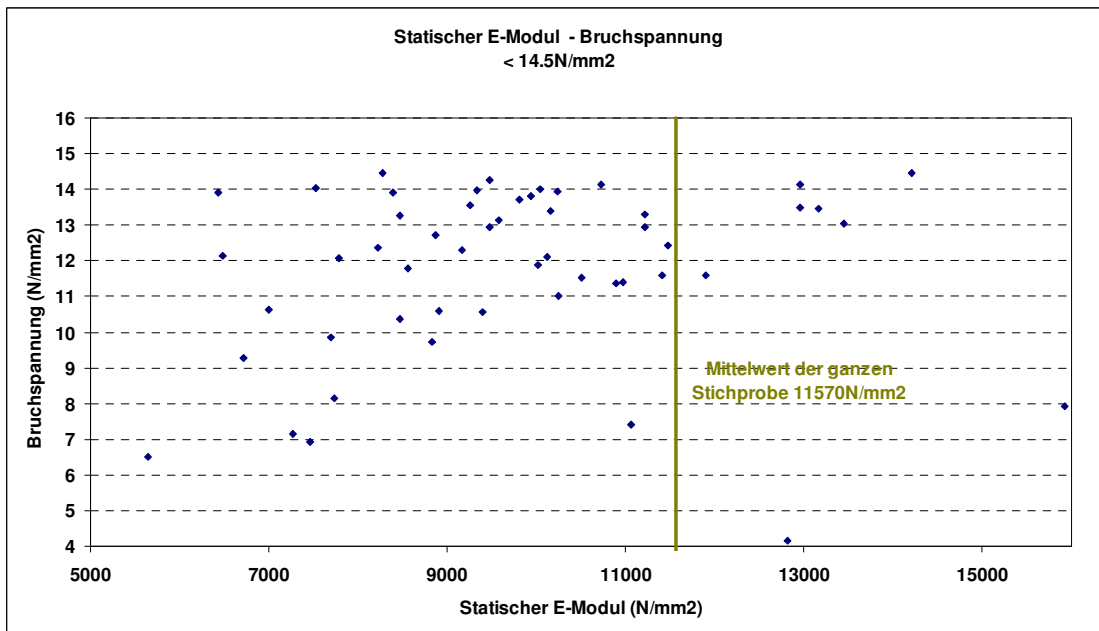


Diagramm 7: Statischer E-Modul - Bruchfestigkeit der Lamellen  $< 14.5 \text{ N/mm}^2$

### 7.3 Nachsortierung der Lamelle an Hand der DIN 4074

Die Lamellen mit ungenügenden Zugfestigkeiten wurden anhand der Sortierkriterien laut DIN für die Festigkeitsklassen S10 im Labor noch einmal visuell nachsortiert. In vielen Fällen sind für den frühen Bruch Holzfehler verantwortlich. 50% (26 von 52) der Lamellen mit geringer Festigkeit könnten bei einer exakteren Sortierung eliminiert werden. Es darf allerdings nicht außer Acht gelassen werden, dass im Betrieb im Durchlaufverfahren sortiert wird. Pro Lamelle kann nur sehr wenig Zeit eingesetzt werden. Die Untersuchung zeigt jedoch, dass Verbesserungen im Bereich der Sortierung erforderlich sind.

Jede Lamelle wurde auf Grund der Einzelkriterien lt. DIN 4074 (Ast, Astansammlung, Faserneigung, etc.) in die entsprechende Festigkeitsklasse eingeteilt. Für die endgültige Einstufung ist die niedrigste Sortierklasse maßgebend. Dies bedeutet für die vorliegenden Lamellen mit ungenügender Festigkeit, dass von den 52 Proben deren 26 bei exakterer (Labor)Sortierung hätten eliminiert werden können. Somit hätten nur 26 verbleibenden Lamellen trotz korrekter Sortierung bei einer geringen Zugfestigkeit versagt (Tabelle 6).

Auf Grund der statistischen Methoden wären maximal 2-3 Lamellen mit ungenügender Festigkeit bei einem Stichprobenumfang von  $n=55$  tolerierbar gewesen. Diese Grenze wäre bei korrekter Sortierung von den Betrieben 3 bis 9 eingehalten worden (rechte Spalte der Tabelle 6).

Tabelle 6: Neueinstufung der Lamellen mit Festigkeit  $< 14.5 \text{ N/mm}^2$

| Betrieb   | Anzahl Lamellen<br>$< 14.5 \text{ N/mm}^2$ | 5% - Fraktile <sup>2</sup> | stat. E-Modul <sup>2</sup><br>[ $\text{N/mm}^2$ ] | Sortierklasse<br>nicht erfüllt<br>$< \text{S10}$ | Sortierklasse<br>erfüllt<br>$> \text{S10}$ |
|-----------|--|----------------------------|---|--|--|
| Betrieb 1 | 13   | 8.9                        | 10900   | 7  | 6  |
| Betrieb 2 | 6  | 10.4                       | 13400   | 2  | 4  |
| Betrieb 3 | 8  | 10.6                       | 12400   | 5  | 3  |
| Betrieb 4 | 5  | 12.7                       | 10900   | 2  | 3  |
| Betrieb 5 | 4  | 13.0                       | 11500   | 1  | 3  |
| Betrieb 6 | 6  | 13.2                       | 11500   | 5  | 1  |
| Betrieb 7 | 3  | 14.3                       | 11000   | 1  | 2  |
| Betrieb 8 | 4  | 14.3                       | 11750   | 2  | 2  |
| Betrieb 9 | 3  | 15.7                       | 10900   | 1  | 2  |
| Schweiz   | 52   | 13.2                       | 11570   | 25   | 27   |

