

Gebogenes Brettsperrholz – Forschung und Anwendung

Curved Cross-Laminated-Timber elements –
Research and application

Le CLT cintré – état des lieux de la recherche et
applications

Georg Stecher
Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften –
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck
Österreich



Roland Maderebner
Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften –
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck
Österreich



Anton Kraler
Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften –
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck
Österreich



Michael Flach
Institut für Konstruktion und
Materialwissenschaften –
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck
Österreich



Gebogenes Brettsperrholz – Forschung und Anwendung

1. Einleitung

Im Holzbau ist es immer wieder zur Anwendung gekrümmter Holzbauteile gekommen. Der Einsatz gekrümmter CLT-Elemente ist allerdings noch relativ jung. Zur Erlangung einer *Europäisch-Technischen-Zulassung (ETZ)* für das sogenannte Radiusholz (einfach gekrümmte CLT-Elemente) hat die Holzbau Unterrainer GmbH die akkreditierte Prüfanstalt TVFA – Innsbruck beauftragt, die dafür erforderlichen Untersuchungen durchzuführen. Dafür wurden in einem Zeitraum von Dezember 2013 bis Mai 2014 insgesamt 144 Versuche in Bauteilabmessungen und *mehrere* Kleinversuche zur Kontrolle der Qualität der Klebefugen durchgeführt. Durch die einfach gekrümmte Form der Radiusholzelemente gilt es besonderes Augenmerk auf die möglichen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit durch die Vorspannung der Lamellen zu legen. Um den Anforderungen des im Eurocode 5 (*EN 1995-1-1*) zugrunde gelegten semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes zu genügen, müssen die durch diese Vorkrümmungen verursachten Auswirkungen auf die Festigkeiten, Steifigkeiten und Rohdichten bekannt sein.

Durch die Wahl dieser gekrümmten Elemente können sehr schlanke Dachkonstruktionen ermöglicht werden. So errichtete das Unternehmen im Sommer 2013 eine neue Produktionshalle. Für die Dachkonstruktion wurden dabei die gebogenen CLT-Platten eingesetzt. Trotz der relativ hohen Schneelasten von $s_k = 3,60 \text{ kN/m}^2$ [1] haben die Elemente lediglich eine Stärke von 160 mm bei einer Spannweite von 20 m. Für dieses Projekt erhielt die Firma Unterrainer unter anderem den Tiroler Holzbaupreis.

Durch die speziellen Eigenschaften von Brettsperrholz gilt es bei den gekrümmten Varianten folgende Effekte im Besonderen zu berücksichtigen: Eigenspannungen der Lamellen infolge der Vorkrümmungen und mögliche Relaxationen, Interaktion Rollschub und Querkzugbeanspruchungen durch die Krümmung sowie die Qualität der Klebefugen. Um diese Effekte genauer untersuchen zu können und zur Erlangung einer Europäischen Technischen Zulassung werden an der akkreditierten Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt der Universität Innsbruck (kurz TVFA-Innsbruck) Versuche an insgesamt 144 Prüfkörpern in Bauteilabmessungen durchgeführt. Durch die spezielle Form der Prüfkörper entstehen auch besondere Anforderungen an das Versuchsssetup. Dabei werden die Versuche in Anlehnung an die prEN 16351:2011 [2] in enger Abstimmung mit dem Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) mit Sitz in Wien durchgeführt. Dabei wird prinzipiell nach einer Scheiben- bzw. Plattenbeanspruchung der CLT-Elemente unterschieden. Für die Bestimmung der Festigkeits- und Steifigkeitsparameter werden Biege-, und Querkraftversuche durchgeführt. Der Krümmungsradius ist dabei bei der Plattenbeanspruchung von entscheidendem Einfluss. Durch die gekrümmte Form entstehen im mittleren Drittel zusätzliche Querkzugspannungen. Ein Umstand der mit Sicherheit im allgemeinen Wissen als verankert angesehen werden kann. Allerdings gilt es dieser Beanspruchung bei Brettsperrholz-Elementen im Besonderen Augenmerk zu schenken. Diese sind bei der Bemessung bzw. Interaktion mit der Rollschub Beanspruchung bei der Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit meist maßgebend. Neben den Untersuchungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften werden in Kooperation mit der Holzforschung Austria Delaminierungsversuche nach EN 14080 [3] durchgeführt, um die Qualität der Klebefugen zu verifizieren. Außerdem wurden noch (Block-) Scherprüfungen nach Anhang D [3] durchgeführt.

