

CLT-Rippendecken im Brandfall – erste Versuchsreihe inkl. Referenzversuchen

Conference Paper**Author(s):**

Kleinhenz, Miriam ; Frangi, Andrea 

Publication date:

2020-03-06

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000404168>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

CLT-Rippendecken im Brandfall – erste Versuchsreihe inkl. Referenzversuchen

Vortragender:

KLEINHENZ, MIRIAM

Dipl.-Ing.
Institut für Baustatik und Konstruktion
ETH Zürich, Schweiz
kleinhenz@ibk.baug.ethz.ch



- 2007 – 2012 Bauingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- 2013 – 2014 Tragwerksplanerin bei bauart Konstruktions GmbH & Co. (Lauterbach, München)
- 2014 – 2018 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München (TUM)
- Seit Sept. 2018 Doktorandin am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich

Autoren: Miriam Kleinhenz; Andrea Frangi

Zusammenfassung

Für die Verwendung von Holzdecken in Gewerbe-, Wohn- und Industriegebäuden werden weitspannende Deckensysteme gefordert. Zusammen mit einem Industriepartner wird an der ETH Zürich ein Deckensystem diskutiert. Es ist das Ziel, Bemessungsregeln dieser CLT-Rippendecken - unter Berücksichtigung der effektiven Breite - für eine Brandbeanspruchung zu entwickeln, welche derzeit nicht durch den Eurocode abgedeckt werden.

Innerhalb einer ersten Versuchsreihe wurden vier Querschnitte (zwei T- / Box-Querschnitte) in Referenzversuchen unter Normaltemperatur auf ihre Bruchlast sowie in Großbrandversuchen auf ihre Feuerwiderstandsdauer untersucht. Die Ausführung und Erkenntnisse der T-Querschnitte werden in dieser Publikation beschrieben und diskutiert.

1. Einleitung

1.1 Massive Holzrippendecken

Als weitspannende Holzdeckensysteme sind neben der Verwendung von Holz-Beton-Verbunddecken ebenfalls Holz-Holz-Verbundsysteme in Betracht zu ziehen. Massive Holzrippendecken stellen solch eine Verbundmöglichkeit dar und ermöglichen dank ihrer hohen Biegesteifigkeit weitspannende Decken- und Dachelemente.

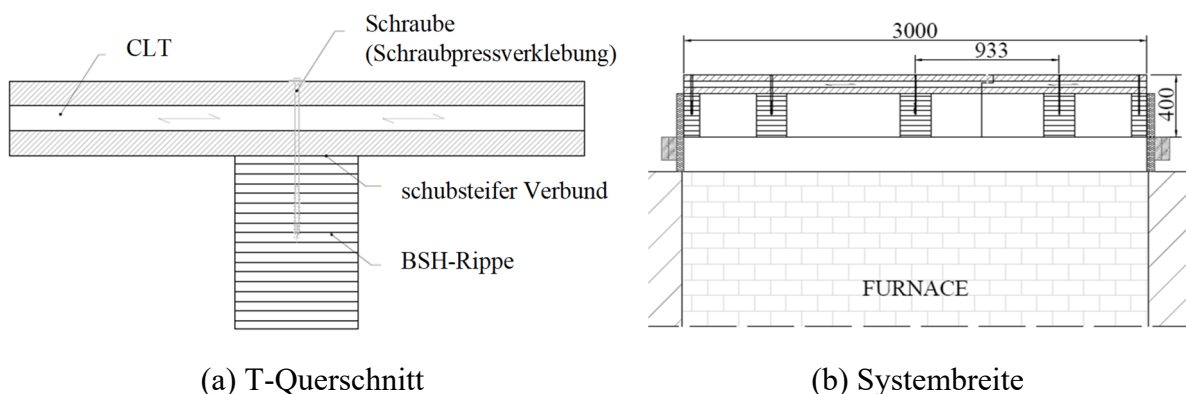


Abb. 1: System der CLT-Rippendecke

Zusammen mit dem Kooperationspartner Stora Enso Wood Products GmbH wird an der ETH Zürich ein solches Verbundsystem diskutiert. Hierbei wird der Flansch aus Brettsperrholz (BSP, engl.: cross-laminated timber, CLT) mit Rippen aus Brettschichtholz (BSH) zu einer massiven Holzrippendecke oder auch CLT-Rippendecke (engl.: CLT Rib Panel) kombiniert (s. Abb. 1). Die CLT-Platte und BSH-Rippen werden mithilfe Schraubpressverklebung schubsteif zu einem Verbundquerschnitt verklebt.