Für die folgende Auswertung wurden die entsprechenden 26 Lamellen ( $< \text{S10}$ , Sortierklasse nicht erfüllt) aus der Stichprobe entfernt und ein neues 5%-Fraktil der Bruchfestigkeit der verbleibenden Lamellen der Sortierklasse S10 oder höher berechnet. Das 5%-Fraktil der auf diese Weise angepassten Stichprobe steigt um  $0.9 \text{ N/mm}^2$  auf  **$14.1 \text{ N/mm}^2$** . In Diagramm 8 ist die Lognormal-Verteilung dieser Stichprobe dargestellt.

**ALS FAZIT KANN GESAGT WERDEN, DASS DURCH EINE GENAUERE SORTIERUNG DIE ANFORDERUNG DER SIA 265/1 NUR KNAPP NICHT ERFÜLLT WIRD.**

<sup>2</sup> Wert betreffend die betriebsspezifische Stichprobe von 55 Lamellen

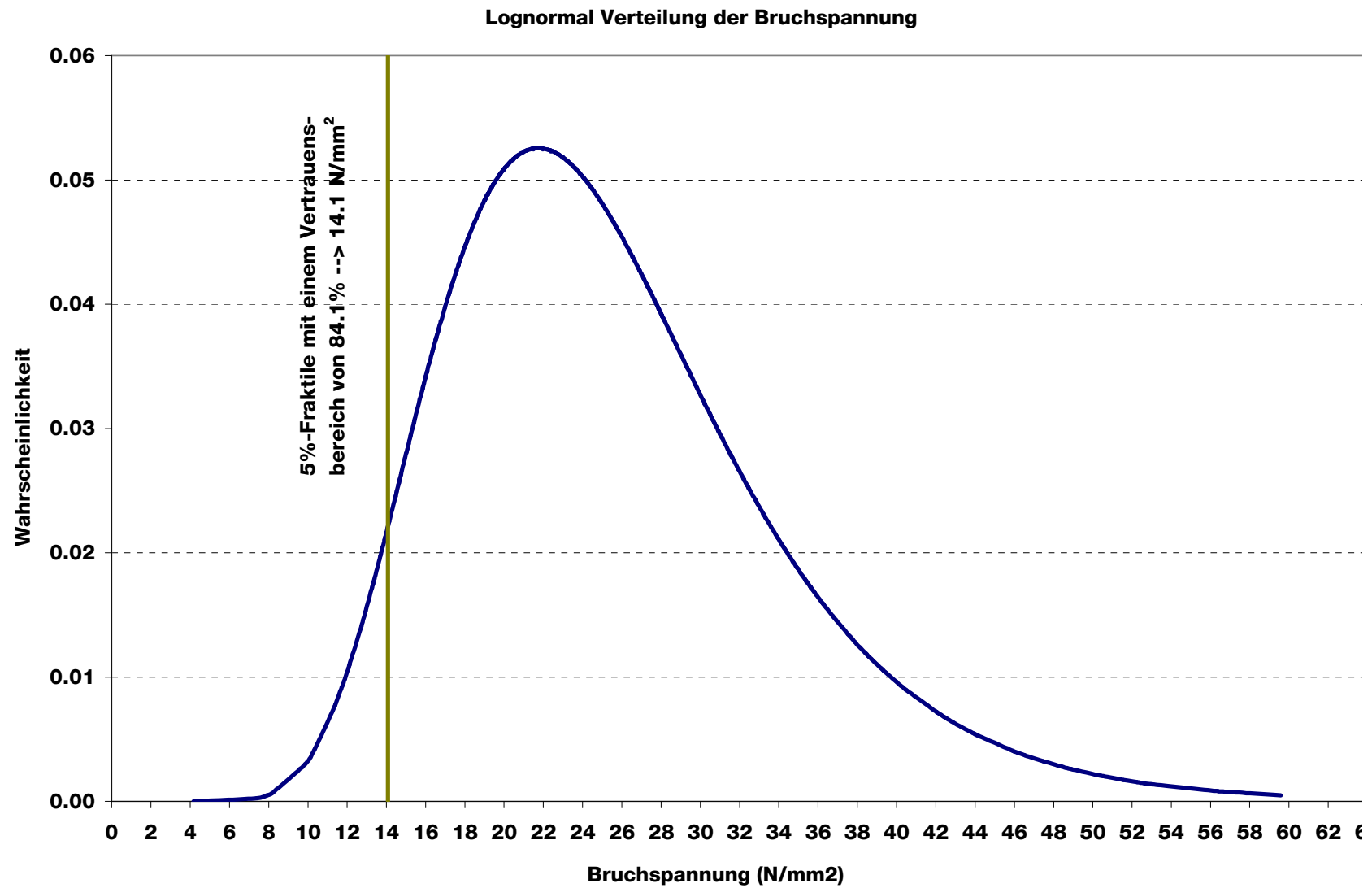


Diagramm 8: Lognormal Verteilung der Bruchspannung; 5% - Fraktilwert mit einem Vertrauensbereich von 84.1%: 14.1 N/mm<sup>2</sup>

#### 7.4 Vergleich der Betriebe

Für jeden Betrieb wurden Einzelauswertungen durchgeführt. Das Ergebnis (Diagramm 9) zeigt, dass nur Betrieb 9 die Anforderungen an die Festigkeit der Einzellamellen erfüllt. Im Schweizer Gesamtdurchschnitt ist die Anforderung, wie im vorangegangenen Abschnitt ausgeführt, ebenfalls nicht erreicht.

