

Berner Fachhochschule

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB
Burgdorf, Biel

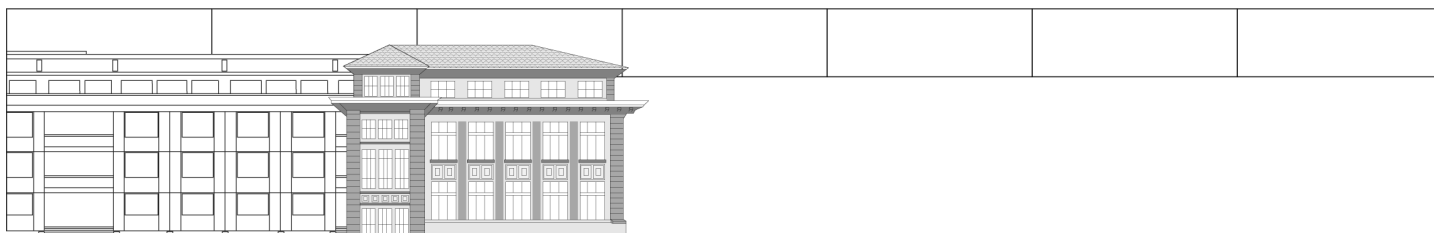
Abteilung F+E

Forschungsbericht

Schlussbericht

Duktiles Brettschichtholz

Bericht Nr.	2642-SB-01
Auftrag Nr.	2642.HB
Klassifizierung	Öffentlich
Gegenstand	Entwicklung eines Klebstoffes für duktilwirkende BSH Balken
Datum	25.03.2004



Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt, Wald und lands Herr Michael Gautschi Papiermühlestrasse 172 3063 Ittigen
Adresse der Forschungsstelle	Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB Abteilung F+E, Holzbau und Bautechnik Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391

Projektleiter Isabel Engels

Projektverantwortlicher Dr. Maurice Brunner

HSB
www.hsb.bfh.ch

ABSTRACT

The project presented in this report is an unusual, very original one. Generally speaking, ductility is not a characteristic of structural, laminated timber beams, these being rather rigid structures, this rigidity being considerably accrued by the use of very rigid, very highly cross-linked adhesives and glue lines. In standard structural timber structures, to talk of increased ductility may sound as anathema, in an industry which has now been used to the traditional rigid structure for many decades. However, the concept of increasing ductility of the glue-line and of the timber beam bonded with it is not an idle thought. This is not science fiction, the idea being supported by the very much improved distribution of stress that introduction of a certain level of ductility would entail. Indeed, scientific principles in adhesion attest of the feasibility of such a technical development. In short, ductile systems, if not excessive, should yield better strength, and allow lower section elements to do the same structural work. There is then everything to be gained in exploring for timber such an unusual, countercurrent concept.

This report underlines the first tentative step in achieving such a goal. And what a step this was: the concept was demonstrated to be valid indeed. A good balance of properties, namely sufficient ductility was introduced to yield exciting, positive results without any excess of this property which could bring any problem. Thanks for this initial development are due to the formulation of a very special adhesive as a "ductility medium", to Geistlich Ligamenta AG, Schlieren, Switzerland, for the costly work of developing several possible adhesive mixes, this was applied

chemistry at its best, to Prof. Brunner, with the modest support of the undersigned, for the introduction of such an innovative concept, and to HSB for the promising project results and the considerable work that went in obtaining them. Last but definitely not least, the greatest thanks must go to BUWAL, Bern, without the financial support of which this exceptional development would not have been possible.

Of course, as complete and exciting this project was, it constitutes just the initial step of the process as more clarification is needed in follow-up projects before final technical and commercial success can be assured. The rewards for this, however, are great indeed: from allowing lower section wood elements to do the same structural work to greater span possible for same size structural elements and many other applications, some I am sure even unthought of today. It has indeed been very exciting to be part of the team of this project, as all the other team member surely agree. May the future of this development be as bright as it promises to be.

A.Pizzi
Epinal
28-5-2004

Keywords:

INHALTSVERZEICHNIS**Aktualisieren**

1	EINLEITUNG	3
1.1	Ausgangslage	3
1.2	Zielsetzungen	3
1.3	Projektbeteiligte	4
1.4	Vorgehensweise	4
2	DER THEORETISCHE HINTERGRUND	6
2.1	Baurelevanz der Duktilität	6
2.2	Abgrenzung des neuen Trägersystems zum zusammengesetzten Querschnitt mit nachgiebigem Verbund	6
2.3	Abweichung von der klassischen Theorie des Tragverhaltens der Klebstoffe	8
2.4	Mögliches Tragverhalten im plastifizierten Bereich Zusammenfassung der Anforderungen an den Spezialklebstoff	8
2.5	Erste Schätzung der erforderlichen "Fließgrenze" $f_{v,v}$ des Spezialklebstoffes	10
3	KLEBSTOFFAUSWAHL	12
3.1	Vorbemerkung	12
3.2	Methodik	13
3.3	Versuchsergebnisse	14
3.4	Auswertung und Interpretation der Resultate der Zug-Scher-Versuche	17
4	BIEGEVERSUCHE	20
4.1	Zweck der Biegeversuche	20
4.2	Vorbereitung der Prüfkörper	20
4.3	Versuchsaufbau und -ablauf	20
4.4	Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeversuche	22
4.5	Ergebnisse des Klebstoff-Nr. 91	24
4.6	Rückvergleich der Prüfgeschwindigkeiten	26
5	RECHNERISCHE ÜBERPRÜFUNG DER BIEGEVERSUCHE	27
5.1	Übersicht	27
5.2	Belastungsgeschwindigkeiten der Versuche	27
5.3	Berechnung der Steifigkeit des Trägersystems über das Gamma-Verfahren	28
5.4	Biegezugwiderstand	29
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN	31
6.1	Allgemeines	31
6.2	Projekterkenntnisse	31
6.3	Noch offene Fragen	31
6.4	Das weitere Vorgehen	32
7	BESTIMMUNGEN ZU DIESEM FORSCHUNGSBERICHT	33
7.1	Umfang des Forschungsberichtes	33
8	VERZEICHNISSE	34
8.1	Tabellenverzeichnis	34
8.2	Abbildungsverzeichnis	34
8.3	Literaturverzeichnis	35

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In Anlehnung an die Eurocodes wird in den neuen Tragwerksnormen der SIA der Duktilität ein grosser Stellenwert eingeräumt. In der Betonbaunorm SIA 262 z.B. werden strengere Auflagen für den Betonstahl verlangt, um dieser Anforderung zu genügen.

In der Baupraxis werden in der Regel Rechteck-Querschnitte für Holzbalken eingesetzt. Weniger weit verbreitet sind die statisch effizienteren Steg- und Kastenträger. Der Holzbalken mit symmetrisch aufgebautem Querschnitt weist bei der zentralen Baustoffeigenschaft der Duktilität erhebliche Defizite auf und wird in allen internationalen Normen als spröder Baustoff behandelt.

Für spezielle Aufgaben haben vereinzelt Forscher und Firmen versucht, das Tragverhalten von Holzbalken zu verbessern. In Nordamerika verkauft die Firma "FIRP Reinforcement Technology" [1] seit über 20 Jahren Holzbalken, die auf der spröden Biegezugseite durch Aufklebung hochfester Kunststofflamellen verstärkt werden. Das Prinzip hierzu ist relativ einfach: Das Holz weist ein unterschiedliches Tragverhalten je nach Beanspruchung auf: Auf Druck ist Holz ausgesprochen duktil, auf Zugbeanspruchung hingegen sehr spröde. Wird die spröde Biegezugseite verstärkt, so kann die duktile Biegedruckseite "fliessen", bevor die Zugseite plötzlich versagt. Der Holzbalken verhält sich duktil.

Im vorliegenden Projekt geht man einen innovativen Weg. Man setzt auf den Einsatz von einem Spezialklebstoff für die Herstellung von duktilen Holzträgersystemen. Bei kleinerer Belastung sind die Biegespannungen linear über dem Balkenquerschnitt verteilt. Bei sehr grosser Belastung im Bruchbereich sollen die Klebstofffugen der Decklamellen oben und unten "fliessen" und dadurch die Decklamellen vor einem weiteren Spannungszuwachs schützen. Die zusätzlichen Spannungen müssen dann von den Nachbarlamellen aufgenommen werden. Die Spannung verteilt sich nicht mehr linear sondern blockartig über dem Querschnitt - wie beim duktilen Baustahl.

1.2 Zielsetzungen

Das Hauptziel des Projektes ist es, einen Spezialklebstoff für die Herstellung von einem duktilen Holzträgersystem zu finden. Die Fließgrenze muss so bestimmt werden, dass eine ausreichende Sicherheit vor dem Holzversagen gewährleistet ist. Steigt die Spannung in den beiden äussersten Lamellen auf die Fließgrenze des Klebstoffs an, beginnt dieser zu fließen und kann keine Kraft mehr weitergeben. Daraufhin steigt die Spannung in der darüberliegenden Lamelle. So können die Spannungen auf der Zugseite von einer dreieckförmigen in eine blockartige Verteilung umgelagert werden (Abbildung 1).

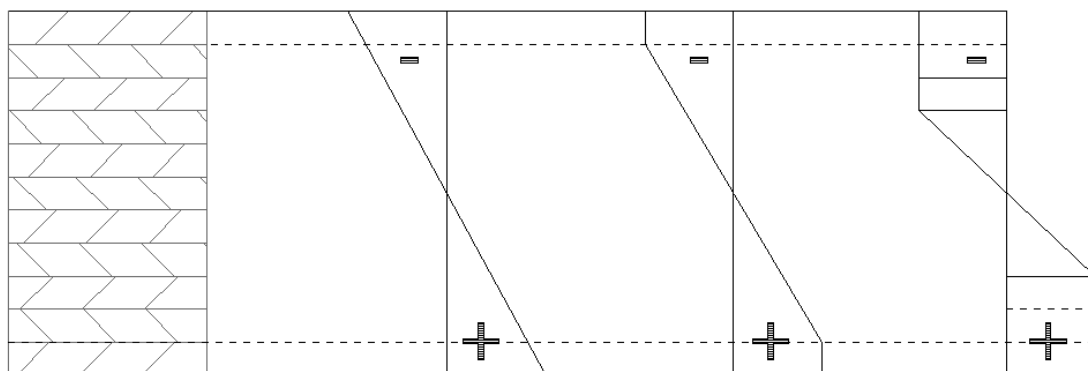


Abbildung 1: Umverteilung der Biegespannungen durch sukzessives "Fließen" der Klebstofffuge

Die Industrie hat Klebstoffe mit den unterschiedlichsten Eigenschaften entwickelt. Davon werden bisher in der Holzindustrie nur relativ einfache, "steife" Klebstoffe verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Machbarkeit der Entwicklung eines nachgiebigeren Klebstoffes überprüft.

1.3 Projektbeteiligte

Projektleitung HSB:

Projektverantwortung:

Dr. Maurice Brunner

Prof. für Baustatik und Konstruktion an der HSB, Biel

Projektleitung:

Isabel Engels

Bereichsleiter Holzwerkstoffe:

Dr. Frédéric Pichelin

Industriepartner Geistlich Ligamenta AG

Geschäftsleitung:

Dr. Martin Geistlich

Geschäftsführer

Leiter R+D:

Urs Fankhauser

Unabhängige Experten

Prof. Dr. A. Pizzi, Prof. für Klebstofftechnologie

EPINAL, Nancy, France

Dr. Balz Gfeller

Prof. für Holztechnologie an der HSB, Biel

1.4 Vorgehensweise

Der Projektablauf bzw. dessen Inhalt lässt sich in folgende Phasen unterteilen, welche sich ihrerseits in mehrere Aktivitäten gliedern.

Projektphase 1: Theoretische Grundlagen

Es werden theoretischen Überlegungen dargestellt, um die idealisierte Funktionsweise eines duktilen Holzträgersystems zu erklären. Die Abgrenzung zu bisher bekannten, ähnlichen Tragkonzepten wird gezogen. Es werden die erforderlichen Materialeigenschaften geklärt werden, damit das erwünschte duktile Tragverhalten möglich wird.

Projektphase 2: Klebstoffauswahl

In den Labors des Industriepartners Geistlich Ligamenta AG werden mehrere Klebstoffformulierungen untersucht und eine Auswahl getroffen. Mit diesen werden kleine Holzteile verbunden und die Prüfkörper auf Zug-Abscheren parallel zur Stabachse getestet. Die Kraft-Deformations-Kurven werden hinsichtlich duktilem Tragverhalten analysiert.

Als Endergebnis dieser Arbeitsphase soll durch Ausscheiden der ungünstigeren Resultate die Anzahl der interessanten Klebstoffformulierungen erheblich reduziert werden.

Parallel zu den Laborarbeiten mit den Klebstoffen wird ein Berechnungsverfahren für die Auswertung der Versuchsergebnisse entwickelt.

Projektphase 3: Biegeversuche und

Die Klebstoffmischungen, welche die besten Resultate in den Zug-Scher-Versuchen ergeben, werden weiter verwendet, um (kleine) BSH-Balken für Biegeversuche herzustellen.

Die Messresultate der Versuche werden mit den Ergebnissen aus den Berechnungen verglichen zur erneuten Anpassung und Einstellung des Klebstoffes.

Nachfolgeprojekte

Die Formulierung des weiteren Vorgehens, z.B. im Sinne von möglichen Nachfolgeprojekten, ist ein wichtiger Bestandteil der Machbarkeitsstudie.

2 Der Theoretische Hintergrund

2.1 Baurelevanz der Duktilität

Abbildung 2 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Diagramme von einem ideal-duktilen Baustoff wie Baustahl und von einem ideal-spröden Baustoff wie Gusseisen. Beide Baustoffe weisen einen anfänglich linearen Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Diagramme auf. Der wichtigste Unterschied liegt beim Bruchverhalten: während das Gusseisen plötzlich versagt, wenn die Zugfestigkeit erreicht wird, weist der duktile Baustahl eine sehr grosse Deformation bei gleichbleibender Spannungsgrosse auf.

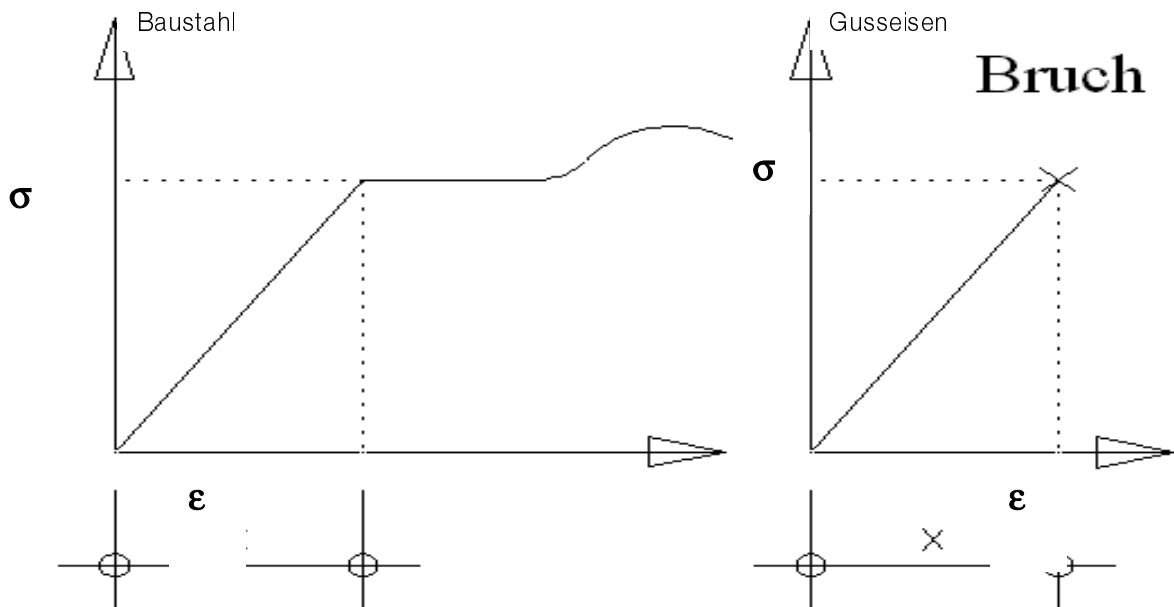


Abbildung 2: Spannungs-Dehnungs-Verläufe von einem duktilen (Baustahl) und einem spröden (Gusseisen) Baustoff

Aus folgenden Gründen wird in der Baupraxis die Duktilität sehr geschätzt:

Duktile Baustoffe "kündigen" den bevorstehenden Bruch an. Durch die sehr grossen Deformationen sind die Benutzer gewarnt und können reagieren.