1.2 Zielsetzung des Projekts

Es wird das Brandverhalten und das Tragverhalten des Systems für den Brandfall analysiert. Das Feuerwiderstandsverhalten wird mit der Terminologie der Europäischen Bemessungsnorm für Holzbauten (Eurocode 5) beschrieben. Die wichtigsten Werkzeuge für die Entwicklung von Bemessungsregeln sind Feuerwiderstandsprüfungen als Großbrand- und Kleinbrandversuche sowie thermische und mechanische Simulationen.

2. Effektive Breite

2.1 Begriffserklärung

Bei Verbundquerschnitten mit verhältnismäßig großen Rippenabständen ist die Annahme eines eben bleibenden Querschnitts unzutreffend. Die einfache Balkentheorie ist nicht anwendbar, da die Verschiebungen im Flansch je nach Abstand zur Rippe variieren und der Flanschbereich über der Rippe höher beansprucht wird als der rippenferne Flanschbereich. Dieses Phänomen wird als Schubverzögerung bezeichnet. Das System ist nicht über die gesamte Breite gleich steif. Der steifere Teil über der Rippe nimmt mehr Spannungen auf, während das Mittelfeld eine höhere Scherverformung erfährt.

Die ungleichmäßige Spannungsverteilung über die Flanschbreite kann durch eine gleichmäßige Spannungsverteilung im Bereich einer effektiven Breite ersetzt werden, welche dieselbe maximale Normalspannung und Biegesteifigkeit aufweist. Als Folge können konstante Spannungs- und Dehnungsverteilungen über die Flanschbreite angenommen werden. [1][2]

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Stand Europäischer Normung

Die Einführung einer effektiven Breite oder auch mitwirkenden Plattenbreite, um Spannungsverläufe auch für dünne Gurt- und Rippenplatten bzw. breite Plattenbalken gemäß Balkentheorie bestimmen zu können, ist ein gängiges Verfahren. Für Stahlbau, Stahlbetonbau sowie Verbundbau wurden sie in die erste Generation der Eurocodes mit aufgenommen. Nicht enthalten ist ein solcher Ansatz im entsprechenden Eurocode für Holzbauten.

Im Falle von Holzbauten sind nur Größtwerte wirksamer Beplankungsbreiten für die Bemessung von Tafелеlementen zu finden. Holzbauten in Holz-Beton-Verbundbauweise orientieren sich in der Praxis an der Ermittlung gemäß Eurocode 4 [3]. Aktuell sind in der Normung keine Angaben für die Wahl einer effektiven Breite für massive Holzrippendecken enthalten [2][4].

2.2.2 Stand der Forschung

Die Ermittlung einer vereinfachten Formel für die Bemessung massiver Holzrippendecken wurde insbesondere auf Grund eines erweiterten Einsatzes von CLT diskutiert. Sich dem Fall einer schubsteif verklebten CLT-Rippendecke annehmend, wurden in [5] Fourier-Analysen zur Berechnung der maximalen Normalspannung durchgeführt. Daraufhin wurden die Ergebnisse mit einem numerischen Modell verglichen und Bemessungsdiagramme anhand einer Parameterstudie ermittelt. Ein Datenfitting führte für einen in der Praxis zu erwartenden

Parameterbereich zu Formeln, welche als Vorschlag für zukünftige Normen dienen. Die Analyse wurde auf einen Einfeldträger unter positivem Moment beschränkt. [4]