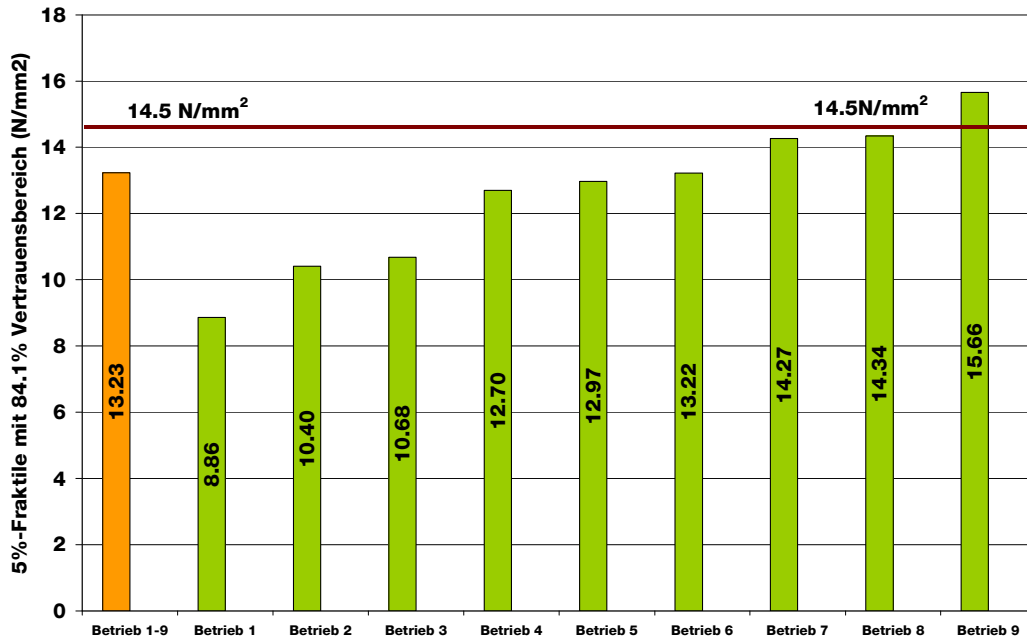


Diagramm 9: Vergleich der 5%-Fraktile der Zugfestigkeiten der Lamellen verschiedener Betriebe

In Diagramm 10 ist die Anzahl der Lamellen mit Bruchfestigkeiten unter  $14.5 \text{ N/mm}^2$  dargestellt. Stellt man diesen Wert den 5%-Fraktile der Bruchfestigkeit (Diagramm 9) gegenüber, kann ausgesagt werden, dass je mehr Lamellen eine geringe Zugfestigkeit aufweisen, desto geringer das 5%-Fraktile der Zugfestigkeit ist. Eine Ausnahme stellt der Betrieb 6 dar. Trotz einer relativ hohen Anzahl an Lamellen mit niedriger Bruchfestigkeit liegt der Wert der 5%-Fraktile im Vergleich zu den anderen Betrieben relativ hoch.

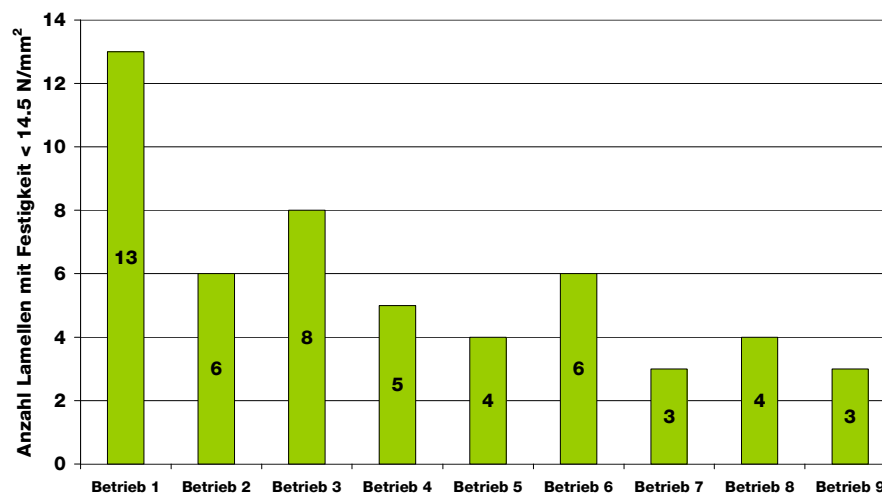
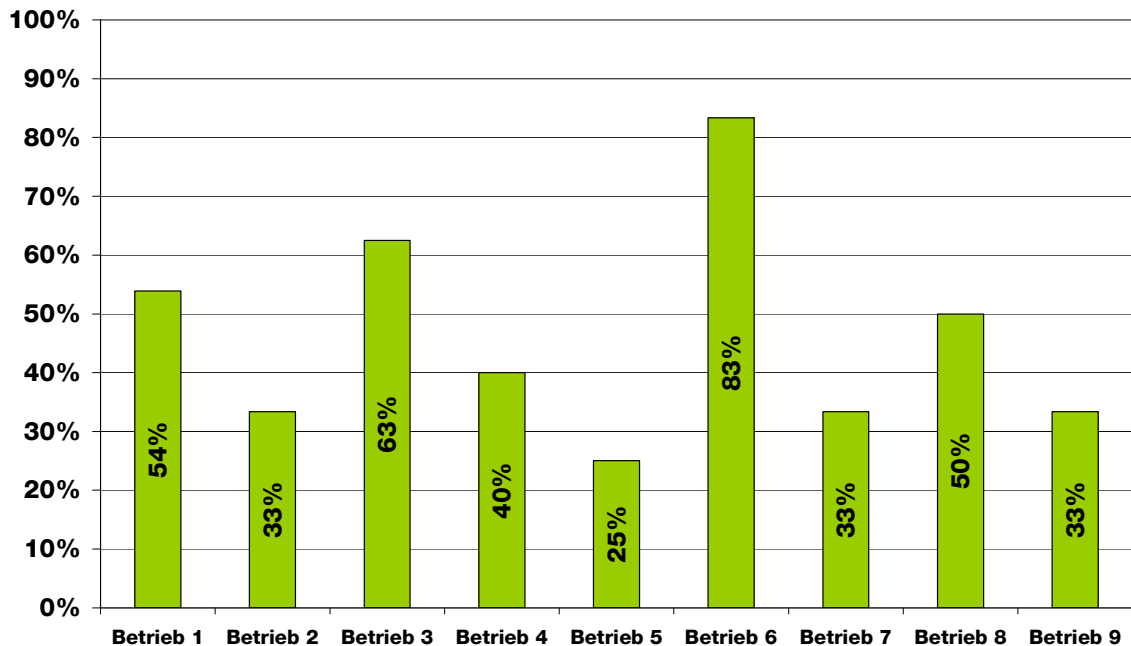