Die ersten Untersuchungen an diesem Produkt haben bereits 2010 begonnen. Umso mehr ist es jetzt erfreulich, dass eine europäische Zulassung bis Ende dieses Jahres ausgestellt werden kann.

Weitere Anwendungen wie zum Beispiel beim renommierten Bauvorhaben der Swarovski Kristallwelten zeigen das Potential dieses Produktes in eindrucksvoller Art und Weise. Durch dieses Projekt konnte erneut unter Beweis gestellt werden, dass der Holzbau vor allem durch innovative KMUs an Attraktivität fortlaufend gewinnt.



Abbildung 1: Produktionshalle der Firma Unterraine und gekrümmte BSP-Elemente

2. Experimentelle Untersuchungen

Es wird an insgesamt 144 repräsentativen Prüfkörpern in Bauteilabmessungen prinzipiell zwischen Plattenbeanspruchung und Scheibenbeanspruchung unterschieden, und hier wiederum zwischen Biege- und Schubbeanspruchungen. Zudem werden für die jeweilige Beanspruchungsarten 5- und 9-schichtige Brettsperrholz-Elemente untersucht. Die Elemente zur experimentellen Untersuchung der Scheibenbeanspruchung weisen keine Krümmung der Lamellen auf. Der Krümmungsradius der Plattenelemente wird in Abhängigkeit der Lamellenstärke nach Gleichung (1) nach prEN16351:2011 [2] gewählt:

$$t_{l,i} \leq \frac{r}{250} \cdot \left(1 + \frac{f_{m,j,dc,k}}{80}\right) \quad (1)$$

Dabei ist

$t_{l,i}$	endgültige Lamellendicke
r	Krümmungsradius
$f_{m,j,dk,k}$	deklariertes charakteristischer Wert der Keilzinken Biegefestigkeit

Alle Prüfkörper werden vor den Versuchen im Normalklima bei 65% relativer Luftfeuchte und 20 °C über mehrere Wochen konditioniert. Das Probenkollektiv zu den Bauteilversuchen ist in Tabelle 1 nachzulesen. Die Proben werden jeweils mit dem maximal größtmöglichen Radius hergestellt. Dabei werden für die Biegeprüfungen 5-schichtige und 9-schichtige Elemente mit einer Lamellenstärke von 19 mm und einem Biegeradius von 4500 mm hergestellt. Für die Schubprüfungen werden die 5-schichtigen Elemente mit einer Lamellenstärke von 32 mm und einen Biegeradius von 6500 mm und die 9-schichtigen Elemente werden wie bei den Biegeversuchen aus Lamellen mit einer Stärke von 19 mm und einem Biegeradius von 4500 mm produziert. Insgesamt werden 72 gekrümmte Versuchselemente als Platten, und 72 gerade Versuchselemente hinsichtlich der Scheibentragfähigkeit geprüft. Auf die Scheibenversuche wird im Weiteren nicht näher eingegangen, da es sich hierbei um Standardversuche handelt. Auf Prüfungen der Grundlamellen wird generell verzichtet, da die Firma Unterrainer maschinell vorsortierte Bretter mit einer vorhandenen CE-Kennzeichnung zukaufft.

Tabelle 1: Probenkollektiv

Typ	Bezeichnung [-]	Stückzahl [-]	Schichtzahl [-]	Lamellenstärke [mm]	Radius [m]
1	Platte - Biegung	18	5	19	4,5
2	Platte - Biegung	18	9	19	4,5
3	Platte - Schub	18	5	32	6,5
4	Platte - Schub	18	9	19	4,5
5	Scheibe - Biegung	18	5	19	∞
6	Scheibe - Biegung	18	9	19	∞
7	Scheibe - Schub	18	5	32	∞
8	Scheibe - Schub	18	9	19	∞