Die Duktilität ist ein sehr effizientes Mittel für die Verteilung von ausserordentlich grossen, örtlich angreifenden Belastungen. Rast z.B. ein Flugzeug in ein Kernkraftwerk, so sind die örtlichen Betonbewehrungen schnell überbelastet und geben nach. Sie versagen aber noch nicht und bieten nach wie vor einen gewissen Widerstand. Die übermässig grossen Deformationen zwingen die Nachbarbewehrungen auf, die ausserordentliche Belastung mitzutragen.

Im Bruchzustand sind die Biegespannungen blockartig über dem Querschnitt verteilt: Der Biege Widerstand ist somit erheblich grösser als bei einem spröden Material mit gleicher nomineller Festigkeit (Abb. 2).

2.2 Abgrenzung des neuen Trägersystems zum zusammengesetzten Querschnitt mit nachgiebigem Verbund

In diesem Projekt setzt man auf den Einsatz eines "duktilen" Spezialklebstoff für die Herstellung von Brettschichtholz. Das gewünschte, idealisierte Tragverhalten ist in der Abb. 1 dargestellt: Bei kleinerer Belastung sind die Biegespannungen linear über dem Balkenquerschnitt verteilt. Bei sehr grosser Belastung im Bruchbereich werden die Klebstoffugen der Decklamellen oben und unten "fliessen" und dadurch die Decklamellen vor einem weiteren Spannungszuwachs schützen. Die zusätzlichen Spannungen müssen dann von den Nachbarlamellen aufgenommen werden.

Das idealisierte Tragverhalten des duktilen Trägersystems ist nicht gleich zu setzen mit dem klassischen Gedankenmodell eines zusammengesetzten Querschnittes mit nachgiebigem Verbund (Abbildung 3).

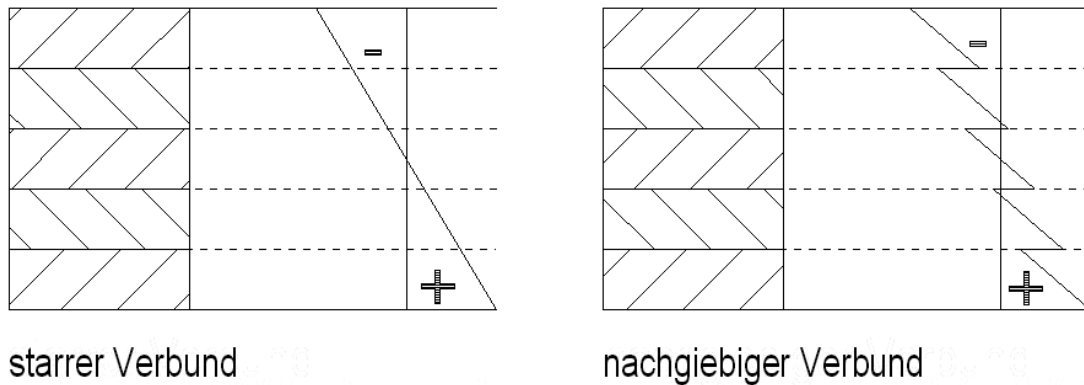


Abbildung 3: Der klassische, zusammengesetzte Querschnitt

Nachgiebig verbunden Querschnitte

In der Holzbranche werden manchmal verschiedene Elemente mit Verbindungsmitteln (Nägeln, Schrauben) verbunden. Bei Biegebelastung werden die einzelnen Elemente sowohl auf Biegung wie auf Normalkraft beansprucht. Abhängig von der Wahl der Verbindungsmittel und deren Anzahl ist der Verbund unterschiedlich steif bzw. nachgiebig. Je steifer der Verbund, desto grösser werden die Anteile der Normalkraft und desto kleiner die Biegeanteile. Beim steifen Verbund, wie das beim Kleben der Fall ist, werden die einzelnen Elemente praktisch nur noch durch Normalkräfte beansprucht: Der Tragwiderstand ist gleich hoch wie beim massiven Querschnitt. Beim nachgiebigen Verbund werden die Anteile der Normalkräfte kleiner, während die Biegung der einzelnen Elemente sehr gross wird: Im ungünstigsten Fall bei lose aufeinander gelegten Bretter gibt es kleine Normalkraftanteile und die Biegebeanspruchung der einzelnen Bretter ist sehr hoch, der Tragwiderstand relativ klein. Der nachgiebige Verbund hat sich als statischer Nachteil erwiesen und bei grösserer Belastung wird die starre Verbindung der einzelnen Teile durch z.B. Kleben bevorzugt.

Duktiles Trägersystem

Im zusammengesetzten Querschnitt sind bei Belastung vom Anfang an alle Fugen nachgiebig. Im Gegensatz dazu, sollen beim vorgeschlagenen, duktilen Trägersystem der Abbildung 1, bei kleinerer Belastung alle Fugen steif sein: erst bei sehr grossen Belastungen im Bruchbereich geben zunächst die äusseren Fugen nach, dann sukzessiv die innenliegenden Fugen nacheinander.

2.3 Abweichung von der klassischen Theorie des Tragverhaltens der Klebstoffe

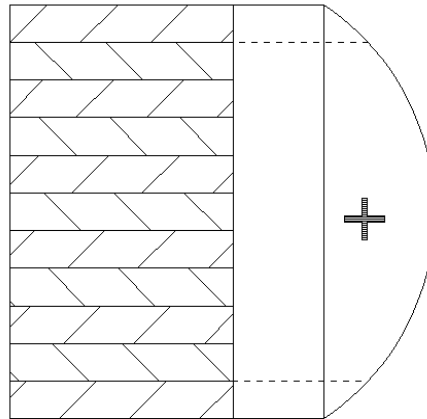


Abbildung 4: Schubbeanspruchung der Klebstoffuge gemäss der klassischen Theorie

Gemäss der klassischen Theorie werden in der dünnen Klebstoffuge in der Regel nur die Schubspannungen als relevante Beanspruchung betrachtet. Im Holzbalken mit Rechteckquerschnitt treten die grössten Schubspannungen in Balkenmitte auf. Für das neue Trägersystem müsste dementsprechend bei sehr grossen Belastungen die Klebstoffuge in Balkenmitte zuerst nachgeben. Dies widerspricht jedoch dem idealisierten Tragverhalten der Abbildung 1, wo die äusseren Klebstoffugen zuerst nachgeben sollten.

Der Spezialklebstoff muss dementsprechend nicht nur auf Schubspannungen reagieren sondern und vorallem auch auf die Grösse der Biegespannungen, damit sich das duktile Tragkonzept einstellen kann

2.4 Mögliches Tragverhalten im plastifizierten Bereich Zusammenfassung der Anforderungen an den Spezialklebstoff

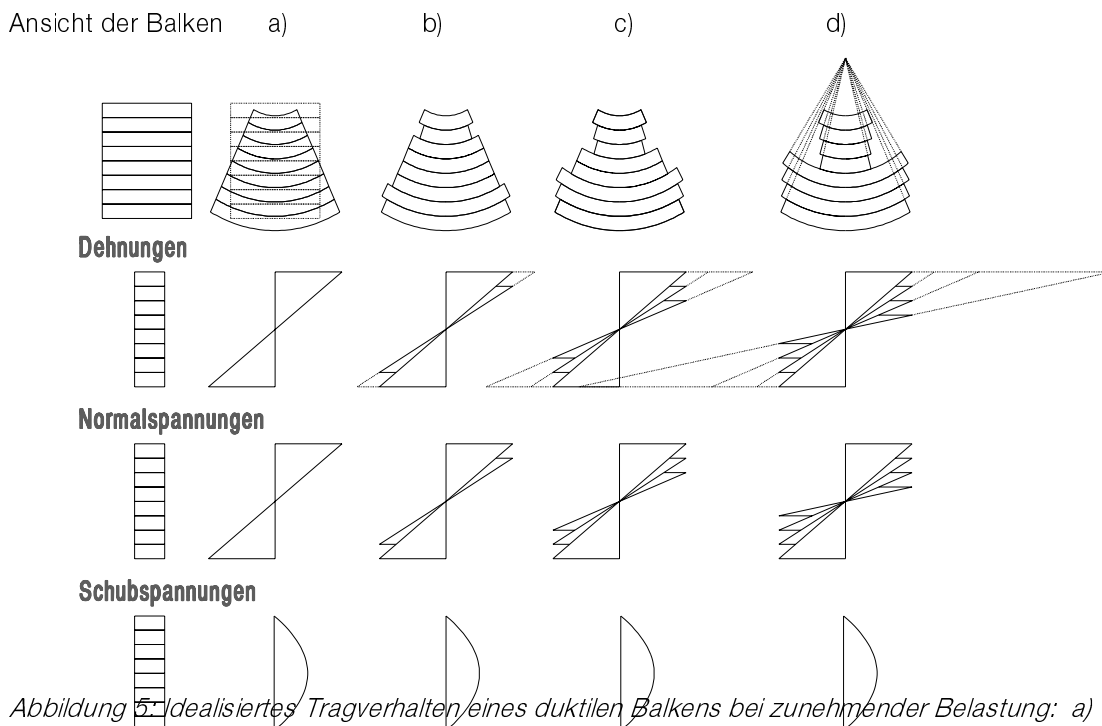


Abbildung 5: Idealisiertes Tragverhalten eines duktilen Balkens bei zunehmender Belastung: a) Elastisch, b+c) Ablauf der Plastifizierung, d) Vollständig plastifiziert

Bei Biegebeanspruchung treten in einem einfach gelagerten Balken Druckspannungen oben im Querschnitt und Zugspannungen unten. Die Abbildung 5 zeigt das idealisierte Tragverhalten eines duktilen Holzbalkens bei zunehmender Belastung:

- Ganz oben rechts vom Querschnitt wird die Ansicht in Längsrichtung des Balkens resp. der einzelnen Lamellen gezeichnet.
- Unterhalb der Ansicht sind die Dehnungen dargestellt
- Ganz unten die Normalspannungen

Bei relativ kleinen Belastungen im Gebrauchszustand ist das Tragverhalten vollständig elastisch (Bilder a) der Abbildung 5). Die Dehnungen der Holzlamellen verlaufen linear, wenn man die Ansicht des Balkens in Längsrichtung betrachtet. Die Spannungen sind linear über dem Querschnitt verteilt: Druck oben, Zug unten.

Die Bilder b) und c) der Abbildung 5 zeigen den Zustand bei zunehmender Plastifizierung der äusseren Lamellen. In diesen äusseren Lamellen ist die Fließgrenze des Klebstoffes erreicht: Die Deformationen in den Klebstoffugen werden überproportional gross, während in den äusseren Holzlamellen die Spannungen und damit auch die Dehnungen begrenzt bleiben. Die äusseren Lamellen auf der Zugseite haben somit alle die gleiche Länge, und auch der Druckseite sind die äusseren Lamellen auch gleich lang. In den mittleren Lamellen herrscht noch elastische Zustände: the Dehnungen und die Spannungen im Holz verlaufen linear verteilt über dem Querschnitt.

Die Bilder d) der Abbildung 5 zeigen den vollständig plastifizierten Zustand. Oberhalb der neutralen Achse sind alle verkürzten Drucklamellen gleich lang und weisen die gleiche Druckspannung auf, während in der unteren Hälfte alle Lamellen um den gleichen Betrag verlängert wurden und die gleiche Zugspannung aufweisen. Das oberste Bild rechts zeigt, dass genau in der neutralen Achse die Klebstoffuge eine sehr grosse Scherdehnung aufweist.

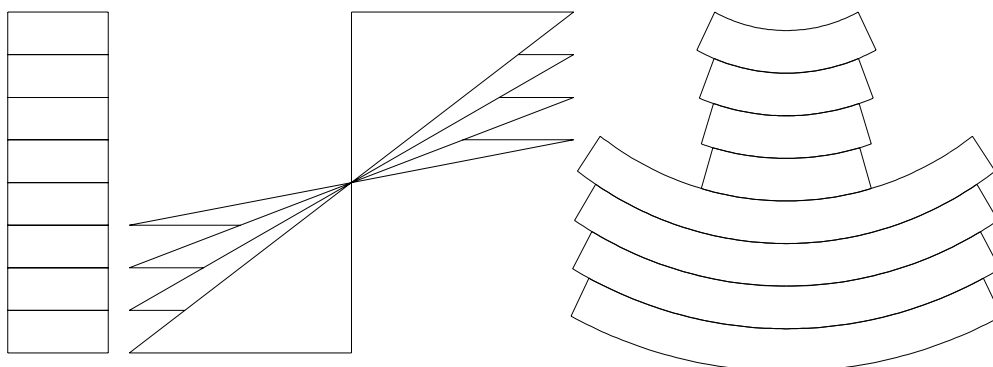


Abbildung 6: Die grosse Scherung in der neutralen Achse bei der vollständigen Plastifizierung des Querschnittes

Die oben erwähnte, sehr grosse Scherdehnung in der Klebstoffuge der Blakenmitte (Abbildung 6) könnte dazu führen, dass es für die praktische Umsetzung vom Interesse sein könnte, einen mittleren Bereich frei von Plastifizierungseffekten zu halten, um die Scherdehnung über mehrere Klebstoffugen aufzuteilen und damit die Querkraftaufnahme zu gewährleisten (Abbildung 7).

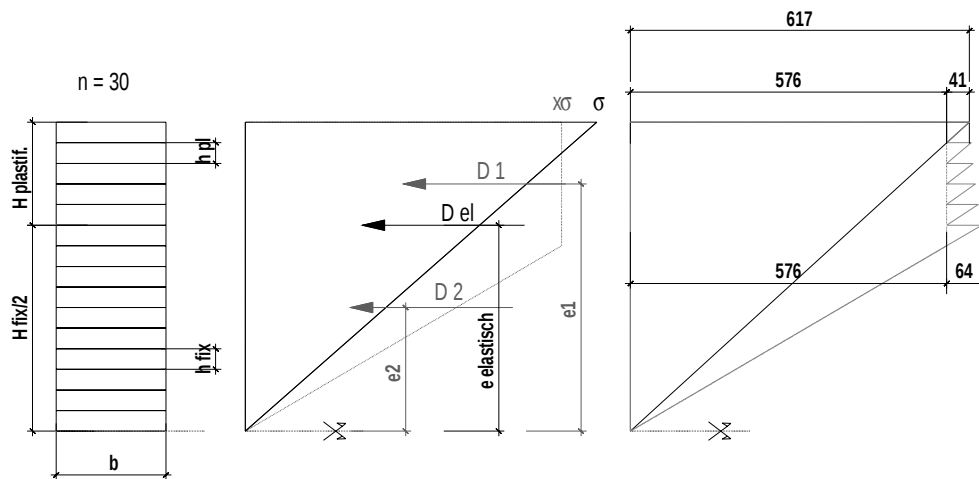


Abbildung 7: Mögliche Begrenzung der Klebstoff-Plastifizierung auf die äusseren Holzlamellen

Die oben aufgeführten Ideen bedürfen in einem möglichen Nachfolgeprojekt eingehende Abklärungen.

2.5 Erste Schätzung der erforderlichen "Fließgrenze" $f_{v,v}$ des Spezialklebstoffes

Damit sich das neue Trägersystem so duktil verhält, wie in der Abbildung 1 dargestellt, müssen folgende Anforderungen an den Klebstoff gestellt werden:

Der Klebstoff muss ein duktileres Tragverhalten aufweisen (Abbildung 8): das Kraft-Deformations-Verhalten muss anfänglich wie beim klassischen, steifen Klebstoff für BSH linear verlaufen. Beim Erreichen einer bestimmten Belastung muss der Klebstoff ein Fließverhalten aufweisen: die Kraft bleibt konstant, während die Deformation sehr stark zunimmt.

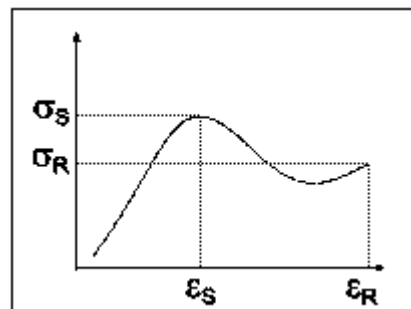


Abbildung 8: idealisiertes Tragverhalten des Spezialklebstoffes für das duktile Trägersystem

Die Grösse der erforderlichen "Fließgrenze" $f_{v,v}$ ist Gegenstand dieser Untersuchungen. Eine erste, grobe Schätzung wird im folgenden Kapitel besprochen.