Diagramm 10: Vergleich der Anzahl Lamellen mit Zugfestigkeiten <  $14.5 \text{ N/mm}^2$  verschiedener Betriebe

**Anteil der S7 und S0 Lamellen mit Festigkeit < 14.5 N/mm<sup>2</sup>  
im Verhältnis zu allen Lamellen mit Festigkeit < 14.5 N/mm<sup>2</sup>**



*Diagramm 11: Anteil der Lamellen der Sortierklasse <S10 im Vergleich zu den Lamellen mit Zugfestigkeit <14.5N/mm<sup>2</sup>*

Die Lamellen geringer Festigkeit aus Diagramm 10 wurden wie in Kapitel 7.3 beschrieben visuell nachsortiert. Diagramm 11 zeigt den Anteil der Lamellen der Sortierklasse <S10 die hätten aussortiert werden sollen, im Vergleich zur gesamten Anzahl Lamellen geringer Festigkeit des jeweiligen Betriebes.

Unabhängig von den Abhängigkeiten der Zugfestigkeit von den Parametern Rohdicht, Holzfeuchte und E-Modul können die Betriebe die visuelle Sortierung weiter verbessern. Wie aus der vorangegangenen Auswertung hervorgeht ist das Verbesserungspotential vor allem bei den Betrieben hoch, in deren Stichprobe sich mehrere Lamellen der Sortierklasse <S10 befanden. Dies betrifft hauptsächlich die Betriebe 1 / 3 / 6 und 8. Für Betrieb 6 bedeutet dies beispielsweise, dass 83% der unzulässigen Brüchen durch eine bessere Sortierung vermieden werden könnten.

Betrachtet man die Stichprobe der Einzelbetriebe genauer, dann ist zu erkennen, dass bei einigen Betrieb die Streuung der Ergebnisse der Zugversuche groß ist. Der Variationskoeffizient eignet sich gut, verschiedene Verteilungen hinsichtlich ihrer Streuungsverhältnisse miteinander zu vergleichen. Je kleiner der Prozentwert ist, desto geringer ist die Streuung der Verteilung. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Variationskoeffizienten unter 10% eine kleine Streuung vorliegt. Die Messwerte liegen dann relativ eng um das arithmetische Mittel der Stichprobe. Das Diagramm 12 zeigt die 5%-Fraktilwerte der Bruchfestigkeit und die Streuung der Stichprobe. Je homogener die Stichprobe, desto höher liegt der Wert des 5%-Fraktils der Bruchfestigkeit.