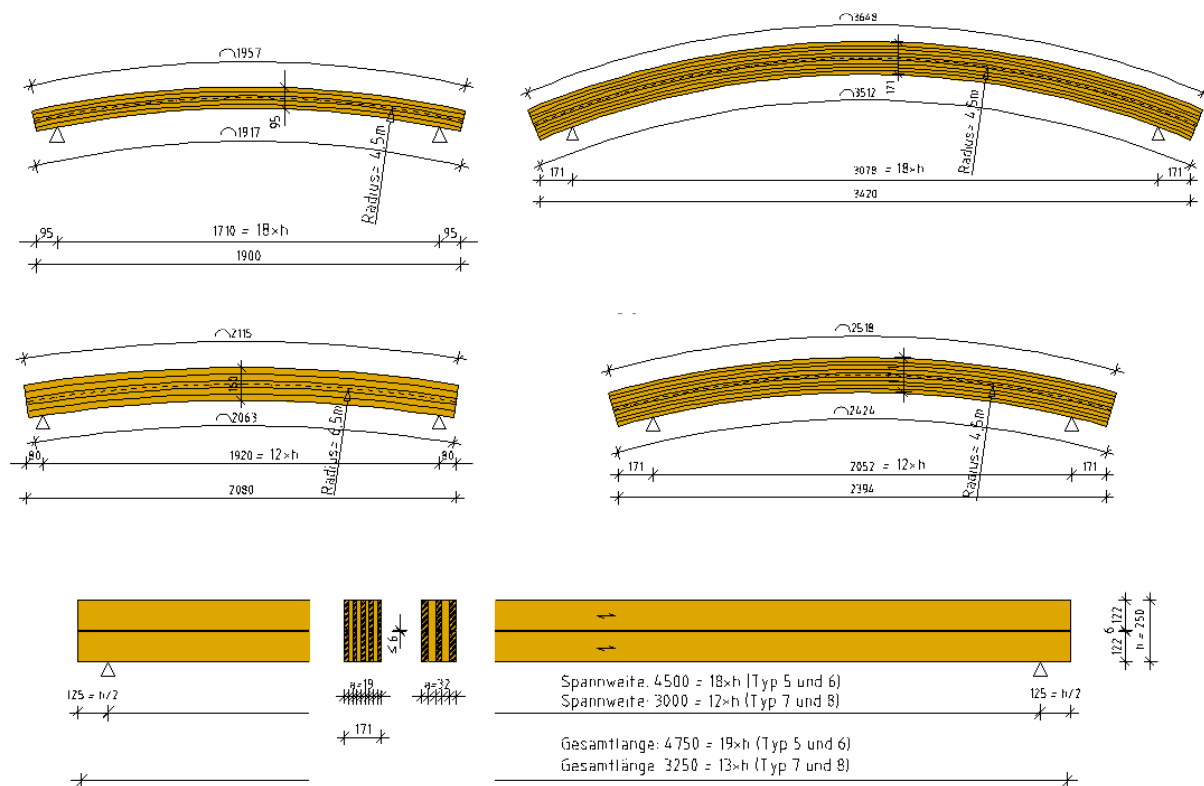


Abbildung 2: Geprüfte CLT-Elemente in Übereinstimmung mit prEN 16351 [2]

2.1. Biegeprüfungen

Die einfach gekrümmte Form der Prüfkörper stellen jedoch zusätzliche Anforderungen an das Versuchssetup und die Auswertung der Versuche. Als normative Basis für die durchzuführenden Versuche wird die prEN 16351:2011 [2] verwendet. Diese Norm gibt jedoch keine Angaben zum Versuchssetup von gekrümmten Platten. Zur Überprüfung, ob der Versuchsaufbau mit den angegebenen Abmessungen auch für einfach gekrümmte Elemente anwendbar ist werden im Vorfeld Finite Elemente Analysen durchgeführt. Diese Analysen bestätigen, dass bei den Biegeversuchen die Abmessungen beibehalten werden können. Der Vorteil die Elemente in Übereinstimmung zu den Biegeversuchen von geraden Stabelementen mit einem Überstand von mindestens $h/2$ zu prüfen und entgegen dem in der praktischen Anwendung typischen Auflagersattel (Anschnitt der Plattenelemente) liegt darin, dass dadurch keine Normalkräfte entstehen, eine entsprechende Ausbildung der Auflager eine konstante Stützweite gewährleistet werden kann. Für die Einleitung der Lasten in die gelenkigen Auflagerpunkte werden spezielle Unterlegkeile aus Buchenholz und aufgeschraubte Stahlplatten verwendet.