Der Klebstoff muss nicht nur auf die Schubspannungen reagieren, sondern er muss vorallem auch auf die Grösse der Biegespannungen im Holzquerschnitt reagieren können. Möglicherweise kann diese Anforderung durch Verwendung einer dickeren Klebstoffuge erfüllt werden. Wie im Abschnitt 2.4 erklärt, muss, damit sich das erwünschte Tragverhalten einstellt, der neue Klebstoff nicht nur auf die Grösse der Schubspannungen reagieren, sondern auch auf die Höhe der Normalspannungen. Die rechnerischen Zusammenhänge müssen entwickelt werden, damit ein vollständigeres Bild der Anforderungen an den Klebstoff und die erforderlichen Prüfverfahren abgeleitet werden. In diesem Abschnitt soll, in Anlehnung an die bisherigen Prüfverfahren für Klebstoffe, ein erster Schritt zur Charakterisierung des Klebstoffes gemacht werden.

Es wird angenommen, dass der Klebstoff auf Abscheren ein duktileres Tragverhalten aufweist. Gesucht wird eine Schätzung der "Fließgrenze", die Grösse der Schubspannung also, wo die Deformationen sehr gross werden (Abbildung 10). Für das Funktionieren des Tragkonzeptes muss die "Fließgrenze" erreicht werden, um die Spannungen umzuverteilen, bevor das Holz auf Biegezug versagt. Andererseits darf die Fließgrenze nicht zu klein gewählt werden, da sonst die Querkraftaufnahme zum Problem werden kann.

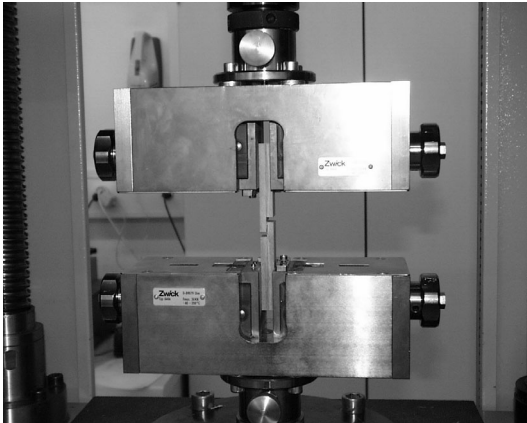


Abbildung 9: Zug-Scherversuch, um das Tragverhalten eines Klebstoffes zu charakterisieren

Kraft F_s

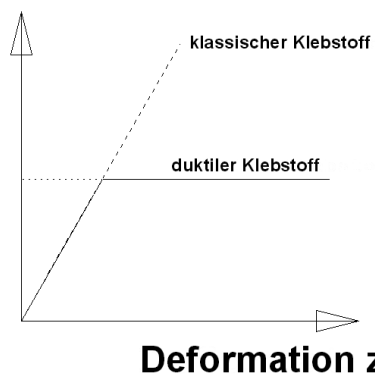


Abbildung 10: Idealisiertes Spannung-Deformations-Verhaltens des Spezialklebstoffes

Man betrachte den Fall des in der Baupraxis häufig vorkommenden, einfach gelagerten Balkens der Spannweite L und gleichmässig verteilter Belastung q kN/m' (Abbildung 11). Die maximalen Werte der Schnittkräfte sind:

$$M_{\text{MAX}} = q \cdot L^2 / 8$$

$$V_{\text{MAX}} = q \cdot L / 2$$

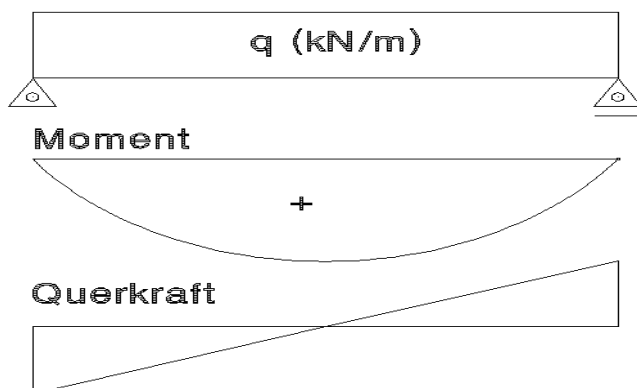


Abbildung 11: Schnittkraftverläufe im einfachen Balken mit Gleichlast

Im Holzbau wird häufig ein Rechteckquerschnitt verwendet: Breite b , Höhe h . Die Berechnung erfolgt aufgrund der Elastizitätstheorie. Das Biegemoment erzeugt Normalspannungen:

$$\sigma_{\text{MAX}} = \pm M / W = \pm (q \cdot L^2 / 8) / (b \cdot h^2 / 6) = \pm 0.75 \cdot q \cdot L^2 / (b \cdot h^2)$$

Die Querkraft ihrerseits erzeugt die folgende, maximale Schubspannung:

$$\tau_{\text{MAX}} = 1.5xV/A = 1.5 \cdot (q \cdot L/2)/(b \cdot h) = 0.75 \cdot q \cdot L/b \cdot h$$

Daraus ergibt sich das folgende Verhältnis:

$$\tau_{\text{MAX}} / \sigma_{\text{MAX}} = h/L$$

In der Praxis des Holzbaus ist dieses Verhältnis häufig in der folgenden Grössenordnung:

$$\tau_{\text{MAX}} / \sigma_{\text{MAX}} = h/L = 1/20 = 0.050$$

In der Tabelle 6 der SIA 265 Holzbau sind die Bemessungswerte der Biegefestigkeit $f_{m,d}$ und Schubfestigkeit $f_{v,d}$ für Brettschichtholz aufgeführt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Festigkeitswerte des Brettschichtholzes gemäss Norm SIA 265

FESTIGKEITSKLASSE:	GL 24	GL 28	GL 36
Biegefestigkeit $f_{m,d}$ N/mm ²	16	18.5	24
Schubfestigkeit $f_{v,d}$ N/mm ²	1.8	1.8	1.8
Verhältnis $f_{v,d} / f_{m,d}$	0.113	0.097	0.075

Das in der Tabelle 1 dargestellte Verhältnis der Schubfestigkeit zur Biegefestigkeit ist wesentlich höher als das Verhältnis der Beanspruchungen ($\tau_{\text{MAX}} / \sigma_{\text{MAX}}$) des klassischen, einfach gelagerten Balkens. Für die Bemessung eines Holzbalkens ist selten die Schubfestigkeit massgebend.

Damit ist klar, dass die Fließgrenze des Spezialklebstoffes tiefer liegen kann, als die bisher vorgegebenen Werte der Schubfestigkeit von Holz, ohne dass die Schubbeanspruchung für die Bemessung ausschlaggebend ist. Für die häufig verwendete Festigkeitsklasse GL 24 kann der Bemessungswerte der Fließgrenze bzw. Schubfestigkeit des Klebstoffes auf folgenden Wert reduziert werden:

$$f_{y,d} \Rightarrow (h/L) \cdot 0.113 \cdot 1.8 = 0.796 \text{ N/mm}^2$$

Der für Laborversuche relevante 5% - Fraktilwert kann wie folgt festgelegt werden:

$$f_{y,k} = 1.5 \cdot f_{y,d} = 1.195 \text{ N/mm}^2$$

Mittelwert:

$$3.0/2.25 \cdot f_{y,d} = (3.0/2.25) \cdot 1.195 \text{ N/mm}^2 = 1.593 \text{ N/mm}^2$$

Eine weitere Reduzierung ist möglich, wenn man die günstigere Verteilung der Schubspannungen im plastifizierten Querschnitt mitberücksichtigt.

3 Klebstoffauswahl

3.1 Vorbemerkung

Die Chemieindustrie hat verschiedene Techniken entwickelt, um die Eigenschaften der modernen Klebstoffe zu verändern resp. anzupassen. Hierfür sind neben der chemischen Zusammensetzung der Klebstoffe auch der Typ und die Anordnung der Kettenlänge sehr wichtig. Neben der chemischen Zusammensetzung spielt auch die Dicke der Klebstofffuge eine wichtige Rolle bei der Festigkeit und beim Verformungsverhalten.

Im Abschnitt 2 wurde besprochen, dass der Klebstoff gewisse Anforderungen hinsichtlich des Tragverhaltens erfüllen muss, damit sich beim neuen Holzträgersystem das gewünschte duktile Tragverhalten einstellen kann. Nicht nur das Tragverhalten hinsichtlich Scherfestigkeit, sondern auch das Tragverhalten bei Dehnungen resp. Zug- oder Druckspannung könnte ausschlaggebend sein.

Im Prinzip müssten die Klebstoffmischungen nicht nur auf Scherfestigkeit, sondern auch auf Zug-/Druckverhalten geprüft werden. Holzklebstoffe werden in der Regel nur auf Scherfestigkeit geprüft. Im Rahmen der Voruntersuchung wird vorerst ein Schwerpunkt auf das Tragverhalten beim

Abscheren gelegt, weil es hierfür Prüfnormen gibt und der Vergleich mit herkömmlichen Klebstoffen erleichtert wird.

3.2 Methodik

Der Industriepartner Geistlich Ligamenta AG hat Polyurethan-Klebstoffmischungen hergestellt. Von den ca. hundert erfolgreich hergestellten Mischungen werden in der Tabelle 2 sechs ausgewählte Klebstoffmischungen näher beschrieben.

Tabelle 2: Beschreibung der Klebstoffmischungen

Klebstoffmischung	Zusammensetzung	Vergleich mit Klebstoff
Nr. 36	Basis: MDI-Präpolymere mit höhermolekularen Anteilen	Der höhermolekulare Anteil hat ein geringeres Molekulargewicht als in den Formulierungen 39 und 40.
Nr. 39	Basis: MDI-Präpolymere mit höhermolekularen Anteilen	Die Klebstoffe 39 und 40 unterscheiden sich nur bezüglich des Verhältnisses nieder- zu höhermolekularem Präpolymer
Nr. 40	Basis: MDI-Präpolymere mit höhermolekularen Anteilen	
Nr. 51	Basis: MDI-Präpolymer	
Nr. 64	Basis: MDI-Präpolymere mit modifizierter MDI-Komponente	Niedrigviskös eingestellt
Nr. 91	Basis:	

Kleine Holzteile aus fehlerfreier Buche wurden mit den verschiedenen Klebstoffmischungen verbunden. Getestet wurden die Klebstoffmischungen in Zug-Scher-Versuchen mit Fugenstärke von 0mm (mit Pressdruck), 0.5mm, 1.0mm und 3.0mm. Ausnahmsweise wurde der nachträglich entwickelte Klebstoff Nr. 91 in Zug-Scher-Versuchen mit den Klebstoffugen 0.5mm und 1.0mm geprüft.

Die Druck-Scher-Versuche wurden in den Labors der Geistlich Ligamenta AG durchgeführt. Die Abbildung 12 zeigt den Versuchsaufbau. Die Holzteile hatten eine Länge von 50mm und einen rechteckigen Querschnitt von 20x20mm. Damit die Kraft zentrisch auf die Klebstofffuge wirkt, wurde in Bereich der Klebfläche der Holzquerschnitt auf 10x20mm über eine Länge von 10mm verkleinert. Bei der Prüfung wurden die Kraft und die zugehörige Scherdeformation gemessen.

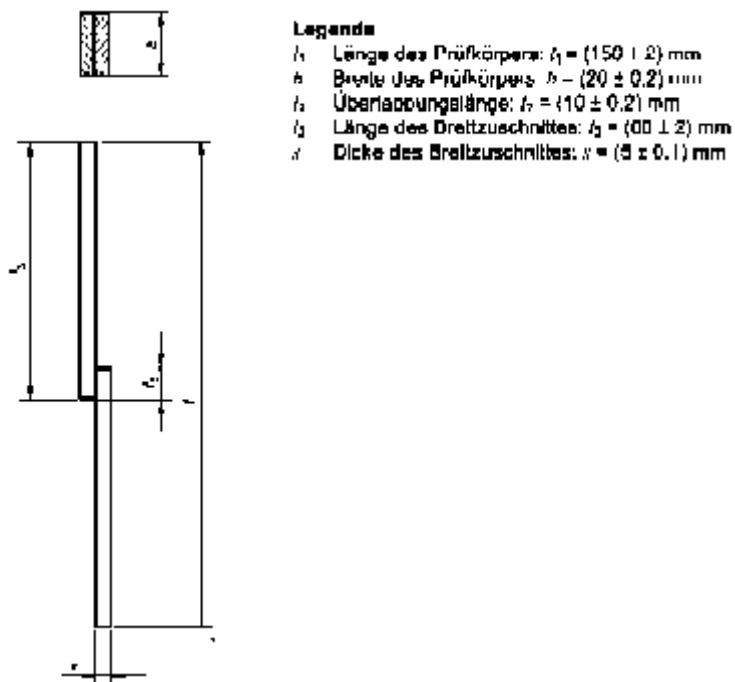


Abbildung 12: Versuchsaufbau der Zug-Scher-Prüfkörper gemäss EN 205: Anhang A

3.3 Versuchsergebnisse

Von den sehr vielen Klebstoffmischungen, die getestet wurden, werden exemplarisch die Resultate von 6 Klebstoffmischungen hier präsentiert.

Abb. 4 bis 7 zeigen die Prüfergebnisse für die Klebstofffugen von 0, 0.5mm, 1mm, und 3mm. Dargestellt ist die Deformation als Abzisse und die Kraft als Ordinate. Da die Klebfläche $10 \times 20 = 200 \text{ mm}^2$ beträgt, kann durch dividieren der Kraft durch 200 die Scherspannung in N/mm^2 ermittelt werden.

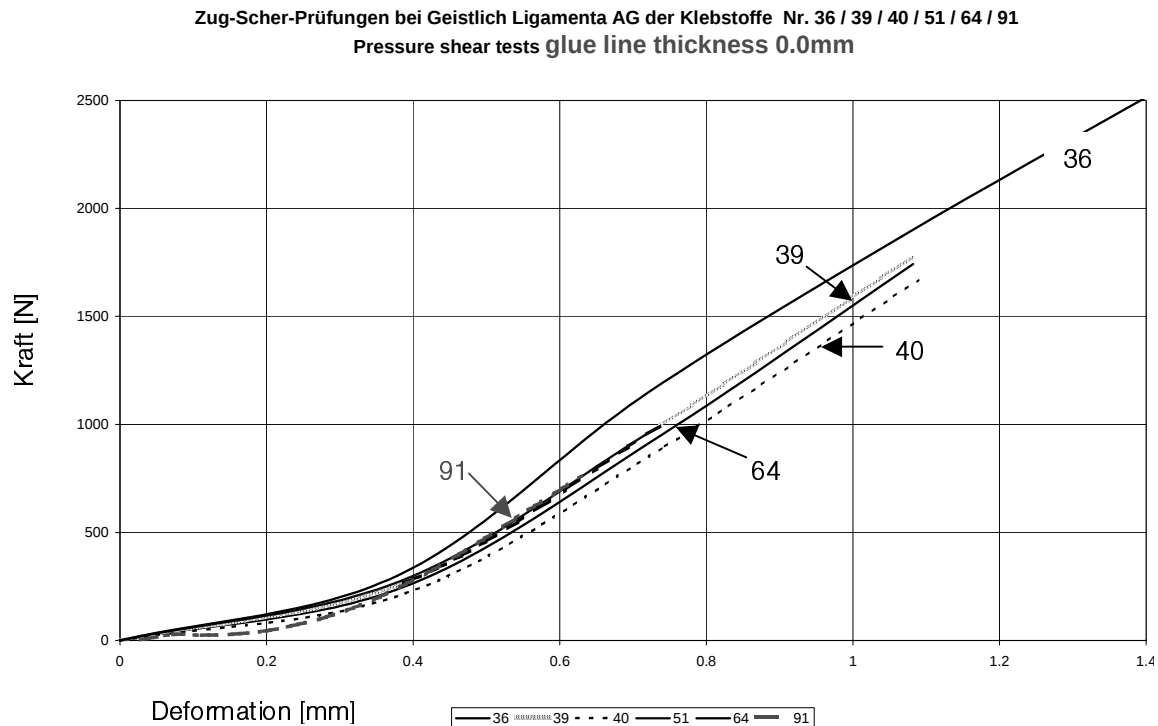


Abbildung 13: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 0mm Fuge

Bei einer konventionellen Klebstofffuge von 0mm (Pressdruck) waren die Versuchsergebnisse der verschiedenen Klebstoffe relativ ähnlich (Abbildung 13). Das Bruchverhalten war ausgesprochen spröde - wie bei konventionellen Holzklebstoffen. Die Neigungen der Kraft-Deformations-Linien waren bei allen Klebstoffen in etwa gleich: Der Mittelwert betrug ca. $2'300 \text{ N/mm}$ resp. $[1.15 \text{ N/mm}^2 \text{ Spannung}] / \text{mm Deformation}$. In der Regel erfolgte ein Adhäsionsbruch zwischen dem Klebstoff und dem Buchenholz.