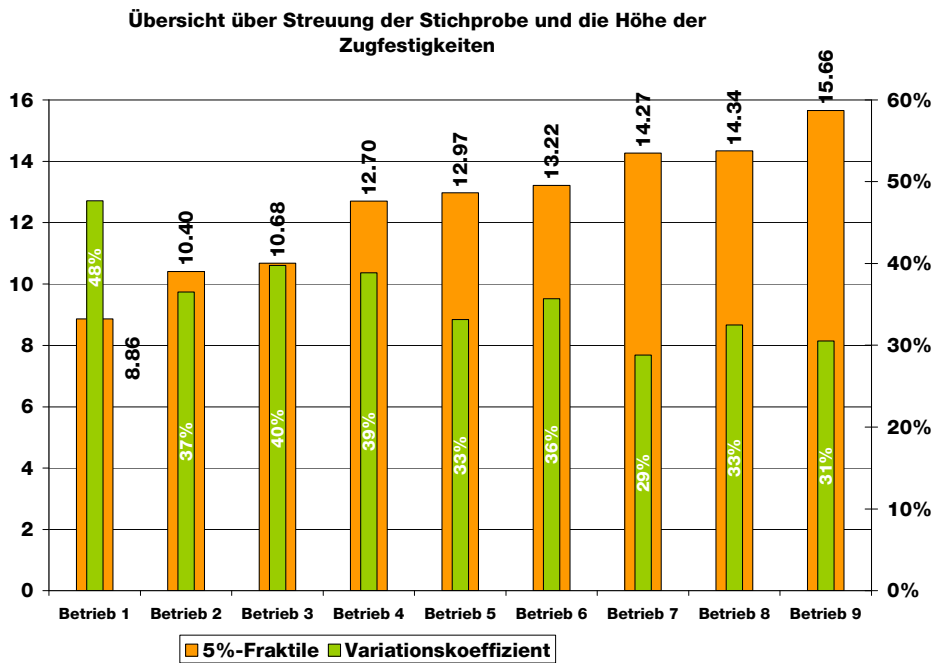


Diagramm 12: 5%-Fraktile und Streuung der Stichproben der Betriebe; Variationskoeffizient

Neben der Anforderung an die Zugfestigkeit besteht noch die Anforderung an den statischen Zug-E-Modul (Tabelle 3). Wie Diagramm 13 zeigt, erfüllen fast alle Betriebe diese Anforderung. Eine Ausnahme bildet Betrieb 9. Der Mittelwert des E-Modul liegt knapp unter den in der SIA 265/1 geforderten 11000N/mm<sup>2</sup>, obwohl für diesen Betrieb die höchsten Zugfestigkeiten erreicht werden. Die Streuung der Werte ist ausser in einem Fall eher gering.

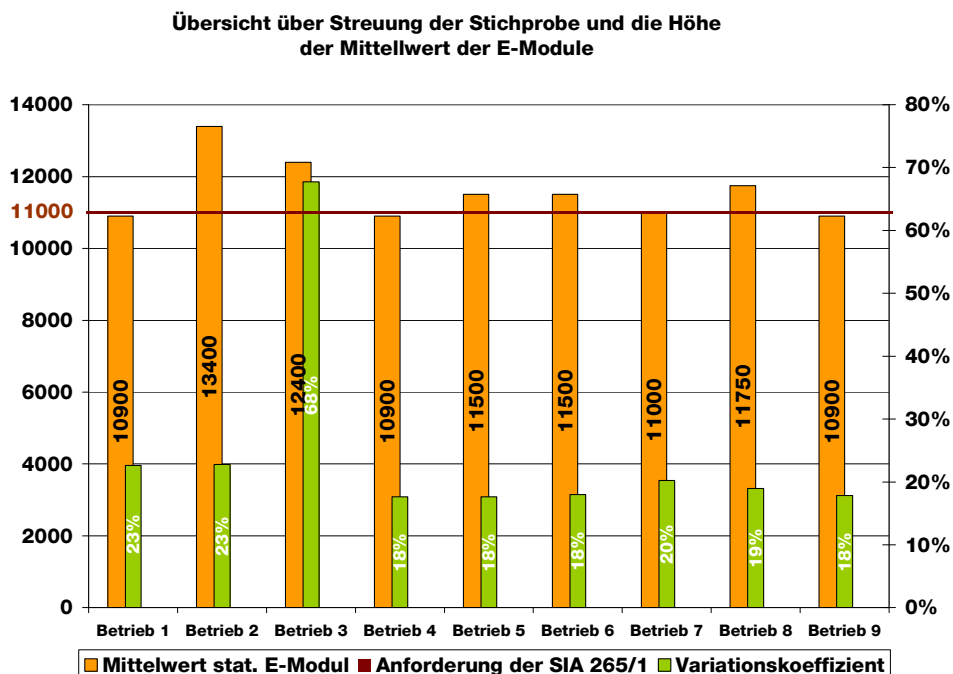


Diagramm 13: Mittelwert Zug-E-Modul - Streuung der Stichproben der Betriebe; Variationskoeffizient

## **8 Einzelauswertung der Daten der Firmen**

Die Einzelauswertung jedes Betriebes ist dem Anhang B beigefügt.

## 9 Schlussfolgerungen der Gesamtauswertung

### 9.1 Zusammenfassung

In diesem Modul wurden BSH-Lamellen auf ihre Zugfestigkeit geprüft. Die 495 Lamellen wurden von 9 verschiedenen BSH-Herstellern aus der Schweiz zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse der Versuche wurden ausgewertet um die Streuung der Zugfestigkeit der verschiedenen Lamellen zu ermitteln. Die möglichen Abhängigkeiten zwischen den erhaltenen Resultaten der einzelnen Betriebe und den Eigenschaften der Lamellen wurden untersucht.

Ziel war die Ermittlung der Lamellenqualitäten der einzelnen Hersteller. Die Ergebnisse der Einzelauswertungen zeigen den Firmen mögliche Schwachstellen auf. Dies ermöglicht ihnen eine Verbesserung der Lamellenproduktion, damit schlussendlich die von der SIA 265/1 geforderten Lamellenfestigkeiten erreicht werden. Die Stichproben wurden mit Hilfe der zutreffendsten statistischen Methode überprüft. Auf Grund der statistischen Methoden wären maximal 2-3 Lamellen mit ungenügender Festigkeit bei einem Stichprobenumfang von  $n=55$  tolerierbar gewesen. Diese Grenze wurde ohne visuelle Nachsortierung nur von zwei Betrieben erreicht.