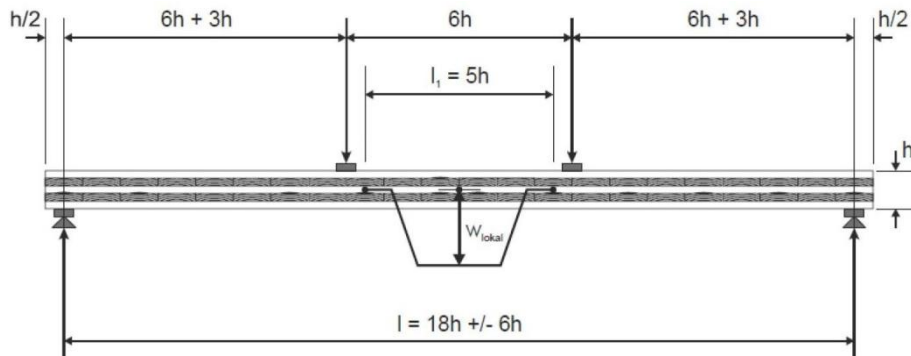


Abbildung 3: Aufbau eines Biegeversuchs nach [2]

Bei den Laborversuchen sollen primär die Steifigkeits- sowie Festigkeitsparameter der Elemente bestimmt werden. Neben der Maschinenkraft zur Bestimmung der Festigkeitskenngrößen und der globalen – sowie lokalen Biegesteifigkeit, werden Verformungsmessungen über die Querschnittshöhe durchgeführt, um Rückschlüsse auf die auftretenden Querzugspannungen zu ziehen. Abbildung 4 stellt einen im Labor durchgeführten Biegeversuch samt Messeinrichtung dar.

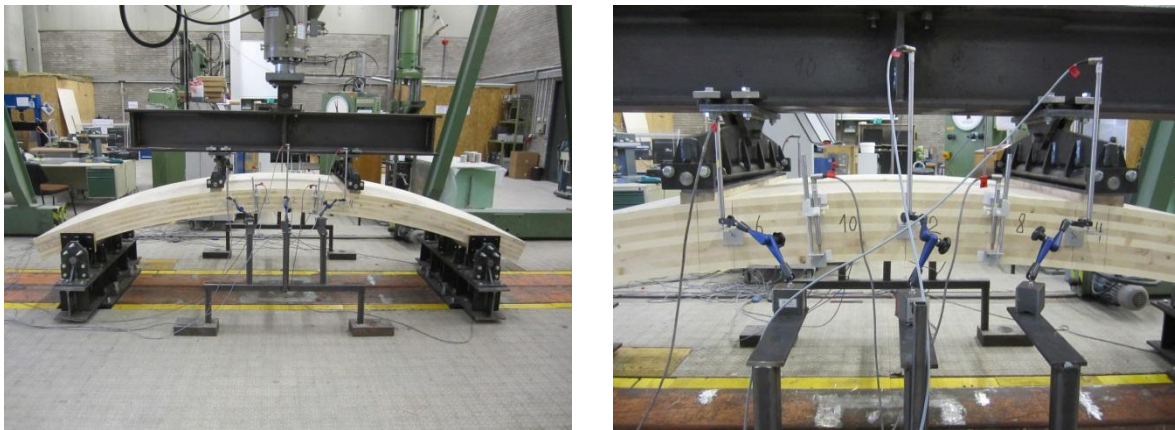


Abbildung 4: Eingebauter Biegeversuch eines 9-schichtigen einfach gekrümmten Brettsperrholzelements

2.2. Schubprüfungen

Wie bei den Biegeversuchen gilt als normative Basis für die Durchführung der Schubversuche prEN 16351:2011 [2]. Auch bei den Schubversuchen gibt die Norm keine Anweisungen zur Prüfung von gekrümmten Brettsperrholzelementen. Daher werden im Vorfeld wiederum Finite Elemente Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse der FE-Analysen ergeben, dass sich das Versuchssetup bezogen auf die Abstände zwischen Lasteinleitung und Auflagerfläche nur bedingt zur Prüfung von gekrümmtem Brettsperrholz eignet. Funktioniert das Versuchssetup für gerade Platten noch, so muss für gekrümmte Elemente der Abstand zwischen Auflagerfläche und Lasteinleitungsfläche von $3 \cdot h$ auf $2 \cdot h$ verringert werden, damit ein eindeutiger Schubbruch auftritt.