2.2.3 Ausblick zukünftiger Normung

Die vereinfachten Formeln gemäß [4] dienen als Basis für den aktuellen finalen CLT-Entwurf des künftigen Eurocode 5. Die effektive Breite ist abhängig von der Belastung (gleichmäßig verteilte Last oder Einzellast), dem Verhältnis zwischen lichtem Rippenabstand $b_{f,i}$ und Spannweite l , der Dehnsteifigkeit der CLT-Lagen $(EA)_x$ in x-Richtung und der Schubsteifigkeit des CLT-Querschnitts $(GA)_{xy}$. Nicht zu vernachlässigen ist die Schubnachgiebigkeit der CLT-Platte, welche sich aus den schubweichen Querlagen und der Nachgiebigkeit des Verbundes ergibt und in die Ermittlung des effektiven Schubmoduls G_{xy} mit einfließt. [6]

Für das System einer CLT-Rippendecke als Einfeldträger mit gleichmäßig verteilter Last (s. 3.5.1) bzw. einer 4-Punkt-Biegebeanspruchung und somit einem konstanten Momentenbereich (s. 3.4.1) wird die nachfolgende Formel für gleichmäßig verteilte Lasten herangezogen.

$$b_{ef} = b_{rib} + \sum_i b_{ef,i} = b_{rib} + \sum_i b_{ef,i} \quad (1)$$

$$\text{Mit } b_{ef,i} = b_{f,i} \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} 0.5 \\ 0.5 - 0.35 \left(\frac{b_{f,i}}{l} \right)^{0.9} \left(\frac{(EA)_x}{(GA)_{xy}} \right)^{0.45} \end{array} \right. \quad (2)$$

3. Erste Versuchsreihe

3.1 Zielsetzung

In einer ersten Versuchsreihe wurden in Referenzversuchen unter Normaltemperatur die Bruchlasten sowie in Großbrandversuchen die Feuerwiderstandsdauer zweier CLT-Rippendecken mit T-Querschnitt untersucht.

Ziel war es einen unbedeckten (A) und bedeckten (B) T-Querschnitt auf die Feuerwiderstandsdauer zu prüfen (s. Abb. 2). Querschnitt B wurde im Vergleich zu A mit einer kleineren Rippe und zusätzlich zwei Gipskartonplatten (GKP) je 12.5 mm ausgeführt.

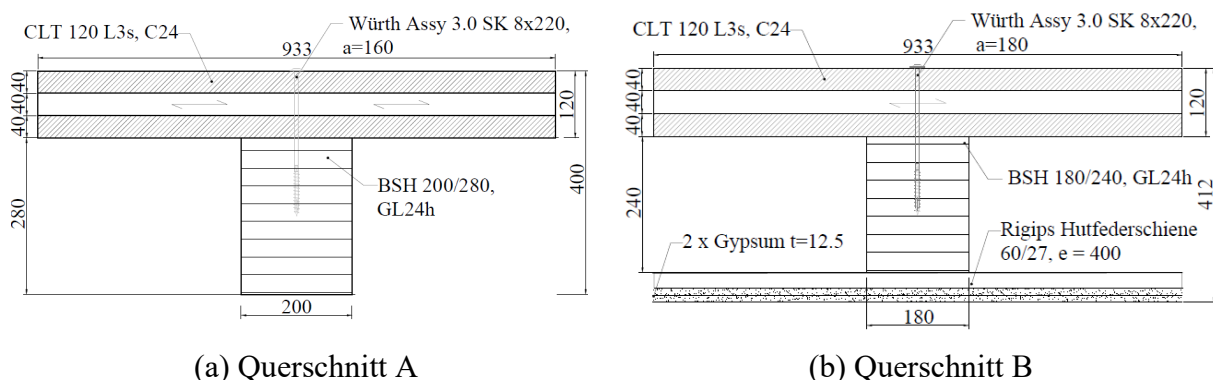


Abb. 2: Wahl der T-Querschnitte (Einheit [mm])