Bei einer dickeren Klebstofffuge (0.5mm, 1mm, 3mm) wurde ein duktileres Tragverhalten festgestellt: Nach dem Erreichen des höchsten Kraft - resp. der "Fließgrenze" - folgte eine plastische Deformation vor dem Kraftabfall resp. Bruch (Abbildung 14, Abbildung 15, Abbildung 16). Die Unterschiede zwischen den Klebstoffen sind deutlicher als bei den Versuchen mit 0mm Dicke. Die Klebstoffe Nr. 36, 40 und 64 weisen eine relativ hohe Grösse der Fließgrenze auf und zeigen auch eine ähnliche, relativ steile, anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Linien. Die Klebstoffmischungen 39, 51 und 91 haben einen tieferen Wert der Fließgrenze und die anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Linien ist kleiner als bei der ersten Gruppe der Klebstoffe (Nr. 36, 40, 64).

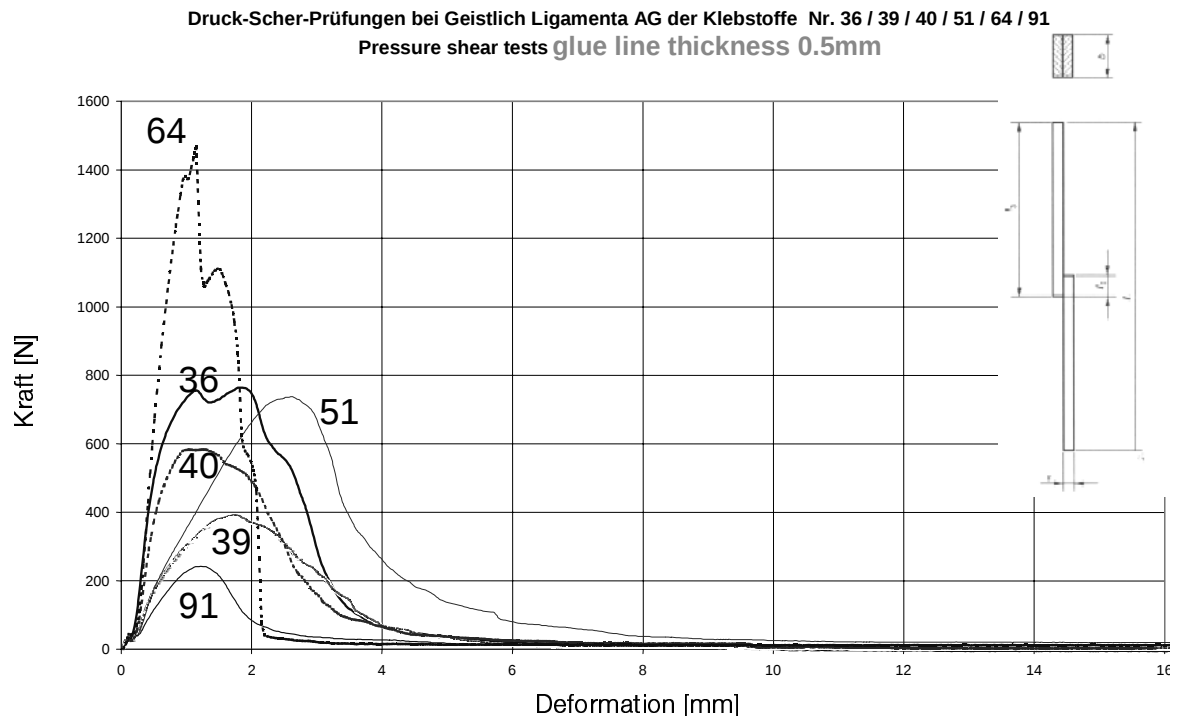


Abbildung 14: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 0.5mm Fuge

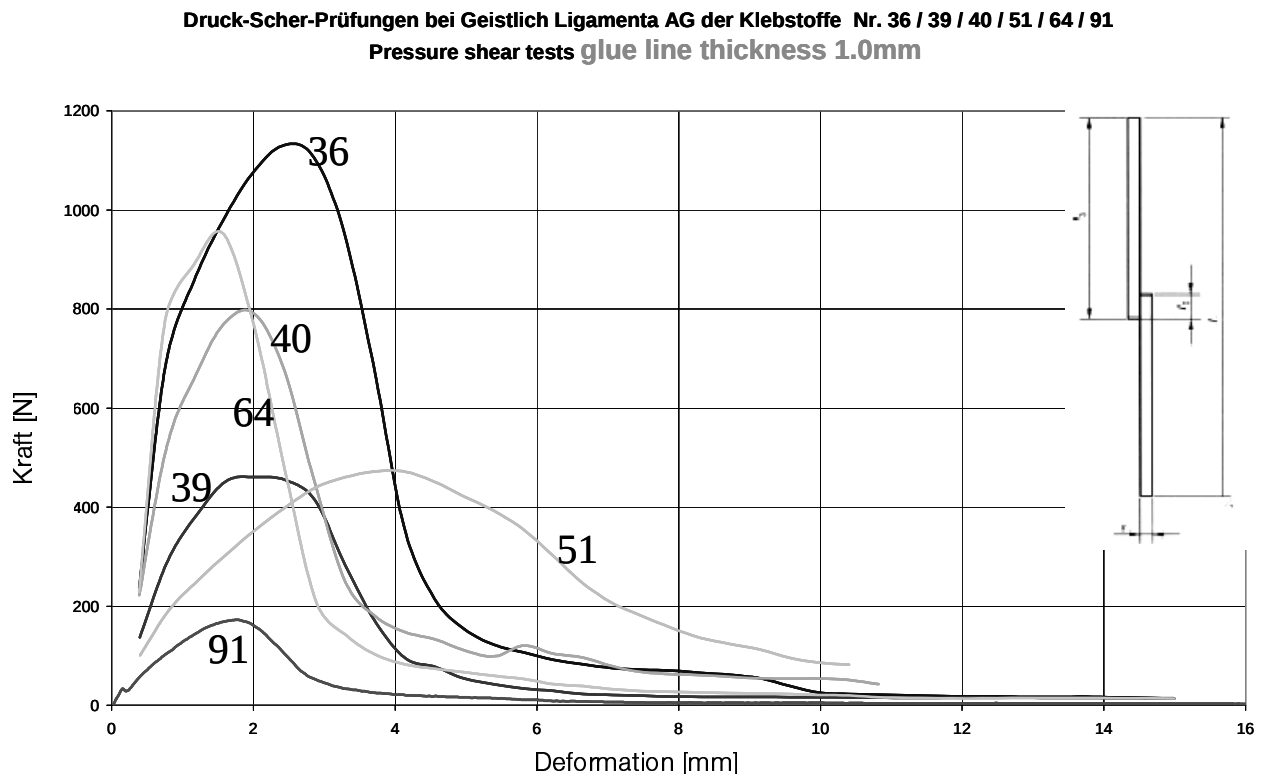


Abbildung 15: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 1.0mm Fuge

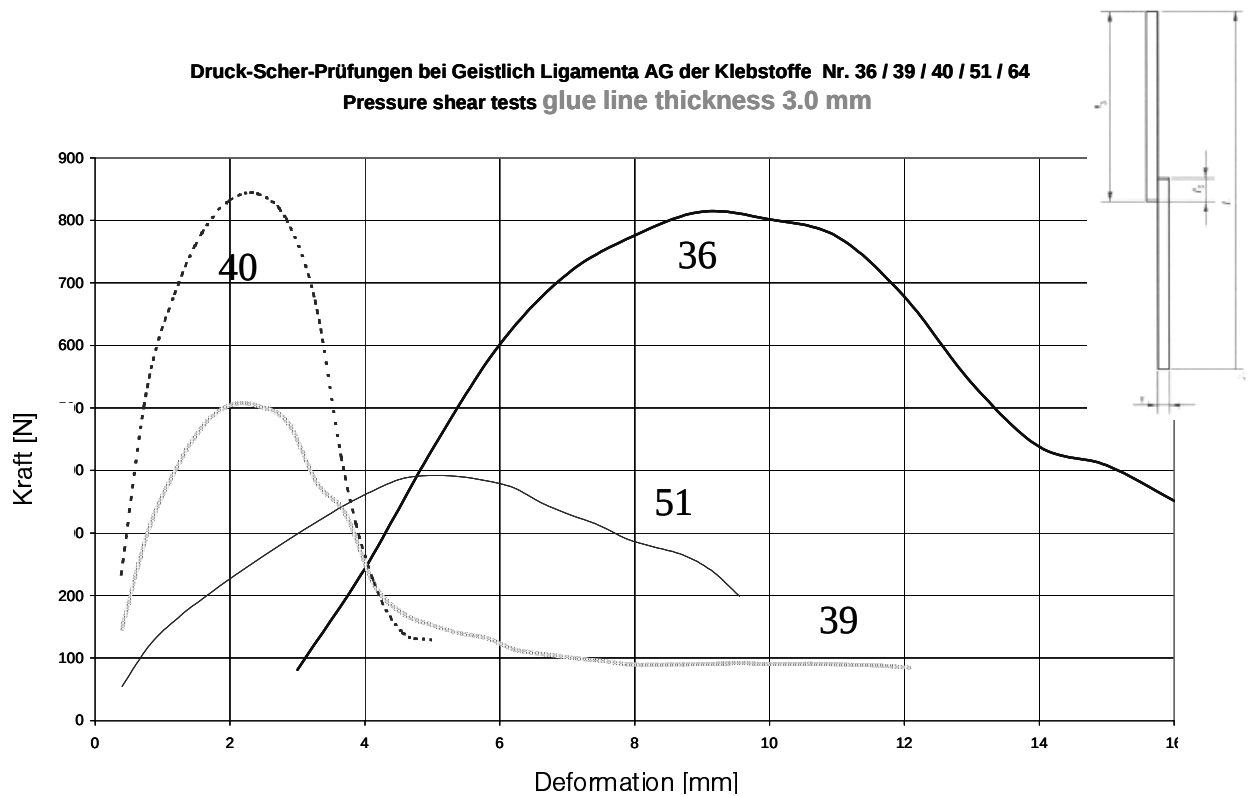


Abbildung 16: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 3.0mm Fuge

Der Vergleich der unterschiedlich dicken Klebstoffugen bei den verschiedenen Klebstoffen zeigt, dass kein klarer Zusammenhang zwischen Fugendicke und Steifigkeit besteht. Die Resultate der Klebstoffmischung Nr. 39 sind in der Abbildung 17 exemplarisch dargestellt. Die Neigung der Kraft-Deformations-Linie bei Fugenstärke 0mm ist erwartungsgemäss deutlich grösser als bei den dickeren Fugen. Theoretisch sollte mit zunehmender Klebstoffuge die anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Linie kleiner werden: Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch, dass bei grösserer Klebstoffuge die anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Linie nicht unbedingt kleiner wird. Im Falle des Klebstoffs Nr. 39 beträgt die Neigung ca. 470N/mm. Die Grösse der Fließgrenze scheint ebenfalls nicht von der Fugendicke abzuhängen. Für die Klebstoff-Nr. 39 wäre für eine Klebstoffuge von 0.5mm die Festigkeit am geringsten, während bei einer Dicke von 1mm eine optimale Grösse der Festigkeit erreicht ist. Allerdings ist dieser Befund nicht für jeden untersuchten Klebstoff gleich.

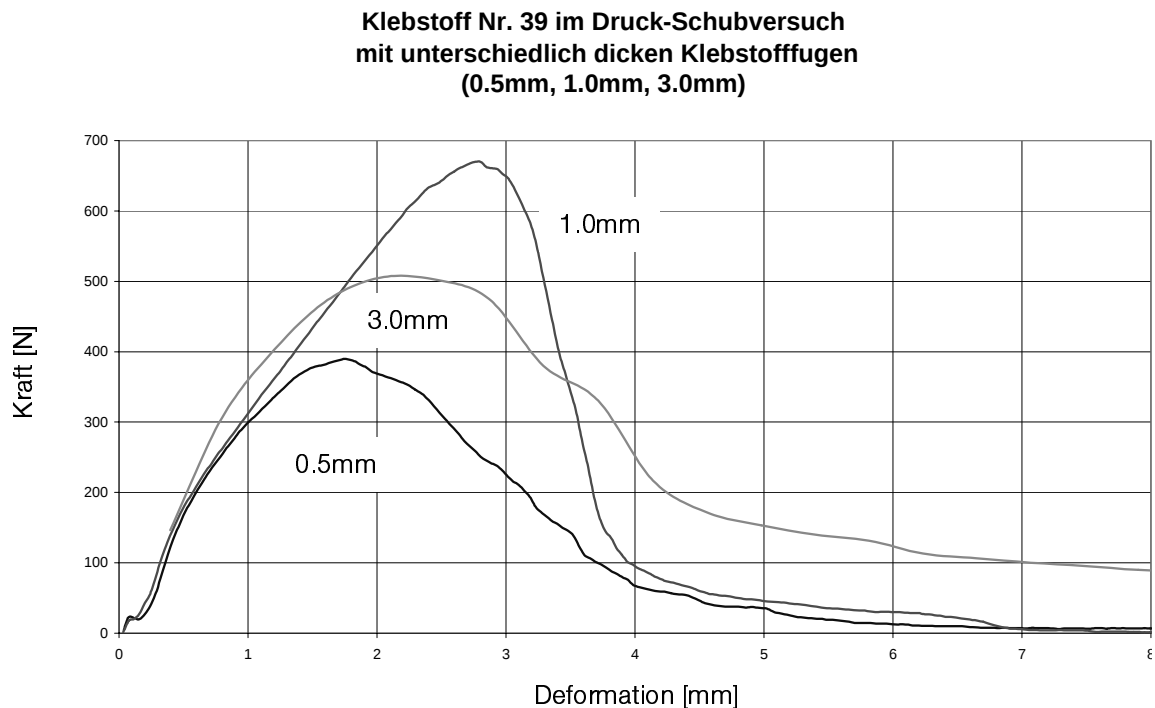


Abbildung 17: Ergebnisse des Zug-Scher-Versuches mit unterschiedlichen Fugendicken des Klebstoffes Nr. 39

In Abbildung 18 wird die optimale Dicke der Klebstofffuge des Klebstoffes dargestellt, bei der die Fließgrenze der Scherfestigkeit eine optimale Grösse erreicht.

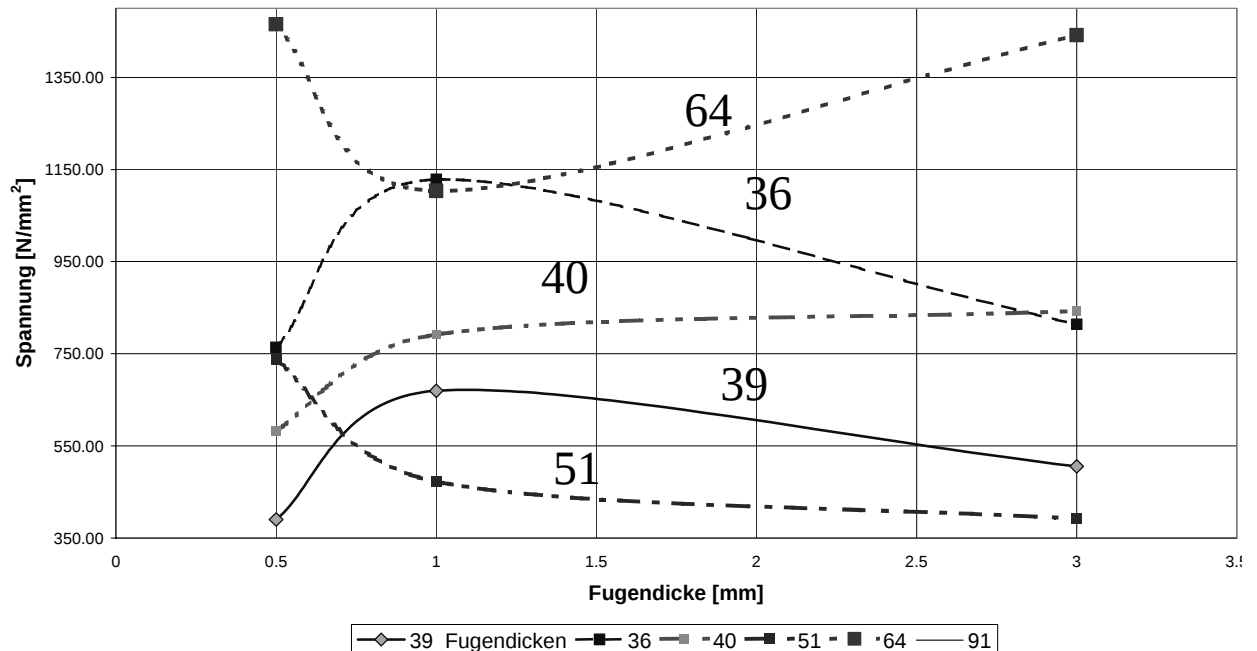


Abbildung 18: "Fließgrenzen" der Klebstoff-Nr. 39 - 64 in Abhängigkeit der Klebstofffuge

3.4 Auswertung und Interpretation der Resultate der Zug-Scher-Versuche

Die Duktilität ist eine Funktion aus Klebstoffformulierung und Fugendicke.