Die Stichproben der einzelnen Betriebe wurden ohne weitere statistische Abklärung kombiniert und weiter ausgewertet. Die Schlussfolgerungen, welche für die individuellen Betriebe gezogen werden können sind weiterhin gültig.

Der Versagensmodus wurde für jede einzelne Lamelle erfasst und dokumentiert. Lamellen mit Zugfestigkeiten welche unter den Anforderungen der Norm liegen, wurden speziell weiter untersucht. Für Lamellen mit ungenügender Festigkeit sind alle Versagen auf Einzeläste und/oder Astansammlungen zurückzuführen. Eine visuelle Nachsortierung anhand der Sortierkriterien der Norm DIN 4074 zeigt nur in einigen Fällen eine unbefriedigende Sortierung auf. Die 5%-Fraktile verbessert sich durch das nachträgliche Herausnehmen der niedrig klassierten Lamellen bei einer betriebs-spezifischen Auswertung nur geringfügig und liegt immer noch unter den geforderten Festigkeiten. Als Fazit kann gesagt werden, dass durch eine genauere Sortierung nach DIN 4074 die Anforderung der SIA 265/1 nur knapp nicht erfüllt wird.

### 9.2 Fazit

Die Auswertung aller Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Festigkeitswerte liegen unter den Erwartungen und Anforderungen der SIA 265/1.
- Eine geringe Rohdichte bedingt nicht zwingend geringe Festigkeitswerte.
- Tiefe oder hohe Holzfeuchten (empfohlene Variation während der Verarbeitung von  $10 \pm 2\%$ ) bedingen nicht tiefe Festigkeitswerte.
- Geringe statische E-Moduli bedeuten nicht zwingend geringe Festigkeitswerte.
- Hauptursache für die geringen Festigkeiten sind Äste, vor allem Flügeläste, in den Lamellen.
- Bis auf wenige Ausnahmen wurde korrekt nach DIN 4074 sortiert. Einige der Lamellen mit geringer Zugfestigkeit hätten bei exakter Sortierung auf Grund visueller Merkmale zum voraus aus der Stichprobe eliminiert werden können.
- Nach einer Nachbeurteilung kann gesagt werden, dass bei ausreichender Sortierung, das heisst nach Eliminierung der Lamellen welche die Sortierklasse S10 nicht erfüllen, die Anforderung der SIA 265/1 nur knapp nicht erfüllt wird (Diagramm 8).

Es wurde erwarten, dass die Untersuchungen zu den Zugfestigkeiten von Brettschichtholzlamellen positive Ergebnisse liefern. Die Festigkeitswerte, welche trotz anerkannter Sortierpraxis mit etablierten Kriterien erreicht werden, überraschen.

Mögliche Gründe für dieses unbefriedigende Ergebnis können sein:

- Die Modellannahme zur Bestimmung der Anforderungen bezüglich der Zugfestigkeit von  $14.5 \text{ N/mm}^2$  ist nicht korrekt.
- Ist das Prüfen einer Einzellamelle sinnvoll, wenn diese in einem BSH Binder verarbeitet wird und hier eine Systemwirkung zum Tragen kommt?
- Ist es eventuell nicht möglich mit den Sortierkriterien der DIN 4074 die gewünschte Lamellenqualität zu erreichen?



### 9.3 Weiteres Vorgehen

Jeder Betrieb kann auf Grund der erhaltenen Ergebnisse Sofortmassnahmen zur Verbesserung der Sortierung treffen. Bei den Ästen muss vor allem auf Seiten- und Flügeläste geachtet werden. Weiter besteht die Möglichkeit die Lamellen mit Mark nicht zu verarbeiten, obwohl diese in der Sortierklasse S10 zugelassen sind.

Auf Grund der Ergebnisse sind zusätzliche Untersuchungen unbestritten. Bisher wurde nur eine Lamellenqualität in einer Abmessung geprüft. Diese haben den Anforderungen der Norm nicht genügt. Das Ziel von weiteren Untersuchungen sollte sein:

- Die Sortierkriterien sollten überprüft werden. Dies bedeutet einen riesigen Forschungs- und Kostenaufwand.
- Untersuchungen an Lamellenpaketen, welche die "Gurte" von mittleren bis hohen BSH Trägern darstellen, können geprüft werden. Durch eine geeignete Prüfanordnung kann damit die Systemwirkung von 2 bis 3 Lamellen überprüft werden. Die vor längerer Zeit mit E.Gehri (Prof. em. ETHZ) diskutierten Ideen, welche die Prüfung von Gurtungen bestehend aus 2-3 Lamellen vorsah, werden damit aufgegriffen. Durch solche Versuche sollten die Gütesicherungsmaßnahmen im Industriebetrieb und deren Auswirkungen auf die Eigenschaften von BSH treffender untersucht werden können.
- Neben den Untersuchungen an Einzellamellen und Lamellenpaketen wäre zudem die Tragfähigkeit des Endproduktes (BSH-Träger) über Grossversuche nachzuweisen. Dies bedingt ebenfalls einen grossen Materialaufwand.
- Theoretische Untersuchungen könnten kombiniert mit den vorgängigen Massnahmen wesentlich zur Kostensenkung beitragen.