Bei den Laborversuchen werden wie schon bei den Biegeversuchen die Steifigkeits- und Festigkeitsparameter des gekrümmten Brettsperrholzes ermittelt. Die Maschinenkraft wird zur Ermittlung der Rollschubfestigkeit benötigt. Analog zu den Biegeversuchen werden auch bei den Schubversuchen die globale und lokale Biegesteifigkeit sowie die Schubsteifigkeit der gekrümmten Elemente bestimmt.

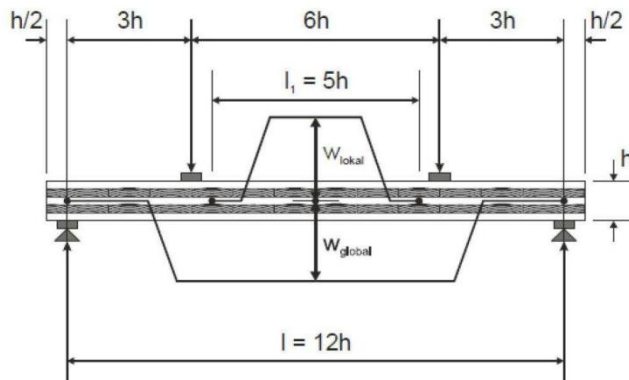


Abbildung 5: Aufbau eines Schubversuchs nach [2]



Abbildung 6: Eingebauter Schubversuch eines 9-schichtigen einfach gekrümmten Brettsperrholzelements

3. Nachweisführung

Bei der Berechnung der Verteilung der Biegespannungen in gekrümmten Elementquerschnitten ist zu berücksichtigen, dass kein linearer Verlauf der Spannungs-Dehnungsbeziehung über die Querschnittshöhe mehr besteht. Die Spannungsverteilung soll im Bereich der Biegezugzone mit dem Beiwert k_ℓ nach Gleichung (2) erhöht werden.

$$\sigma_{m,d} = k_\ell \cdot \frac{M_{Ed}}{I_{0,net}} \cdot e_z \quad (1)$$

mit

$$k_\ell = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right) + k_3 \cdot \left(\frac{h}{r_0}\right)^2 \quad (2)$$

Dabei ist

k_1	Beiwert $k_1 = 1,00$
k_2	Beiwert $k_2 = 0,35$
k_3	Beiwert $k_3 = 0,60$
h	Bauteildicke an der Stelle x
r_0	Radius an der Stelle x

Werden die Nachweise für die Grenzzustände der Tragfähigkeit an der Lamelle geführt, können sogenannte Systemeffekte berücksichtigt werden. Die ÖNORM B 1995-1-1 [4] erlaubt hier bei einer entsprechenden Lastverteilung in Querrichtung die Erhöhung der Festigkeitskennwerte für verklebte Einzelquerschnitte durch den Beiwert k_{sys} um bis zu 20%.

$$k_{\text{sys}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{1}{35} \cdot (n-1) \\ 1,20 \end{array} \right. \quad (3)$$

Durch die gebogene Form der Brettsperrholzelemente dürfen auftretende Querkzugspannungen nicht vernachlässigt werden. Querkzug, hier bedingt durch die Geometrie des Bauteils, entsteht wenn die Krümmung und das Moment entgegengesetzte Vorzeichen haben, auf Grund der Umlenkung der Zug- und Druckkräfte. Für die Berechnung von gebogenen Elementen gibt die ÖNORM B 1995-1-1 [4] für Laminare mit schubweichen Zwischenschichten keine gesonderten Angaben. Durch die labortechnische Prüfung von gebogenen Elementen mit kleinstmöglichen Biegeradien in Abhängigkeit der Lamellendicken, wird diese Beanspruchung bei der Bestimmung der Biegefestigkeiten indirekt mit erfasst, und beeinflusst somit auch die bestimmten Festigkeitskennwerte. Die Querkzugbeanspruchung kann mit Hilfe von Gleichung (4) bestimmt werden [5].