Die wichtigsten Befunde aus den Zug-Scher-Versuchen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei 0mm Klebstofffuge (Pressdruck) weisen alle untersuchten Klebstoffmischungen ein ähnliches, sprödes Tragverhalten im Zug-Scher-Versuch mit Prüfkörpern aus Buche auf.

- Bei Klebstofffugen von 0.5mm, 1mm und 3mm weisen die sechs ausgewählten Klebstoffmischungen ein duktiles Tragverhalten im Zug-Scher-Versuch auf.
- Der Scherwiderstand der dickeren Klebstofffugen ist je nach Klebstoff unterschiedlich. Die Klebstoffmischungen Nr. 36, 40 und 64 weisen grössere "Flie遝sgrenzen" der Scherfestigkeit als die Nr. 39, 51 und 91 auf. Bei den Klebstoff-Nr. 36, 40 und 64 ist ebenfalls die anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Kurven grösser als bei den Nr. 39, 51 und 91.
- Wird ein Klebstoff alleine betrachtet, so fällt es auf, dass bei einer Klebstofffuge von 0mm das Tragverhalten spröde und der Scherwiderstand relativ hoch ist. Bei den dickeren Fugen von 0.5mm, 1mm resp. 3mm wird ein duktiles Tragverhalten erreicht. Allerdings scheinen die Resultate der dickeren Fugen unabhängig von der Dicke der Klebstofffuge zu sein: Sowohl die "Flie遝sgrenzen" und die anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Linien sind alle in der Grössenordnung.

Aus den Resultaten sind folgende Schlussfolgerungen möglich:

- Ein duktiles Tragverhalten der untersuchten Klebstoffmischungen kann offensichtlich erreicht werden, indem man von der klassischen Klebstofffuge von 0mm (Pressdruck) abweicht. Da alle Klebstofffugen von 0.5mm, 1mm und 3mm Resultate der Zug-Scher-Versuche aufweisen, die auf ein duktiles Tragverhalten hinweisen, könnte wahrscheinlich eine minimale Klebstofffuge zwischen 0mm und 0.5mm mit weiteren Untersuchungen gefunden werden, bei welchem ein duktiles Tragverhalten immer noch möglich wäre.
- Die anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Kurven ist bei allen untersuchten Klebstoffmischungen wesentlich kleiner bei den dickeren Fugen (0.5 - 3mm) als beim Pressdruck (0mm). Dies könnte einen ungünstigen Einfluss auf das Verformungsverhalten des neuen Trägersystems haben (grössere Deformationen unter den Gebrauchslasten).
- Die Grösse der Flie遝sgrenze bei den Zug-Scher-Versuchen weist bei vielen Klebstoffmischungen eine optimale Grösse bei einer bestimmten Dicke der Klebstofffuge auf - gemäss Abbildung 18 wird z.B. für die Klebstoff-Nr. 39 der optimale Scherwiderstand bei einer Klebstofffuge von 1mm erreicht. Diese Tatsache könnte einen Hinweis sein, dass bei den dickeren Fugen neben den klassischen Scherdeformationen auch die Deformationsanteile des durch die Fugendicke bedingten Biegedeformation mitzuberücksichtigen sind. Abbildung 19 zeigt das klassische Berechnungsmodell für die Scherdeformation und den möglichen Einfluss des Biegemomentes.

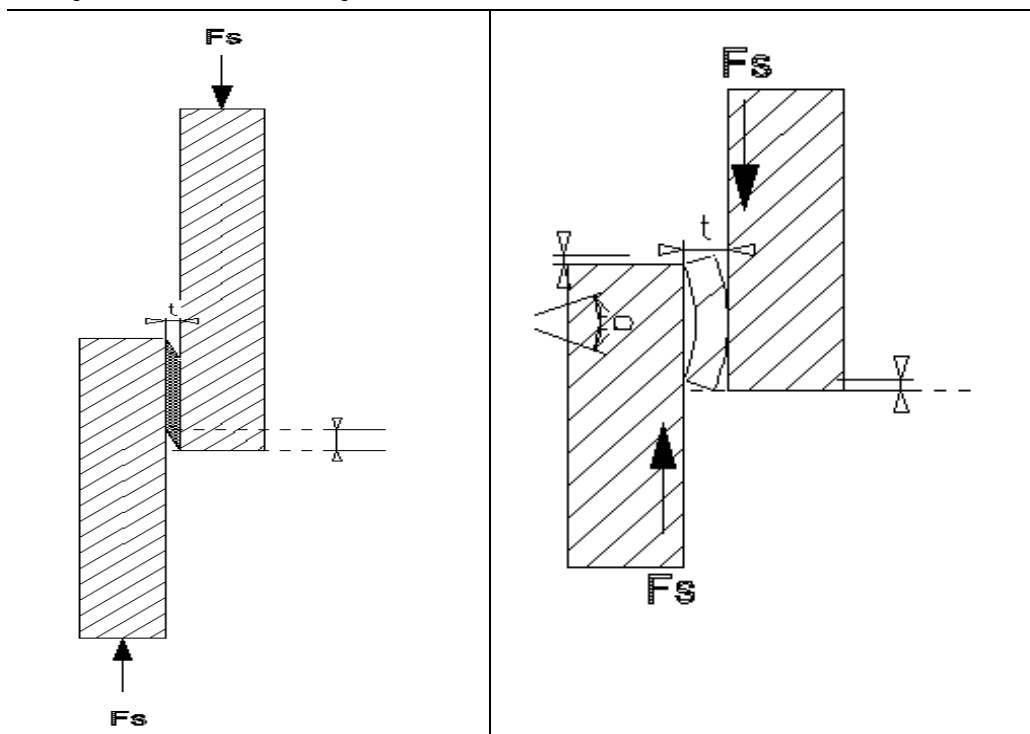


Abbildung 19: Berechnungsmodell des Deformationsanteils infolge Scherkraft (links), resp. Biegemoment (rechts)

Mathematisch kann man die Deformationsanteile wie folgt darstellen:

- Scherkraft: $\delta_v = \gamma \cdot t = (\tau/G) \cdot t = (F \cdot t)/G \cdot a \cdot b$
 Mit: t = Klebstofffugendicke
 F = Scherkraft
 a = Länge der Klebstofffuge
 b = Breite der Klebstofffuge
 G = Schubmodul der Klebstoffmasse
- Biegemoment: $\delta_m = \alpha \cdot t = k \cdot (M/EI) \cdot t = k_1 \cdot [F \cdot t / (E \cdot b \cdot t^3)] \cdot t \cdot \delta_m$
 Mit: k, k_1 = Faktoren
 E = Elastizitätsmodul der Klebstoffmasse
- Summe: $\delta = (F \cdot t)/G \cdot a \cdot b + k_1 \cdot [F/(E \cdot t)]$

Der Deformationsanteil infolge Abscheren ist proportional zur Dicke der Klebstofffuge, während der Deformationsanteil infolge Biegung proportional zur Inverse von t ist. Dieses einfache theoretische Modell könnte helfen, um zu erklären, warum das anfängliche Deformationsverhalten aller Dicken der Klebstofffugen ähnlich sind.

4 Biegeversuche

4.1 Zweck der Biegeversuche

Nachdem eine Vorauswahl an Klebstoffmischungen getroffen wurde und bis dahin nur die Materialfestigkeiten der Klebstoffe geprüft wurden, muss nun untersucht werden, mit welchem Klebstoff das Gesamtsystem aus Klebstoff und Holzlamellen funktioniert. Hierfür sind mit den sechs Klebstoffmischungen aus der Projektphase1, BSH-Balken in einem kleineren Format an der HSB Biel verleimt und später auf Biegung geprüft worden.

4.2 Vorbereitung der Prüfkörper

Die Lamellen wurden im Klimaraum der HSB Biel vorklimatisiert, danach mit den verschiedenen Klebstoffmischungen verleimt. Mit jeder Klebstoffmischung wurden 3 BSH Balken mit einer Klebstoffuge von 1.0 mm hergestellt. Danach wurden die BSH Balken nochmals für zwei Wochen klimatisiert.

<u>Normklima (T = 23°C / $\varphi_{\text{rel}} \approx 50\%$):</u>	18 Tage
<u>Verleimung</u>	1 Tag
<u>Normklima (T = 23°C / $\varphi_{\text{rel}} \approx 50\%$):</u>	14 Tage

Tabelle 3: Prüfkörperübersicht

Prüfkörper Nr.	Höhe/Breite mm	Klebstoff-Nr.	Fuge mm
36.1 -36.3	83/50	36	1.0
39.1 -39.3	83/50	39	1.0
40.1 -40.3	83/50	40	1.0
51.1 -51.3	83/50	51	1.0
64.1 -64.3	83/50	64	1.0
91.1 - 91.3	83/50	91	1.0

Die Lamellen wurden so sortiert, dass im Zugbereich weitgehend fehlerfreie Lamellen verwendet wurden und die Lamellen, die kleine Holzfehler aufwiesen, im Druckbereich zum Einsatz kamen. Im mittleren Querschnittsbereich wurden die schlechtesten Lamellen eingebaut.



Abbildung 20: Beileimung der Lamellen

4.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Es wurde in Anlehnung an folgende Norm geprüft:

DIN EN 408:2001 Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikal. und mech. Eigenschaften

In den Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die Prüfanordnung der Vier-Punkt-Biegeversuche und die Abmessungen der geprüften Balken dargestellt. Neben der Belastung F wurden auch die

Durchbiegung in Balkenmitte und an zwei anderen Stellen gemäss DIN EN 408 Kap. 9 mit Wegaufnehmern gemessen.

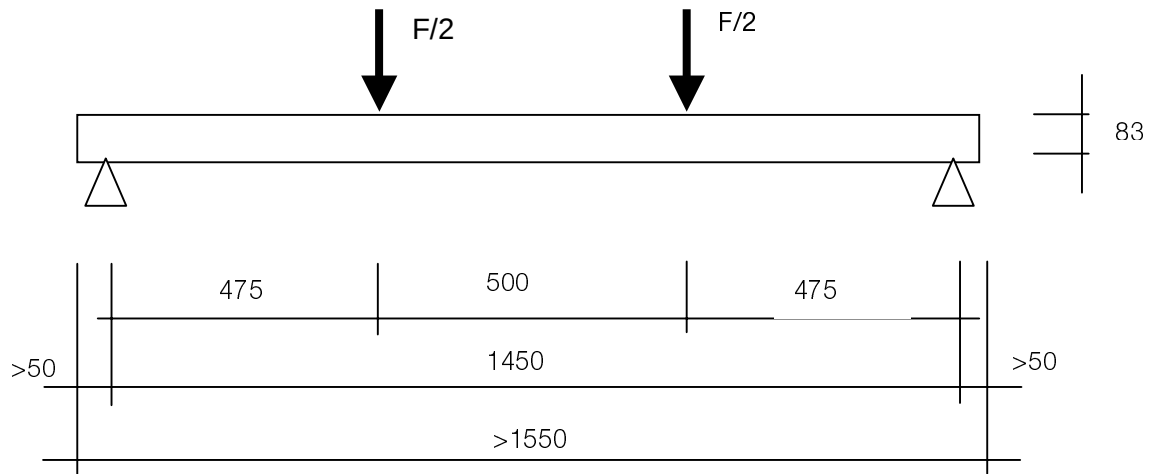


Abbildung 21: Prüfanordnung, statisches System der Biegeversuche



Wegaufnehmer zur Bestimmung des E-Moduls

Abbildung 22: Prüfanordnung des 4-Punkt-Biegeversuchs an der Schenk-Maschine, einschliesslich Wegaufnehmer zur Bestimmung des E-Moduls

Die Last wurde mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht, die nicht grösser als $0.003 \cdot h \text{ mm/s} = 0.72 \text{ mm/s}$ sein durfte. Der Versuchsablauf wurde in zwei Abschnitte unterteilt:

- Steifigkeitszyklus: zur Bestimmung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegesteifigkeit
- Bruchzyklus: zur Bestimmung der Biegefestigkeit / Bruchlasten

Der Steifigkeitszyklus, sowie der Bruchzyklus hatten jeweils eine Haltezeit von 60s. Im Steifigkeitszyklus wurde im elastischen Bereich die Kraft und Deformation gemessen und darüber konnte der Biege-E-Modul bestimmt werden. Im Steifigkeitszyklus wurde bis 40% der vermuteten Bruchkraft gefahren, nach der Haltezeit wurde der Balken bis auf 10% der vermuteten Bruchlast entlastet und im Bruchzyklus wurde in der Haltezeit die Messfühler entfernt und dann bis zu Bruch gefahren (Abbildung 23).

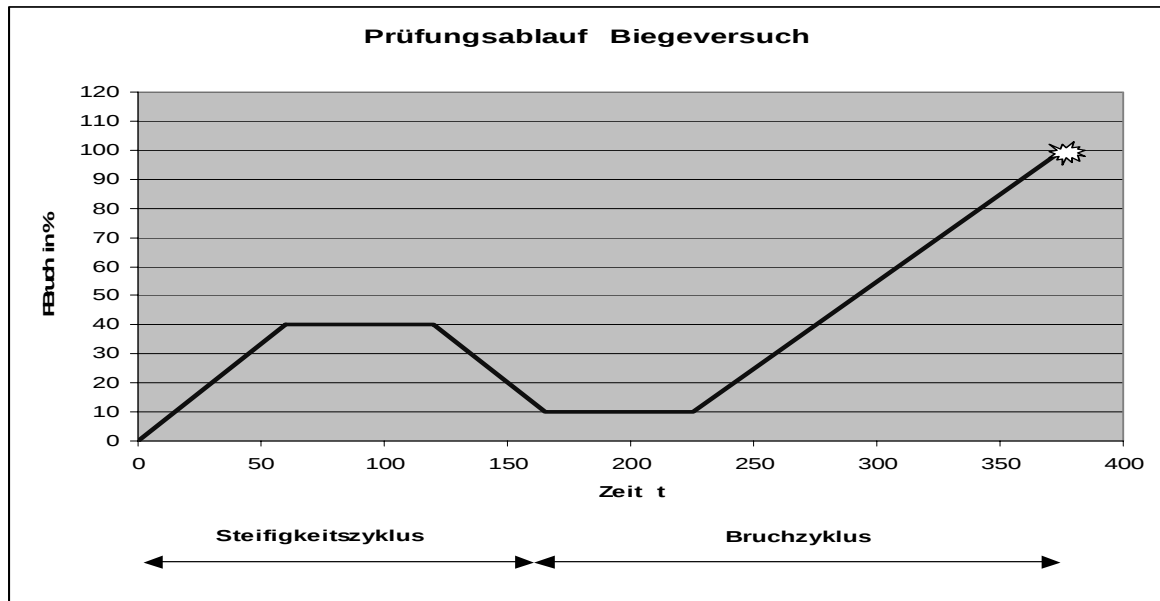


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Versuchablaufs: Zeit-Last-Diagramm

4.4 Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeversuche

In Abb. 17 sind die Ergebnisse der 4 Punkt-Biegeversuche für die Klebstoff-Nr. 36, 39, 40, 51 und 64 dargestellt: Die Deformation in Balkenmitte wird als Abzisse, die Kraft als Ordinate aufgetragen.