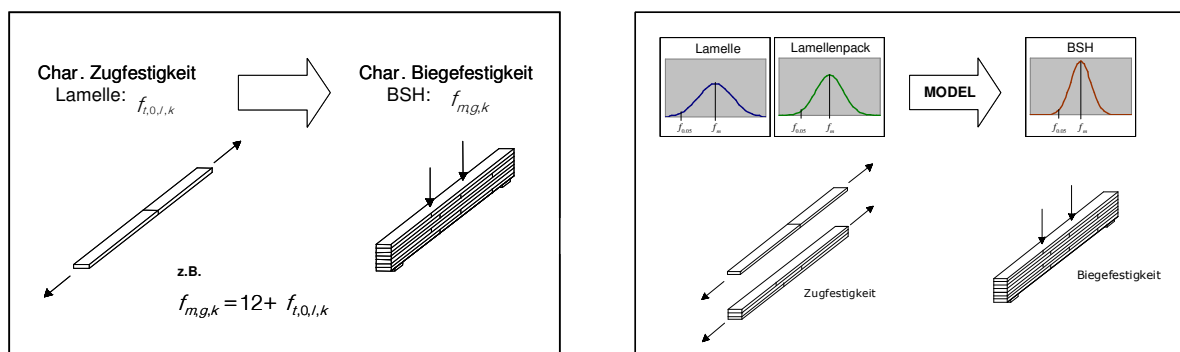


Abbildung 9: Mögliche Modellierung von Brettschichtholz

Theoretische Ansätze und Modellbetrachtungen wie in Abbildung 9 dargestellt, würden der Verbesserung des Verständnisses der Bruchursachen dienen. Verschiedene Parameter könnten variiert und deren Auswirkung auf die Festigkeit und Steifigkeit analysiert werden. Die Kombination von Lamellen unterschiedlicher Qualität könnte zuerst theoretisch erfasst und entsprechende Lamellenpakete im Laborversuch überprüft werden. Es wäre weiter möglich ganze BSH-Träger zu modellieren. Die festgelegten Anforderungen bezüglich Qualität der Lamellen, der Variation der Qualität innerhalb der Lamelle und des Lamellenstapels könnten anschliessend im Bauteil umgesetzt und deren Auswirkung im Grossversuch validiert werden. Damit könnten die kritischen Parameter bezüglich Festigkeit und Steifigkeit des Endproduktes erfasst, und BSH allgemein weiter optimiert werden. Es wäre möglich sicherheitsrelevante Aspekt (Zuverlässigkeitsanalyse) einzubringen.

## **10 Bestimmungen zu diesem Forschungsbericht**

Der Bericht wurde klassiert als: Gesperrt bis September 2006

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der HSB auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichtes oder Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der HSB.

Ein Original dieses Berichtes wird von der HSB für 5 Jahre aufbewahrt.

Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Projektleiters und des Projektverantwortlichen gültig.

### **10.1 Umfang des Forschungsberichtes**

Dieser Forschungsbericht besteht aus dem Titelblatt, dem Abstract und 39 Seiten exkl. Anhang.

Biel, 30.09.2004

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB, Burgdorf, Biel

## 11 Verzeichnisse

### 11.1 Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Verwendete Laboreinrichtungen .....  | 6  |
| Tabelle 2: Eigenschaften der Versuchskörper je Betrieb .....  | 6  |
| Tabelle 3: Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen an BSH Lamellen [Tabelle 11, SIA 265/1] ..... | 7  |
| Tabelle 4: Beispiel der aufgenommenen Lamellenparameter .....                                       | 8  |
| Tabelle 5: Festigkeitssortierung mittels Ultraschallgeschwindigkeit .....                           | 10 |
| Tabelle 6: Neueinstufung der Lamellen mit Festigkeit $< 14.5 \text{ N/mm}^2$ .....                  | 22 |

### 11.2 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Lamellenstapel bereit zur Prüfung .....                             | 6  |
| Abbildung 2: Flussdiagramm der Lamellenherstellung .....                         | 7  |
| Abbildung 3: Layout des Fotoprozesses .....                                      | 9  |
| Abbildung 4: Beispiel der Beschriftung der Lamellen .....                        | 9  |
| Abbildung 5: Bestimmen des dynamischen E-Moduls mittels Ultraschallmessung ..... | 10 |
| Abbildung 6: Lamelle mit montierten Wegaufnehmer in der Prüfmaschine .....       | 12 |
| Abbildung 7: Entfernen der Wegaufnehmer bei 45kN .....                           | 12 |
| Abbildung 8: Beispiel eines Prüfprotokolls .....                                 | 13 |
| Abbildung 9: Mögliche Modellierung von Brettschichtholz .....                    | 29 |