$$\sigma_{t,90,d} = -\frac{F_{c,Ed}}{r_0} = \frac{F_{t,Ed}}{r_0} \quad (4)$$

Bei einer Berechnung der Biegerandspannungen

$$\sigma_{m,d} = k_{\ell} \cdot \frac{M_{Ed}}{I_{0,net}} \cdot e_{z,max} \quad (5)$$

können je nach Anzahl der Lamellen für die Berechnung, die Ansätze nach Tabelle 2 abgeleitet werden.

Der Nachweis der Spannungen kann somit nach Gleichung (6) gemäß ÖNORM B 1995-1-1 Kapitel 6.4.3 [4] erfolgen.

$$\frac{\tau_{v/r,d}}{f_{v/r,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (6)$$

Dabei ist

$f_{t,90,d}$	Querkzugfestigkeit
$f_{v/r,d}$	Schubfestigkeit, Rollschubfestigkeit
k_{dis}	Beiwert nach [4]
k_{vol}	Beiwert nach [4]
$\tau_{v/r,d}$	Schub- Rollschubbeanspruchung
$\sigma_{t,90,d}$	Querkzugspannung

Tabelle 2: Querkzugspannungen in Abhängigkeit der Anzahl der Lamellen n , der Lamellendicken d_i und dem Biegeradius r_0

n	Querkzugspannungen $\sigma_{t,90,d}$ [N/mm²]	
	$d_i \neq d$, und $h = \sum d_i$	$d_i = d$ und $h = n \cdot d_i$
3	$\frac{\sigma_{m,Rand,d} \cdot (h^2 - 2 \cdot d_2 \cdot h + 2 \cdot d_1 \cdot d_2)}{4 \cdot h \cdot r_0}$	$\frac{2 \cdot d}{3 \cdot r_0} \cdot \sigma_{m,Rand,d}$
5	$\frac{\sigma_{m,Rand,d} \cdot (4 \cdot d_2^2 - 4 \cdot d_2 \cdot h + 8 \cdot d_1 \cdot d_2 + h^2)}{4 \cdot h \cdot r_0}$	$\frac{17 \cdot d}{20 \cdot r_0} \cdot \sigma_{m,Rand,d}$
7	$\frac{\sigma_{m,Rand,d} \cdot (4 \cdot d_2^2 + h^2 + 8 \cdot d_1 \cdot d_2 + 2 \cdot d_1 \cdot d_4 + 2 \cdot d_2 \cdot d_4 + 2 \cdot d_3 \cdot d_4 - 4 \cdot d_2 \cdot h - d_4 \cdot h)}{4 \cdot h \cdot r_0}$	$\frac{8 \cdot d}{7 \cdot r_0} \cdot \sigma_{m,Rand,d}$
9	$\frac{\sigma_{m,Rand,d} \cdot (4 \cdot d_2^2 + 4 \cdot d_4 + h^2 + 8 \cdot d_1 \cdot d_2 + 8 \cdot d_1 \cdot d_4 + 8 \cdot d_2 \cdot d_4 + 8 \cdot d_3 \cdot d_4 - 4 \cdot d_2 \cdot h - 4 \cdot d_4 \cdot h)}{4 \cdot h \cdot r_0}$	$\frac{49 \cdot d}{36 \cdot r_0} \cdot \sigma_{m,Rand,d}$

Zusätzliche Beanspruchungen – Zug und Druckkräfte – die auch Auswirkungen auf die Querkzugbeanspruchung haben sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Finite Elemente Berechnungen bestätigen die Gleichungen aus Tabelle 2.