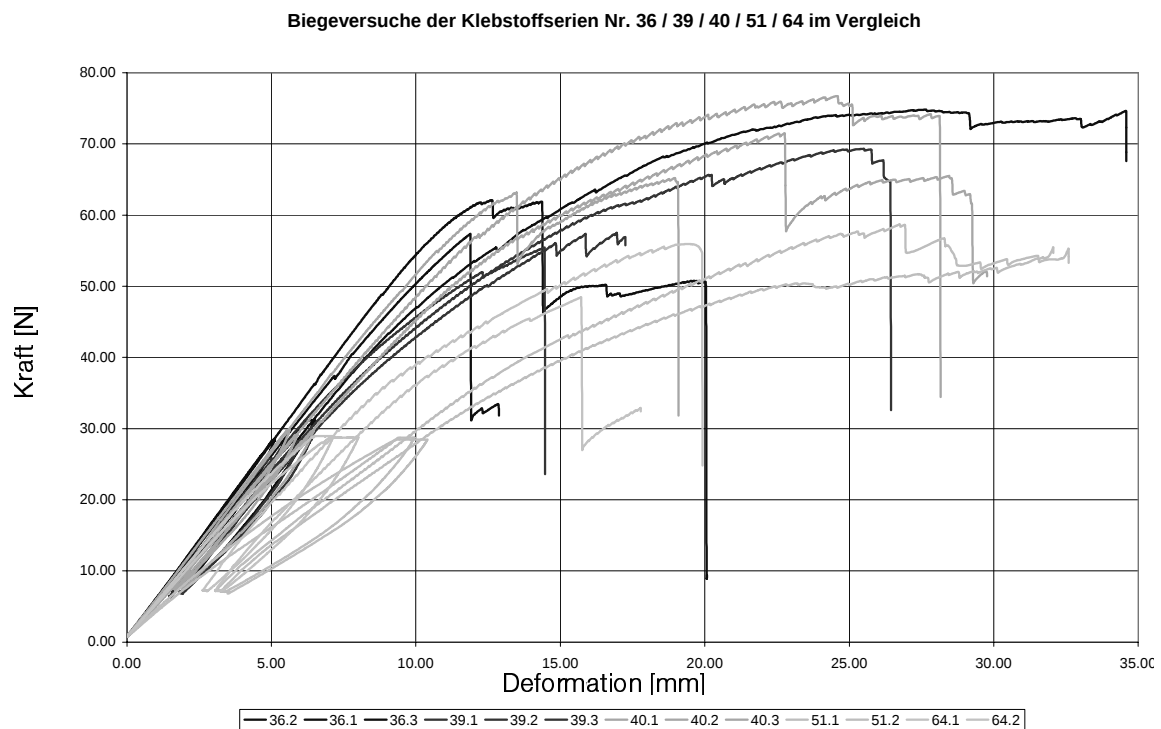


Abbildung 24: Resultate der Balkenbiegeversuche mit fünf ausgewählten Klebstoffmischungen

Zunächst wird das anfängliche Deformationsverhalten kommentiert. Die anfänglichen Neigungen der Kraft-Durchbiegungs-Kurven sind für die Klebstoff-Nr. 36, 39, 40 und 64 sehr ähnlich. Für die Klebstoff-Nr. 51 ist die Neigung flacher. In der Abbildung 24 ist ersichtlich, dass die Klebstoff-Nr. 51 und 64 stark kriechen während der ersten Haltezeit von 60 Sekunden bei 40% der angenommenen Bruchlast.

Aus den Versuchsergebnissen im elastischen Bereich gemessen im Steifigkeitszyklus lassen sich die Elastizitätsmodule mit folgender, bekannter Formel bestimmen:

$$E_m = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)}$$

Die in der Abbildung 25 dargestellten E-Module sind mit Mittelwerten von 12 - 18 kN/mm² ähnlich gross wie bei herkömmlichen BSH-Balken: Bei der Klebstoff-Nr. 51 ist der E-Modul mit einem Mittelwert von ca. 10.5 kN/mm² relativ tief. Die "steiferen" Klebstoffe Nr. 36 und Nr. 40 weisen hohe E-Moduli auf: Der wesentlich nachgiebigere Klebstoff Nr. 39 liegt allerdings nicht weit darunter, die Streuung der Messwerte ist aber relativ gross.

Statistische Auswertung der E-Module der 4-Punkt-Biegeprüfung

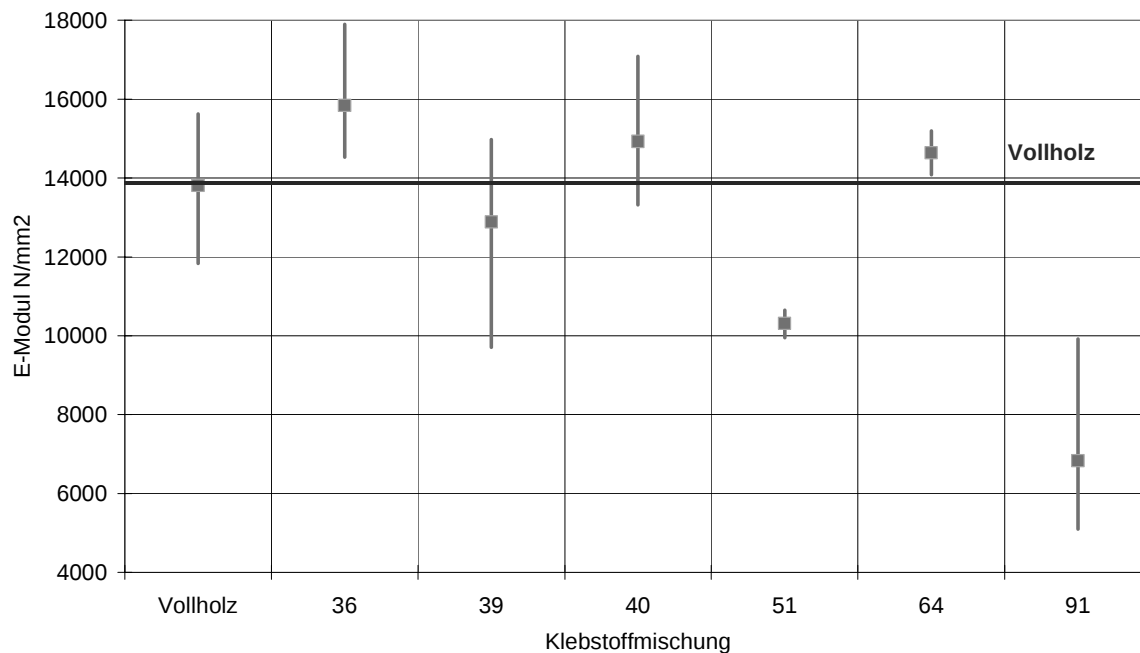


Abbildung 25: E-Moduli der Trägersysteme der Klebstoffmischungen im Vier-Punkt-Biegeversuch

In der Tabelle 4 sind die Bruchursachen und die Biegefestigkeit - berechnet unter Annahme der für den Holzbau klassischen, dreieckförmigen Spannungsverteilung - zusammengestellt. Die sehr hohen Werte entsprechen fehlerfreiem Holz.

Tabelle 4: Bruchversagen der BSH Balken der fünf ersten Klebstoffmischungen

Prüfkörper Nr.	Zugzone	Druckzone	max. Biegespannung
36.1 -36.3	Biegezugbruch	Druckstauchung	72.8N/mm ²
39.1 -39.3	Biegezugbruch unteren Lamellen	keine Druckstauchung	67.4N/mm ²
40.1 -40.3	Biegezugbruch	Druckstauchung	74.6N/mm ²
51.1 -51.2	Biegezugbruch	Druckstauchung	57.1N/mm ²
64.1 -64.2	Schubbruch in der Leimfuge - schlechte Verleimung!		54.4N/mm ²

Im Bereich der Bruchlasten werden die Kraft-Deformations-Kurven immer flacher: Alle Trägersysteme weisen ein ausgesprochen duktiler Tragverhalten auf. Allerdings war dies möglicherweise nicht ausschliesslich auf die erhoffte, gestapelte "Plastifizierung" der Klebstofffuge zurückzuführen, wie die nachfolgenden Beobachtungen hindeuten:

Die Balken, die mit den "schubfesteren" Klebstoffmischungen Nr. 36 und Nr.40 zusammengeklebt wurden, haben eine hohe Biegefestigkeit auf Grund derer die BSH Balken zwar auf Biegezugbruch in der untersten Lamelle versagt, vorher aber weist die Biegedruckseite deutliche Druckstauchungen auf (Abbildung 26). Es ist somit wahrscheinlich, dass die Plastifizierung der Druckzone des Biegebalkens zumindest teilweise die duktilen Eigenschaften des Systems bewirken.

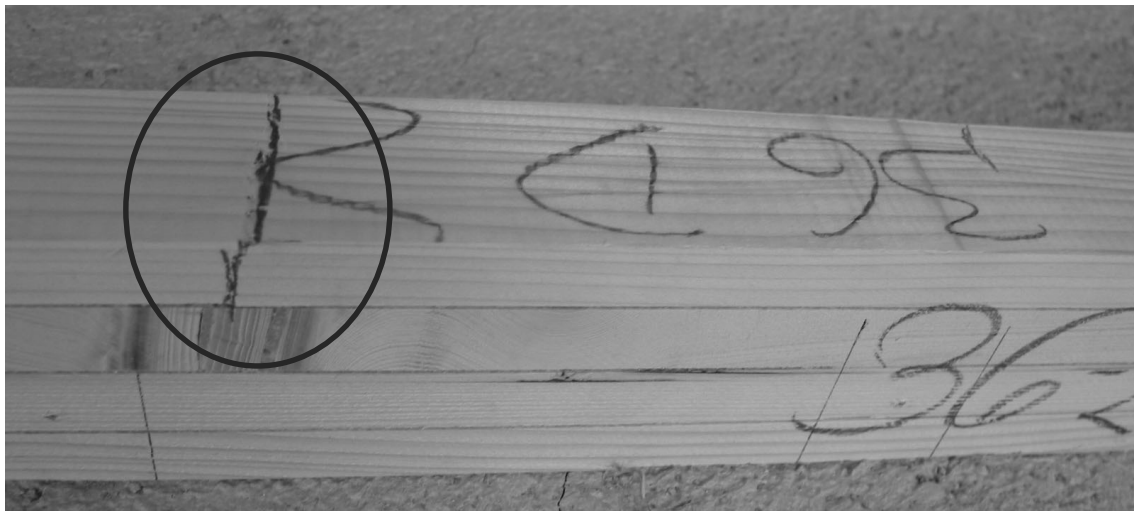


Abbildung 26: Biegedruckstauchungen auf einem Prüfkörper der Klebstoff-Nr. 36

Die Klebstoff-Nr. 39 ist weniger "schubfest" wie die Nr. 36 und 40: Die Prüfkörper aus diesem Klebstoff versagen auch auf Biegezugbruch in den unteren Lamellen, doch gibt es keine starken Druckstauchungen in der obersten Lamelle. Daher ist das duktile Tragverhalten möglicherweise auf eine Spannungsumverteilung durch ein "Fließen" der Klebstofffugen zurückzuführen. Die Festigkeit des Klebstoffs ist allerdings auch hier möglicherweise zu hoch, um das duktile Verhalten eindeutig dem Gesamtsystem zuzuweisen.

Die maximalen Biegespannungen sind bei den Systemen Nr. 36, Nr. 39 und Nr. 40 wesentlich höher als bei den Systemen mit den Mischungen Nr. 51 und Nr. 64, die beide stark kriechen. Bei der Auswertung der Bruchbilder kann davon ausgegangen werden, dass bei den Versuchen mit der Mischung Nr. 64 die Verklebung nicht ideal war. Während des Klebevorgangs war die Thixotropie des Klebers noch nicht ausgebildet und es ist vermutlich viel Klebstoff aus der Fuge ausgelaufen.

4.5 Ergebnisse des Klebstoff-Nr. 91

Bei den Biegeversuchen wurde beobachtet, dass die Prüfkörper der schubsteiferen Klebstoff-Nr. 36 und 40 starke Druckstauchungen aufwiesen, während bei den Prüfkörpern der weniger schubsteifen Klebstoff-Nr. 39 keine Druckstauchungen festgestellt wurden. Damit lag die Vermutung nahe, dass das beobachtete, duktile Tragverhalten der Prüfkörper mit der Klebstoff Nr. 39 zumindest teilweise auf eine günstige Plastifizierung der Klebstofffuge zurückzuführen sein könnte. Es wurde daher entschieden, die Klebstoffmischung Nr. 39 weiterzuentwickeln, um zu prüfen, ob die Schubfestigkeit weiter nach unten korrigiert werden könnte, ohne dabei ein stärkeres Kriechverhalten zu erhalten.

Geistlich Ligamenta AG hat den Klebstoff Nr. 39 weiter modifiziert mit dem Ziel, eine weitere Reduktion der Schubfestigkeit zu erreichen. Leider gelang es nicht, eine stabile Mischung auf Basis der Klebstoff-Nr. 39 zu erreichen. Daher wurde eine komplett neue Mischung kreiert. Die Zusammensetzung und Eigenschaften der neuen Klebstoff-Nr. 91 sind zwecks besserem Vergleich mit den anderen Klebstoffmischungen in der Tabelle 2 (4 Klebstoffauswahl) aufgeführt. Die Resultate der Zug-Scher-Prüfungen sind aus den gleichen Gründen ebenfalls im Abschnitt 3 dargestellt. Die Klebstoff-Nr. 91 hat eine wesentlich geringere Schubfestigkeit als die anderen Klebstoffmischungen und auch die anfängliche Neigung der Kraft-Deformations-Kurve ist flacher und deutet auf eine grössere Deformation bei Belastung.

Der Prüfungsaufbau ist der gleiche wie bei der ersten Versuchsserie des 4-Punkt-Biegeversuchs. Der erste Prüfkörper brach vorzeitig. Daraufhin wurde der Prüfablauf gemäss Tabelle 5 angepasst.

Tabelle 5: Prüfungsablauf der Biegeversuche Serie 2

F_{bruch}	4000N	errechnete Bruchkraft
40% F_{bruch}	1600N	1. Halteschwelle
10% F_{bruch}	400N	2. Halteschwelle

Mit diesem geänderten Prüfungsablauf wurden die restlichen 7 Versuchskörper getestet. In Abbildung 27 sind die Ergebnisse der Biegeprüfungen dargestellt. Die Biegebalken brachen auf Zug und wiesen ein duktileres Verhalten auf. Es wurden keine Druckstauchungen der Prüfkörper

beobachtet. Vor dem Versuch wurden vertikale Linien auf den Seiten der Prüfkörper gezeichnet: Sie haben die starken Schubdeformationen der Klebstofffugen verraten: Es kann davon ausgegangen werden, dass das duktile Verhalten auf das Verhalten des Gesamtsystems Lamelle / Klebstoff zurückzuführen ist.

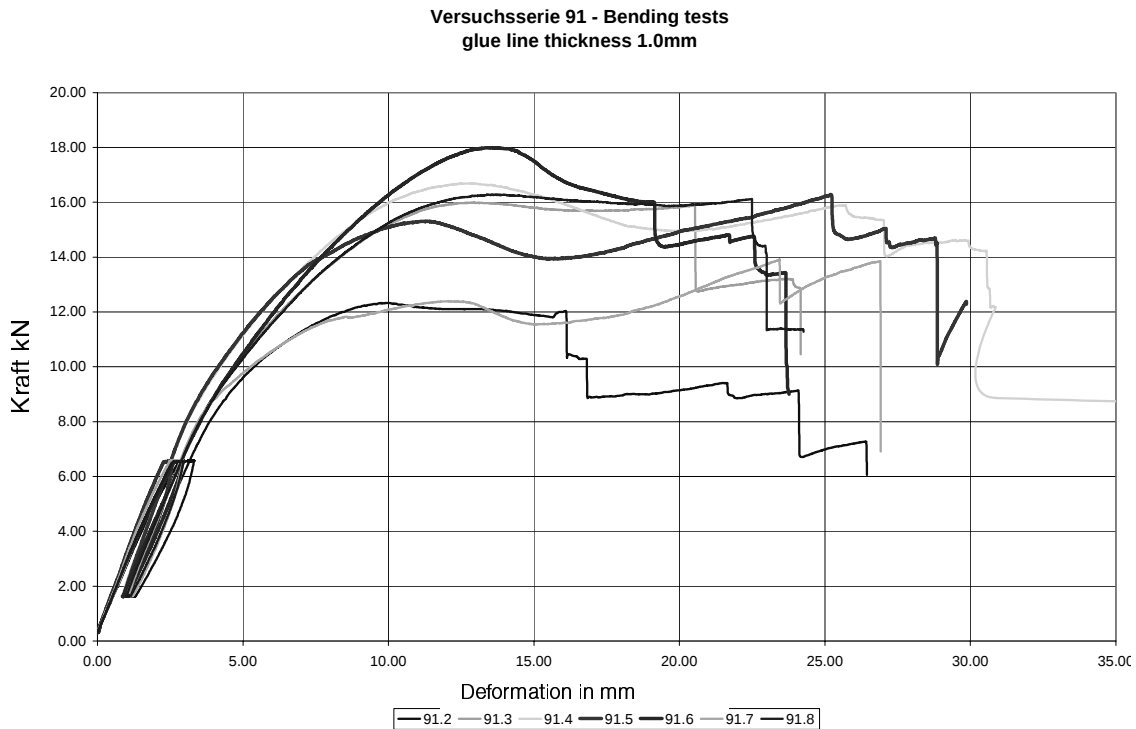


Abbildung 27: Kraft-Deformations-Diagramme der Prüfkörper der Klebstoff-Nr.91

In der Tabelle 6 sind die Bruchursachen und die aus den maximalen Lasten berechnete nominelle Biegefestigkeit aufgeführt. Die Trägersysteme weisen sehr tiefe Werte der Biegefestigkeit auf: trotz der guten Duktilität ist die Klebstoff-Nr. 91 keine optimale Lösung.