### 11.3 Diagrammverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Diagramm 1: Lognormal Verteilung der Bruchspannung; 5% - Fraktilwert mit einem Vertrauensbereich von 84.1%: $\sigma_{5\%,\text{Bruch}} = 13.23 \text{ N/mm}^2$ ..... | 16 |
| Diagramm 2: Bruchspannung - Feuchtigkeitsgehalt; Mittelwert der Lamellenfeuchtigkeit $u = 12.3\%$ der gesamten Stichprobe .....                                      | 17 |
| Diagramm 3: Dichte - Bruchspannung der gesamten Stichprobe, Mittelwert $\rho = 435 \text{ kg/m}^3$ .....   | 18 |
| Diagramm 4: Zug-E-Modul zu Bruchspannung der gesamten Stichprobe, Mittelwert der ganzen Stichprobe $E = 11570 \text{ N/mm}^2$ .....                                  | 19 |
| Diagramm 5: Feuchtegehalt - Bruchfestigkeit der Lamellen $< 14.5 \text{ N/mm}^2$ .....   | 20 |
| Diagramm 6: Dichte - Bruchfestigkeit der Lamellen $< 14.5 \text{ N/mm}^2$ .....  | 21 |
| Diagramm 7: Statischer E-Modul - Bruchfestigkeit der Lamellen $< 14.5 \text{ N/mm}^2$ .....  | 21 |
| Diagramm 8: Lognormal Verteilung der Bruchspannung; 5% - Fraktilwert mit einem Vertrauensbereich von 84.1%: $14.1 \text{ N/mm}^2$ .....                              | 23 |
| Diagramm 9: Vergleich der 5%-Fraktile der Zugfestigkeiten der Lamellen verschiedener Betriebe .....  | 24 |
| Diagramm 10: Vergleich der Anzahl Lamellen mit Zugfestigkeiten $< 14.5 \text{ N/mm}^2$ verschiedener Betriebe .....  | 24 |
| Diagramm 11: Anteil der Lamellen der Sortierklasse $< S10$ im Vergleich zu den Lamellen mit Zugfestigkeit $< 14.5 \text{ N/mm}^2$ .....                              | 25 |
| Diagramm 12: 5%-Fraktile und Streuung der Stichproben der Betriebe; Variationskoeffizient .....  | 26 |
| Diagramm 13: Mittelwert Zug-E-Modul - Streuung der Stichproben der Betriebe; Variationskoeffizient .....   | 26 |

**11.4 Literaturverzeichnis**

- [1] Borg Madsen, Structural Behaviour of Timber, DW Friesen Altona, Manitoba, Canada, 1992.
- [2] IBK, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Steiger René, Gehri Ernst, Arm Hanspeter, Einspannvorrichtung für Zugversuche an Holzproben größeren Querschnitts, Switzerland, 1993
- [3] IBOIS, école Polytechnique Fédérale de Lausanne, Prof. G Marchand, Statisch gesicherte Untersuchungen von Verformungskenngrößen biegebeanspruchter Bauteile aus Schweizer Holz, 1982
- [4] Graf, Henning, Stange, Wilrich, Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik, Springer Verlag Berlin, 1998
- [5] Gauch, Rüegsegger, Signer, Wisler, Untersuchung der Variation von BSH-Lamellen in Brett-längsrichtung, sowie die Sortierung von BSH-Lamellen ungenügender Qualität (unter 5%-Fraktile) und Bestimmung der Holzeigenschaften / Holzqualität, Semesterarbeit SS 2004 Fachbereich Holz





## **Anhang A: Data Sheet**





## **Anhang B: Einzelauswertungen der Betriebe**



## Anhang C: Lamellen-Auswahlverfahren

### Schritt 1: Zeitplan

Festlegung der Tage, an welchen die Lamellen entnommen werden. Maximal 10 Lamellen pro Tag dürfen aussortiert werden.

Die Auswahlperiode muss mindestens 2 Wochen, maximal 3 Wochen umfassen. Die Prüflamellen dürfen nicht direkt hintereinander gefertigt werden.

Firmenname: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Kontaktperson: \_\_\_\_\_

### Schritt 2: Beschreibung der ausgewählten Lamellen

Insgesamt müssen 55 Lamellen ausgewählt werden. Diese müssen folgende Merkmale aufweisen:

| Lamelle   | Eigenschaften  |
|---|--|
| Probenumfang  | 55 Lamellen  |
| Breite  | 160 mm   |
| Dicke   | 40 mm  |
| Länge   | 3000 mm  |
| Qualität  | S10  |
| Holzart   | Fichte   |
| Zinkung   | zufällig verteilt (es ist nicht zwingend notwendig, dass alle Lamellen eine Fingerzinkung enthalten) |
| Oberfläche  | vierseitig auf das Endmass 160/40 gehobelt   |
| Herkunft der Schnittware für die ausgewählten Lamellen (Verteilung Herkunft gemäss Umfrage) | ... % Schweiz<br>... % Ausland   |

### Schritt 3: Auswahl der Proben

Zufälliges Einfügen einer einzelnen, 3m langen Lamelle in die tägliche Produktionsliste. Siehe dazu auch die Produktionsliste im Anhang C / Modul 1 des Berichtes.

### Schritt 4: Entnahme

Die Proben werden an der geeignetsten Stelle in der Produktion entnommen.

### Schritt 5: Beschriftung der Lamelle

Die bereitgestellten Kleber (Anhang B / Modul 1) werden auf der oberen, sichtbaren Seite in der Mitte der Lamelle platziert. Zusätzlich ist die Nummer der Lamelle, welche auf dem Kleber vermerkt ist, auf die Lamelle selbst zu schreiben. Auf dem Kleber sind weiter das Datum und Holzlieferant anzugeben. Für den Holzlieferanten ist ein Symbol zu verwenden. Die Symbolbeschreibung hat separat zu erfolgen.

### Schritt 6: Lagerung

Die Lamellen sind im Lamellenlager mit einer Plastikfolie abgedeckt aufzubewahren.

### Schritt 7: Information der SH-Holz

Die SH-Holz ist zu informieren, sobald die Probennahme abgeschlossen ist.

\_\_\_\_\_  
Signatur

\_\_\_\_\_  
Datum