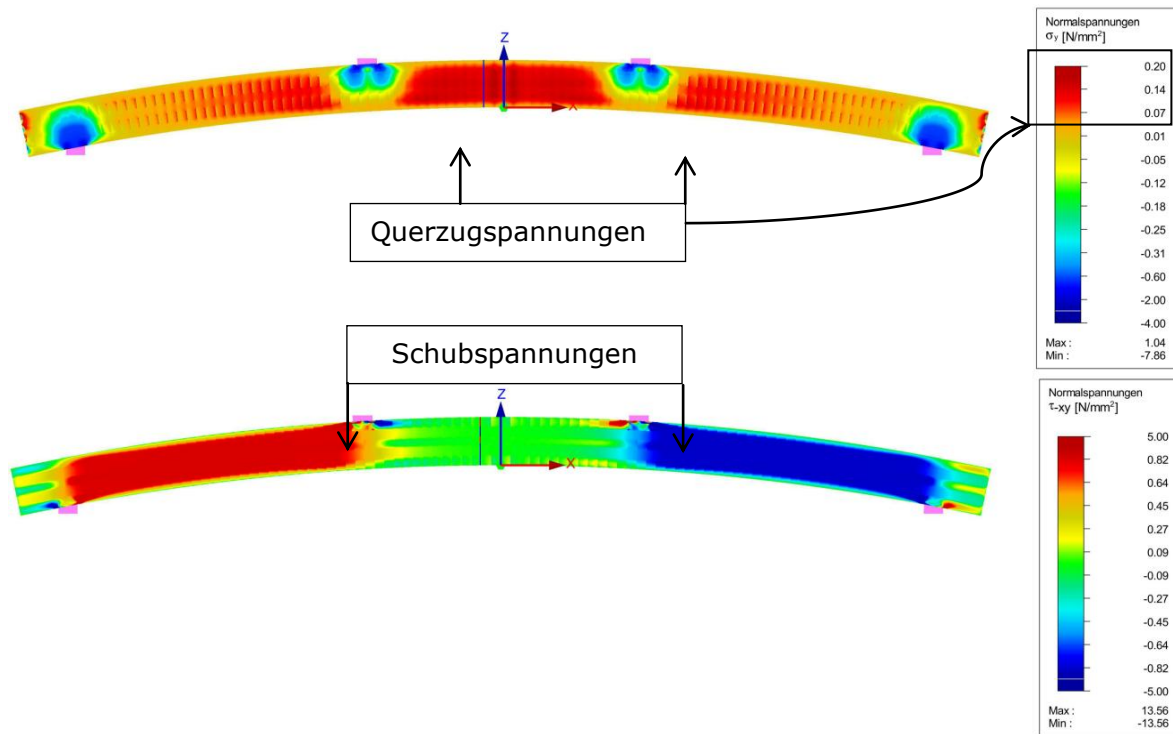


Abbildung 7: FE-Analyse: σ_y (Querdruck-, und Querzugspannungen; Bild oben) und die Schubspannungen über die Querschnittshöhe für Typ 1 (Bild unten)

4. Danksagungen

Die Autoren möchten sich bei der Firma Unterrainer GmbH recht herzlich für die gute Zusammenarbeit bedanken. Auch an die Österreichische Forschungsfördergesellschaft sei an dieser Stelle Anerkennung ausgesprochen, da diese durch eine Anschubfinanzierung über einen Innovationsscheck und einer darauf folgenden Machbarkeitsstudie eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung geschaffen haben. Ebenfalls ein Dankeschön den Mitarbeitern und der Leitung der TVFA- Innsbruck für die Durchführung der akkreditierten Versuche, sowie dem OIB für die fachliche Unterstützung und Beratung hinsichtlich des Zulassungsprozesses.

5. Literatur

- [1] ÖNORM EN 1991-1-3:2012
Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelast & Nationale Festlegungen ÖNORM B 1993-1-3:2013 Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelast Austrian Standard Institute, Wien 2012
- [2] prEN 16351:2011
Timber structures - Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties Austrian Standard Institute, Wien 2011
- [3] ÖNORM EN 14080:2013
Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen Austrian Standard Institute, Wien 2013
- [4] ÖNORM B 1995-1-1:2015
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbau (konsolidierte Fassung) Austrian Standard Institute, Wien 2015
- [5] Reiterer, Daniel
Gekrümmte Massivholzelemente; Diplomarbeit, Universität Innsbruck 2012