Tabelle 6: Bruchversagen der Biegeversuche Serie 2 mit Klebstoff Nr. 91

Prüfkörper Nr.	Lamellen	Leimfuge	max. Biegespannung
90.1	Fehlprüfung		
90.2	Keilzinkenbruch (KZ) unten, 2. Lamelle Zugbruch	untere und mittlere Fuge delaminiert (DL)	12.0 N/mm ²
90.3	KZbruch unten, 2. Lamelle Zugbruch	DL unten im Randbereich	15.5 N/mm ²
90.4	KZbruch in allen Lamellen	DL jeder Fuge	16.2 N/mm ²
90.5	KZbruch in unterster Lamelle	DL in der mitte und unten in der Mitte, obere Fuge im Aussenbereich	15.8 N/mm ²
90.6	-	DL in der untersten Fuge	17.5 N/mm ²
90.7	KZbruch in allen Lamellen	DL jeder Fuge	13.5 N/mm ²
90.8	KZbruch in unterster Lamelle	DL in der mittleren Fuge	15.8 N/mm ²

Ebenso ist gut zu erkennen, dass die Balken ein recht einheitliches Verformungsbild (Abbildung 27) ergeben.

Vergleicht man nun den Klebstoff Nr.39 und den Klebstoff Nr.91 miteinander (Abbildung 28) fällt auf, dass die Festigkeit des neuen Systems wesentlich geringer ist.

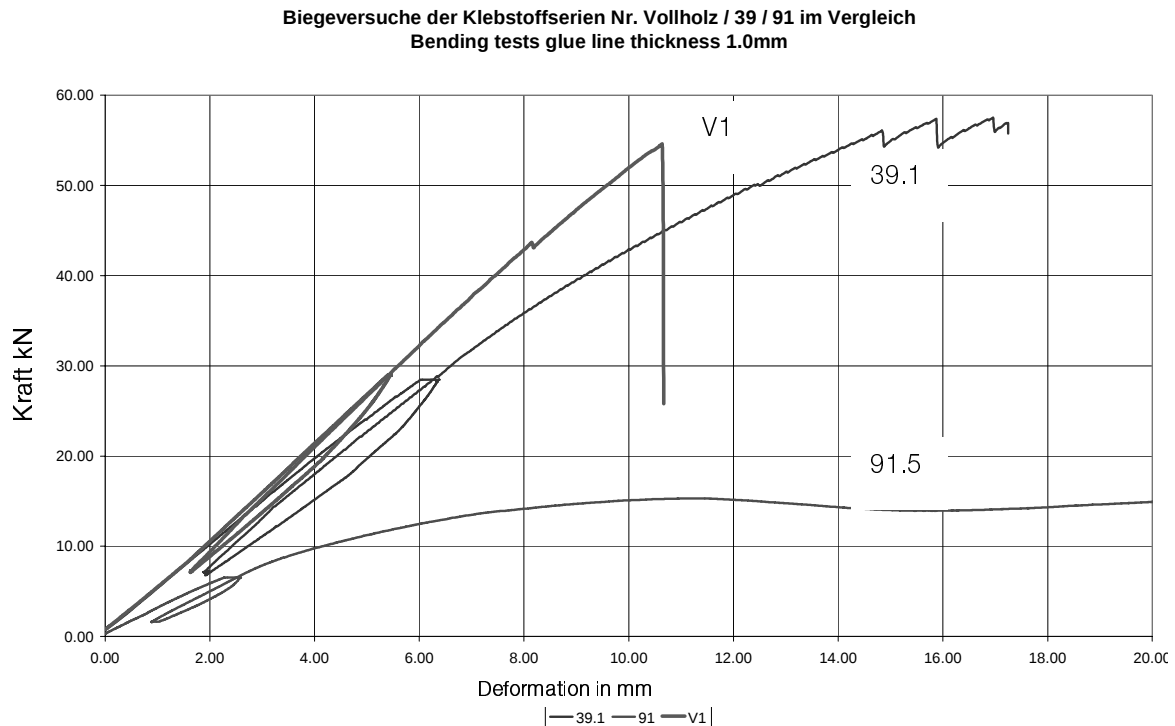


Abbildung 28: Vergleich des Biegeversuchs Vollholz V1, Nr. 39.1 und Nr. 91.5, Ausschnitt aus der Prüfkurve

Der Vergleich der E-Module der Klebstoffe Nr. 39 und Nr. 91 zeigt Abbildung 29. Das E-Modul des neuen Klebstoffs liegt wesentlich tiefer, er ist weniger steif.

Statistische Auswertung der E-Module der 4-Punkt-Biegeprüfung

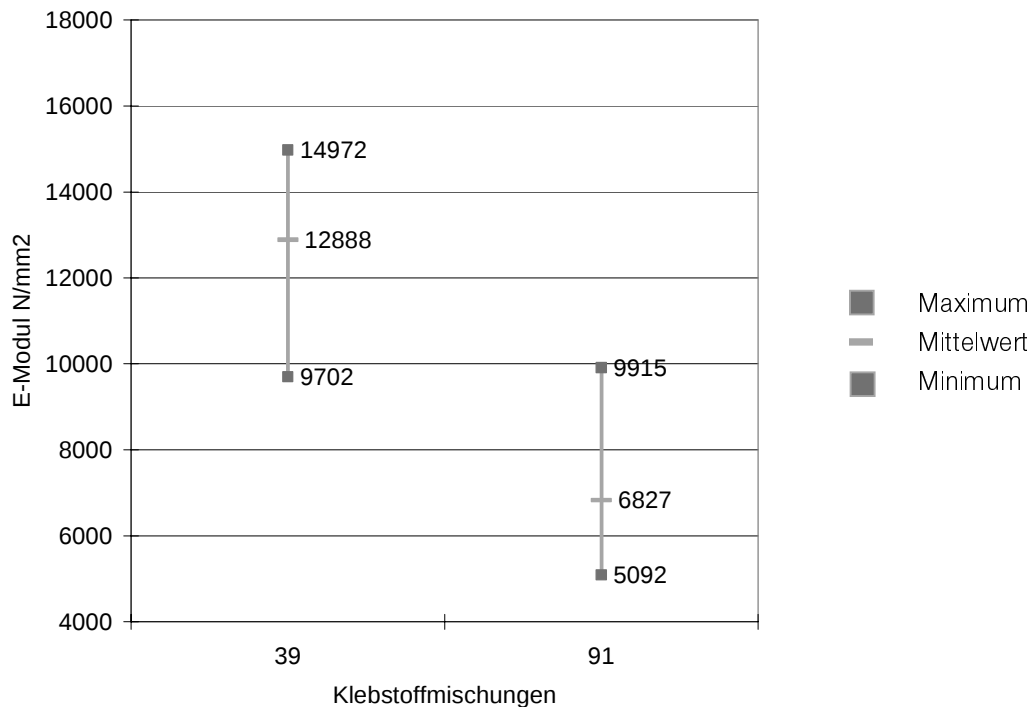


Abbildung 29: Vergleich der E-Moduli der Systeme Nr. 39 und Nr. 91

4.6 Rückvergleich der Prüfgeschwindigkeiten

Bei verschiedenen Materialien unter anderem auch bei Klebstoffen ändert sich das Spannungs-Dehnungsdiagramm in Funktion der Dehngeschwindigkeit. Bei Stahl wird bei zunehmender Deh-

nungsgeschwindigkeit die Streckgrenze stark angehoben, während jedoch die Bruchdehnung nur unwesentlich betroffen ist. Ebenso beeinflusst die Beanspruchungsgeschwindigkeit die Festigkeitswerte.

Im nächsten Schritt ist zu überprüfen, ob die niedrigen E-Module und Klebstofffestigkeiten eine Folge der unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten bei den Zug-Scherversuchen des Klebstoffs Nr. 91 und den Biegeversuchen des Systems "Duktiler BSH Balken"- Nr. 91 ist.

5 Rechnerische Überprüfung der Biegeversuche

5.1 Übersicht

Die Biegeversuche haben speziell im Falle der Klebstoff-Nr. 91 z.T. unerwartete Resultate geliefert. Folgende Fragestellungen werden mit einfachen Berechnungsmodellen überprüft:

- Möglicher Einfluss der unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeit bei den Zug-Scher-Versuchen resp. Biegeprüfungen
- Mögliche Rolle der (elastischen) Nachgiebigkeit der Klebstoffuge auf dem E-Modul des Trägersystems
- Mögliche Rolle des Fließens der Klebstoffuge auf den Biegewiderstand

5.2 Belastungsgeschwindigkeiten der Versuche

Bei verschiedenen Materialien unter anderem auch bei Klebstoffen ändert sich das Spannungs-Dehnungsdiagramm in Funktion der Dehngeschwindigkeit. Bei Stahl wird bei zunehmender Dehnungsgeschwindigkeit die Streckgrenze stark angehoben, während jedoch die Bruchdehnung nur unwesentlich betroffen ist. Ebenso beeinflusst die Beanspruchungsgeschwindigkeit die Festigkeitswerte. Im nächsten Schritt ist zu überprüfen, ob die niedrigen E-Module und Klebstofffestigkeiten eine Folge der unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten bei den Zug-Scherversuchen des Klebstoffs Nr. 91 und den Biegeversuchen des Systems "Duktiler BSH Balken"- Nr. 91 ist.

Die Zug-Scher-Versuche wurden gemäss der Norm EN 205 durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug: 6mm/Minute. Da die maximale Kraft von 180N bei einer Deformation von ca. 1.8mm erreicht wurde, ist die Belastungsgeschwindigkeit ca. 54N/Minute. Die Klebefläche beträgt 200mm²: dies ergibt eine Spannungsgeschwindigkeit von:

$$\tau' = 1.5 \cdot (V'/b \cdot h) = 1.5 \cdot (54 / 200) = 0.405 \text{ N/mm}^2/\text{Minute}$$

Die Biegeversuche wurden gemäss EN408 durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0.33mm/s resp. 19.8 mm/Minute. Aus der Gleichung für die Deformation:

$$\delta = (23/1296) \cdot F \cdot L^4 / (EI)$$

erhält man:

$$F' = (1296/23) \cdot (EI / L^4) \cdot \delta'$$

Der Zusammenhang zwischen der Belastung F und der Biegespannung σ lässt sich wie folgt ableiten:

$$\sigma = M/W = (F \cdot L/6) / (b \cdot h^2/6) = (F \cdot L) / (b \cdot h^2)$$

Resp.

$$\sigma' = [(1296/23) \cdot (EI / L^4) \cdot \delta'] \cdot L / (b \cdot h^2) = [(1296/23) \cdot (E \cdot b \cdot h^3 / 12 / L^4) \cdot \delta'] \cdot L / (b \cdot h^2) = [108 \cdot E \cdot h / 23 / L^3] \cdot \delta'$$

Mit folgenden Zahlenwerten:

$b = 50\text{mm}$	Breite der Prüfkörper
$h = 83\text{mm}$	Höhe der Prüfkörper
$L = 1'450\text{mm}$	Spannweite der Prüfkörper
$E = 7'000 \text{ N/mm}^2$	

erhält man folgendes Berechnungsergebnis:

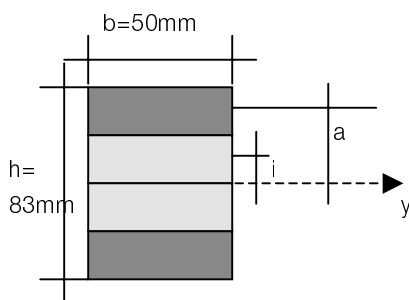
$$\sigma' = [(108/23) \times 7'000 \times 83 / 1450^3] \cdot 19.8 = 0.17 \text{ N/mm}^2/\text{Minute}.$$

Damit ist die Belastungsgeschwindigkeit beim Zug-Scher-Versuch wesentlich schneller als beim Biegeversuch. Die Belastungsgeschwindigkeit hat einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Festigkeitseigenschaften der Klebstoffformulierung. Aus diesem Grund können die Resultate der Biegeversuche und der Zug-Scherversuche nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden.

5.3 Berechnung der Steifigkeit des Trägersystems über das Gamma-Verfahren

Um die elastische Nachgiebigkeit der Klebverbindung bestimmen zu können und bei der Berechnung Verformungskennwerte einsetzen bzw. bestimmen zu können betrachten wir das Gamma-Verfahren, das in der deutschen Norm DIN 1052 für nachgiebig verbundene Querschnitte angegeben ist. In diesem Verfahren wird ein Faktor γ für die Art der Verbindung zwischen den einzelnen Schichten, abhängig vom Verbindungsmittel, eingesetzt.

Querschnitt:



Ansicht:

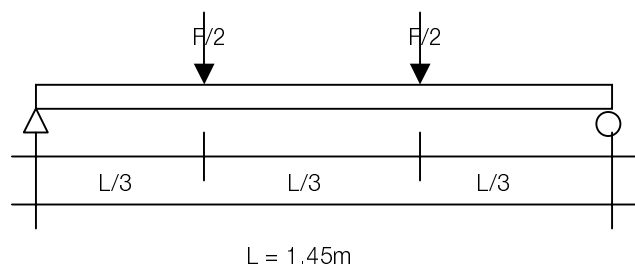


Abbildung 30: Aufbau der Biegeversuche

Die Berechnung des effektiven Trägheitsmoments eines aus 4 Lamellen bestehenden, nachgiebig verbundenen Trägers ist in folgender Formel definiert:

$$I_{\text{eff}} := n \cdot I + 2 \cdot \gamma \cdot A \cdot \bar{a}^2 + 2 \cdot \gamma \cdot A \cdot i^2$$

I	Trägheitsmoment der einzelnen Lamellen
$n=4$	Anzahl der Lamellen
A	Querschnittsfläche einer Einzellamelle
γ	Nachgiebigkeitsfaktor der Verbindung zwischen den Lamellen
$\bar{a}/i$	Abstand der Schwerachse der Lamellen-Querschnittsfläche A von der Spannungsnulllinie

Je nach Nachgiebigkeit der Verbindung verändert sich das effektive Trägheitsmoment des Querschnittes. Bei herkömmlichen BSH-Balken ist der Faktor $\gamma=1.0$, was bedeutet, dass die Verbindung der Lamellen untereinander so steif ist, dass man den Querschnitt als massives Element betrachten kann.

In den Vier-Punkt-Biegeversuchen wurden die Kraft F und die zugehörige Durchbiegung gemessen (Tabelle 7). In diesen Ausführungen vom besonderen Interesse ist das Verhältnis Kraft/Durchbiegung im elastischen Deformationsbereich.



Abbildung 31: Typisches Messergebnis bei den Biegeversuchen

Da die Durchbiegung abhängig vom Trägheitsmoment des Querschnittes ist, kann die Formel für die Durchbiegung, welche bekannt ist, so aufgelöst werden, dass das effektive Trägheitsmoment I_{eff} die einzige unbekannte Grösse ist:

$$w = (23/1296) \cdot F \cdot L^3 / EI \Rightarrow I_{\text{eff}} = (23/1296) \cdot (F/w) \cdot L^3 / E$$

Als Referenzwert wurde gemäss Norm das E-Modul des Vollholzprüfkörpers gleicher Grösse auf $11'000 \text{ N/mm}^2$ gesetzt. Setzt man nun die effektiven Trägheitsmomente aus der Durchbiegung und dem Gamma-Verfahren für nachgiebig verbundenen Träger gleich, kann man einen Gamma-Wert für die Verbindung bestimmen:

$$\gamma = [I_{\text{eff}} - n \cdot I] / [2 \cdot A \cdot (a^2 + i^2)]$$

Die Berechnung zeigt, dass für alle Klebstoffe mit Ausnahme der Nr. 91 der Gamma-Werte praktisch gleich 1 ist: D.h. bei Anwendung der Klebstoffe sind im Gebrauchszustand die Deformationen gleich gross wie bei herkömmlichem Brettschichtholz.

Für die Klebstoff-Nr. 91 erhält man einen Gamma-Wert von ca. 30%. Der ganzheitliche E-Modul des Querschnittes beträgt statt 11 kN/mm^2 weniger als 7 kN/mm^2 . Im Vergleich zum herkömmlichen Brettschichtholz sind die Deformationen zu gross.

5.4 Biegewiderstand

Im Vier-Punkt-Biegeversuch gibt es folgende Beziehung zwischen der Kraft F und den Beanspruchungen V (Querkraft) und Moment M :

$$V = F/2$$

$$M = F \cdot L/6$$

Für einen Rechteckquerschnitt mit Breite b und Höhe h gelten bei Annahme der Elastizitätstheorie folgende Beziehungen:

$$\text{Biegefestigkeit: } f_m = \sigma_{\text{MAX}} = M_{\text{MAX}}/W = (F_{\text{MAX}} \cdot L/6)/(b \cdot h^2/6) = F_{\text{MAX}} \cdot L/b \cdot h^2$$

$$\text{Schubwiderstand: } f_v = \tau_{\text{MAX}} = 1.5 \cdot (V_{\text{MAX}}/A) = 1.5 \cdot (F_{\text{MAX}}/2)/(b \cdot h) = 0.75 F_{\text{MAX}}/(b \cdot h)$$

Da alle Versuchsbalken klar auf Biegung versagen, wird der Schubwiderstand f_v nicht erreicht. Für Vergleichszwecke wird τ_{MAX} aufgeführt. Die Kraft-Deformationskurven aus den Biegeversuchen zeigen eine deutliche Abflachung gegen der Bruchlast. Damit ist klar, dass eine gewisse Plastifizierung im Querschnitt des BSH Trägers erreicht wird. Der Grad der Plastifizierung ist unbekannt. Gemäss den Ausführungen des 4 Biegeversuche ist bei den meisten Klebstoffen teilweise eine Plastifizierung auf der Biegedruckseite des Versuchsbalkens beobachtet worden: Damit kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass das duktile Tragverhalten nur wegen der duktilen Nachgiebigkeit des Klebstoffes zurückzuführen ist. Die in der Abb. 29 dargestellten Werte der plastischen Biegefestigkeit $f_{m,P}$ sind idealisierte, fiktive Werte die sich gemäss folgende Formel berechnen lassen:

$$f_{M,P} = M_{MAX} / W_p = (F \cdot L / 6) / (b \cdot h^2 / 4) = \frac{2}{3} \cdot (F \cdot L) / (b \cdot h^2)$$

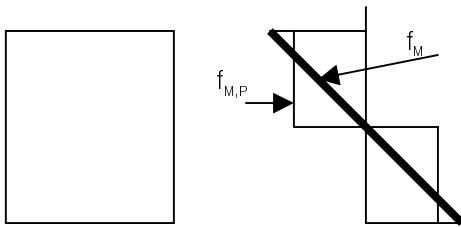


Abbildung 32: Annahme der Spannungsverteilung

Tabelle 7: Zusammenstellung der Festigkeitswerte der Trägersysteme

	Vollholz	BSH		KLEBSTOFF-NR					
		G24	G36	36	39	40	51	64	91
F_{MAX} kN				17.3	16.0	17.6	13.6	12.9	3.8
f_v resp. τ_{MAX} N/mm ²	2.4	2.4	2.4	3.1	2.9	3.2	2.5	2.3	0.69
f_M N/mm ²	40	32	50	72.8	67.4	74.6	57.1	54.4	16.0
$f_{M,P}$ N/mm ²	-	-	-	48.5	44.9	49.3	38.1	36.3	10.7

Aus der Tabelle 7 ist ersichtlich, dass insbesondere bei Anwendung der Klebstoff-Nr. 91 die Festigkeitswerte ungenügend sind. Mit den anderen, steiferen Klebstoffe werden wesentlich grössere Biegefestigkeit erreicht. Allerdings ist zu beachten, dass kleine Prüfkörper verwendet sind, die erfahrungsgemäss bessere Festigkeitswerte als BSH aufweisen. Es ist nicht sicher, ob mit normalem BSH-Lamellen die hohen Festigkeitswerte erreicht werden können.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Allgemeines

Das Hauptziel des Projektes war die Abklärung der Machbarkeit eines Spezialklebstoffes für die Herstellung von duktilen Holzträgersystemen. Es konnten aus mehreren Dutzend Mischungen, zwei Klebstoffmischungen ermittelt werden, die einige Anforderungen für ein optimales Funktionieren eines duktilen Holz-Trägersystems erfüllen können. Das Projekt konnte weitgehend gemäss Planvorgaben durchgeführt werden.

6.2 Projekterkenntnisse

In Tabelle 8 ist der Vergleich zwischen den Projektzielen und den Projektergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 8: Schlussfolgerung zu den Projektzielen

Projektziele	Wie weit ist das Ziel erreicht worden?
Theoretische Grundlagen	Es sind theoretische Überlegungen angestellt worden, um die Funktionsweise eines duktilen Holzträgersystems zu erklären. Es sind erforderliche Materialeigenschaften des Klebstoffes geklärt worden, um das erwartete duktile Tragverhalten des BSH-Systems zu erreichen. Das Projektziel ist in diesem Bereich erreicht worden.
Entwicklung eines Spezialklebstoffes	Geistlich Ligamenta AG hat verschiedene Klebstoffe mit den geforderten, duktilen Eigenschaften entwickelt. Biegeversuche an BSH Trägersystemen, die mit dem duktilen Klebstoff verleimt wurden bestätigen, dass ein duktiles Verhalten des Gesamtsystems erreicht werden kann. Eine mögliche Abgrenzung der Klebstoffe konnte erreicht werden. Der Klebstoff Nr. 39 ist zu hart,; der daraufhin entwickelte Klebstoff Nr. 91 ist jedoch wieder zu weich. Die geforderten Eigenschaften können möglicherweise in einem weiteren Projekt durch die Vermischung dieser zwei Klebstoffe erreicht werden. Das Projektziel ist erreicht, es sind mehrere duktile Klebstoffe entwickelt worden, eine Auswahl konnte getroffen werden.
Biegeversuche am Trägersystem	6 Klebstoffmischungen wurden zur Herstellung von mittelgrossen BSH-Balken mit 1mm Klebstoff-Fuge verwendet. Mit diesen wurden Biegeversuche durchgeführt, die ein duktilen Verhalten des Systems aufwiesen. Biegeversuche sind durchgeführt worden, die Ergebnisse sind weitgehend positiv, das Projektziel ist somit erreicht.
Entwicklung eines Berechnungs-verfahrens	Aus dem Vergleich der Berechnungen und der Messergebnisse der Biegeversuche sind Erkenntnisse zur erneuten Anpassung und Einstellung des Klebstoffes gefolgert worden. Diese müssen in einem Folgeprojekt bestätigt bzw. weiter verfeinert werden. Das Projektziel ist nur teilweise erreicht worden auf Grund von Fragen die sich im Verlauf des Projektes ergeben haben. Dies muss in einem Folgeprojekt geklärt werden.

6.3 Noch offene Fragen

Das duktile Tragverhalten der Trägersysteme ist wahrscheinlich nur zum Teil auf die Klebstoffeigenschaften zurückzuführen. Dies ist daran zu erkennen, dass bei einigen Klebstoffmischungen auf der Oberseite des Trägersystems Druckstauchungen aufgetreten sind. Die E-Module und die Biegefestigkeiten waren sehr hoch. Bei den Biegeversuchen der BSH Balken mit dem Klebstoff Nr. 91 sind die Brüche in den Fugen nicht eindeutig als Kohäsionsbruch zu erkennen. Weiterhin stellt sich die Frage, ob das Trägersystem auch bei praxisüblichen BSH Lamellen funktioniert, da bisher nur fehlerfreie Proben verwendet wurden. Möglicherweise müssen die Eigenschaften des Klebstoffes weiter modifiziert werden.

Das entwickelte Berechnungsverfahren muss für die praxisgerechte Anwendung noch verfeinert werden. Ein Ansatz könnte darin bestehen, nicht nur die Schubverformung als Einflussfaktoren zu beachten, sondern auch die mögliche Biegeverformung der dicken Klebstofffuge mitzuberechnen.

Für weitere Vergleiche und Klebstoffentwicklungen drängt sich die Frage auf, ob zur Evaluation eines duktilen Klebstoffes weitere Klebstoff-Prüfverfahren angewendet werden sollten, damit die relevanten Eigenschaften besser ermittelt werden können.

6.4 Das weitere Vorgehen

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern haben sich mehrere Themen für weitere Untersuchungen ergeben:

- Auf Grund der Beobachtung, dass die Neigungen der Scherkraft-Deformations-Kurven für die Klebstofffugen mit Dicken von 0.5, 1.0 oder 3.0 mm ähnlich sind, kann angenommen werden dass neben der "normalen" Scherdeformation auch eine Wölbung, siehe Abbildung 19, in der dicken Klebstofffuge auftritt. Dieser Effekt kann mit Versuche am ENSTIB in Epinal überprüft werden. Dabei wird das Krümmungsverhalten des Klebstoffs bei Abscheren analysiert.
- Zur Verbesserung der Adhesion und Kohäsion könnte bei zukünftigen Klebstoffmischungen ein Füllstoff zum Beispiel Glasfasern beigemischt werden.
- Um die Fließ- und Kriecheigenschaften näher zu untersuchen, sollten Biegeversuche bei unterschiedlichen Temperaturen der BSH Balkensysteme durchgeführt werden.
- Um die Wirtschaftlichkeit des Produktes zu ermöglichen, muss die Produktionstechnik des Trägersystems entwickelt werden.

Der Industriepartner Geistlich Ligamenta AG ist an der Weiterbearbeitung des Projektes im Rahmen eines weiterführenden Forschungsprojektes interessiert.

7 Bestimmungen zu diesem Forschungsbericht

Der Bericht wurde klassiert als: Öffentlich

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.

7.1 Umfang des Forschungsberichtes

Dieser Forschungsbericht besteht aus dem Titelblatt, dem Abstract und 35 Seiten inkl. Anhang.

Biel, 25.03.2004

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

8 Verzeichnisse

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Festigkeitswerte des Brettschichtholzes gemäss Norm SIA 265	12
Tabelle 2: Beschreibung der Klebstoffmischungen	13
Tabelle 3: Prüfkörperübersicht	20
Tabelle 4: Bruchversagen der BSH Balken der fünf ersten Klebstoffmischungen	23
Tabelle 5: Prüfungsablauf der Biegeversuche Serie 2	24
Tabelle 6: Bruchversagen der Biegeversuche Serie 2 mit Klebstoff Nr. 91	25
Tabelle 7: Zusammenstellung der Festigkeitswerte der Trägersysteme.....	30
Tabelle 8: Schlussfolgerung zu den Projektzielen	31

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umverteilung der Biegespannungen durch sukzessives "Fliesen" der Klebstoffuge . 3	
Abbildung 2: Spannungs-Dehnungs-Verläufe von einem duktilen (Baustahl) und einem spröden (Gusseisen) Baustoff	6
Abbildung 3: Der klassische, zusammengesetzte Querschnitt	7
Abbildung 4: Schubbeanspruchung der Klebstoffuge gemäss der klassischen Theorie	8
Abbildung 5: Idealisertes Tragverhalten eines duktilen Balkens bei zunehmender Belastung: a) Elastisch, b+c) Ablauf der Plastifizierung, d) Vollständig plastifiziert	8
Abbildung 6: Die grosse Scherung in der neutralen Achse bei der vollständigen Plastifizierung des Querschnittes	9
Abbildung 7: Mögliche Begrenzung der Klebstoff-Plastifizierung auf die äusseren Holzlamellen....	10
Abbildung 8: idealisiertes Tragverhalten des Spezialklebstoffes für das duktile Trägersystem	10
Abbildung 9: Zug-Scherversuch, um dasTragverhalten eines Klebstoffes zu charakterisieren	11
Abbildung 10: Idealisertes Spannung-Deformations-Verhaltens des Spezialklebstoffes	11
Abbildung 11: Schnittkraftverläufe im einfachen Balken mit Gleichlast	11
Abbildung 12: Versuchsaufbau der Zug-Scher-Prüfkörper gemäss EN 205: Anhang A	13
Abbildung 13: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 0mm Fuge	14
Abbildung 14: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 0.5mm Fuge	15
Abbildung 15: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 1.0mm Fuge	15
Abbildung 16: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfungen der ausgewählten Klebstoffmischungen bei 3.0mm Fuge	16
Abbildung 17: Ergebnisse des Zug-Scher-Versuches mit unterschiedlichen Fugendicken des Klebstoffes Nr. 39	17
Abbildung 18: "Fliessgrenzen" der Klebstoff-Nr. 39 - 64 in Abhängigkeit der Klebstoffuge	17
Abbildung 19: Berechnungsmodell des Deformationsanteils infolge Scherkraft (links), resp. Biegemoment (rechts)	18
Abbildung 20: Beleimung der Lamellen.....	20
Abbildung 21: Prüfanordnung, statisches System der Biegeversuche	21
Abbildung 22: Prüfanordnung des 4-Punkt-Biegeversuchs an der Schenk-Maschine, einschliesslich Wegaufnehmer zur Bestimmung des E-Moduls	21
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Versuchablaufs: Zeit-Last-Diagramm	22
Abbildung 24: Resultate der Balkenbiegeversuche mit fünf ausgewählten Klebstoffmischungen	22
Abbildung 25: E-Moduli der Trägersysteme der Klebstoffmischungen im Vier-Punkt-Biegeversuch	23
Abbildung 26: Biegedruckstauchungen auf einem Prüfkörper der Klebstoff-Nr. 36.....	24
Abbildung 27: Kraft-Deformations-Diagramme der Prüfkörper der Klebstoff-Nr.91	25
Abbildung 28: Vergleich des Biegeversuchs Vollholz V1, Nr. 39.1 und Nr. 91.5, Ausschnitt aus der Prüfkurve	26

Abbildung 29: Vergleich der E-Moduli der Systeme Nr. 39 und Nr. 91	26
Abbildung 30: Aufbau der Biegeversuche	28
Abbildung 31: Typisches Messergebnis bei den Biegeversuchen	29
Abbildung 32: Annahme der Spannungsverteilung	30

8.3 Literaturverzeichnis

- [1] Kollmann, F.: (1955) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Bd.1, Springer Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg,
- [2] Kollmann, F.: (1955) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Bd. 2, Springer Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg,
- [3] Gustafsson J.: "Tests and Test Results on Mechanical Properties of Adhesive Bond Lines", Chapter 2, of Final Report, COST E13, Version 4, Jan. 2000.
- [4] Hentschel k.H., Jürges E., Wellner W.: "Flexible epoxy resin systems", Farbe + Lack, 2/1998, pages 97 - 102, Curt R. Vincentz-Verlag, Hannover, Deutschland
- [5] Holzenkämpfer P.: "Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile", deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 473, Beuth Verlag, 1997.
- [6] Triantafillou T.C., Deskovic N., "Innovative prestressing with FRP-sheets: Mechanics of short-term behaviour", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, Nr. 7, July 1991, pp1652-1672
- [7] Triantafillou T.C., Deskovic N., "Prestressed FRP-Sheets as external reinforcement of wood members", *Journal of Structural Engineering*, Vol 118, Nr. 5, May 1992, pp1270-1284
- [8] François Frey, *Analyse des structures et milieux continus, chapitre 18*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 1994.
- [9] Brunner M.: "On the Plastic Design of Timber Beams with a complex Cross-Section", WCTE 2000, Whistler, Canada, 2000
- [10] Brunner M., Pichelin F., Schnüriger M.: "Development of a suitable Adhesive for the Gluing of Prestressed artificial Fibres to Glulam Beams", COST Action E13, International Symposium on Wood based Materials, September 2002, Vienna, Austria
- [11] Brunner M., Schnüriger M.: "Verstärkung von Holzbalken mit vorgespannten Fasern: Entwicklung eines geeigneten Klebstoffes und Technologie", Forschungsbericht zu Handen des Bundesamtes für Bildung und Wissenschaft BBW, Service COST, Bern, März 2003, nicht veröffentlicht.
- [12] Normen SIA 2004: Speziell
 - SIA 260 "Grundlagen"
 - SIA 261 "Einwirkungen"
 - SIA 262 "Betonbau"
 - SIA 263 "Stahlbau"
 - SIA 265 "Holzbau"