3.2 Schraubpressverklebung

Alternativ zu einer hydraulischen Presse wird im Falle der Schraubpressverklebung (engl.: screw-press gluing, SPG) der notwendige Pressdruck in der Klebefuge durch den Einsatz von Tellerkopfschrauben mit Teilgewinde erzeugt. Der für die SPG erforderliche Mindestdruck von $0,10 \text{ N/mm}^2$ wird aufgebracht, um die Fugendicke von $0,3 \text{ mm}$ zu gewährleisten. [7]

Im Falle einer intakten Klebefuge gilt die Annahme, dass die Scherfestigkeit der Klebefuge höher ist als die Schubfestigkeit des Holzes. Hiermit ist sowohl die Schubfestigkeit parallel zur Faser als auch der Rollschub der CLT-Querlagen gemeint. Die gewählten Schrauben inklusiver Abstände a sind in Abb. 2 zu sehen. Für die Verklebung wurde Purbond HB S709 verwendet.

3.3 Bemessung

Es wurde ein System mit 9 m Spannweite und einer gleichmäßig verteilten Last ($g_k = 1.50 \text{ kN/m}^2$, $q_k = 4.50 \text{ kN/m}^2$) zu Grunde gelegt. Gemäß Eurocode wurden die Querschnitte mit einem Moment für den außergewöhnlichen Lastfall „Brand“ im Grenzzustand der Tragfähigkeit für eine Branddauer von 60 (A) bzw. 90 Minuten (B) bemessen. Hierbei ist die Randspannung „Biegezug“ in der BSH-Rippe maßgebend. Der Restquerschnitt der CLT-Platte wurde mit dem Treppenmodell mit einem Ablösen der Lamellen abgebildet [8].

In der Berechnung der Randspannung ist die effektive Breite in der Ermittlung sowohl der effektiven Biegesteifigkeit $(EI)_{ef}$, des globalen Schwerpunkts des Verbundquerschnitts z_s als auch des Abstandes zwischen globalem und lokalem Schwerpunkt z_i enthalten (s. Formeln (3), (4)).

$$\sigma_{m,i} = \frac{M_y \cdot E_i \cdot (z_i + \frac{h_i}{2})}{(EI)_{ef}} \quad (3)$$

$$\text{Mit } (EI)_{ef} = \sum_i (EI)_i = \sum_i \frac{E_i b_i h_i^3}{12} + E_i b_i h_i z_i^2 \quad (4)$$

Offener Diskussionspunkt war zu Beginn des Projektes das Brandverhalten des Verbundquerschnitts; d.h. ob der schubsteife Verbund der Klebefuge zwischen CLT-Platte und BSH-Rippe im Brandfall erhalten bleibt. Gemäß aktueller technischer Zulassung für CLT Rib Panels (Stora Enso) darf die Wirkung der Klebeverbindung nicht berücksichtigt werden [9]. Daher wurde für die Bemessung der T-Querschnitte der Ansatz der technischen Zulassung mit einer effektiven Breite $b_{ef} = b_{rib,fi}$ verfolgt, jedoch die Ausnutzung bis zu 120% überschritten.

3.4 Referenzversuche

3.4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Insgesamt wurden drei Prüfkörper je Querschnitt (A1, A2, A3, B1, B2, B3) im Juni 2019 getestet. Die Träger hatten eine Spannweite von 5,20 m in Übereinstimmung mit dem Brandofen (s. Abb. 3). Das System wurde einrippig mit einer Plattenbreite b von 0,933 m gewählt (s. Abb. 1b). Im Falle von B wurde auf die Bekleidung verzichtet. Die Versuche wurden auf einem Prüfrahmen an der ETH Zürich in Anlehnung an EN 408 [10] durchgeführt. Der Versuchsaufbau als 4-Punkt-Biege-Versuch ist in Abb. 3 dargestellt.

Die Messtechnik umfasste die aufgebrachten Zylinderkräfte $F/2$, einen Wegaufnehmer in Feldmitte für die globale Durchbiegung w_M und Wegaufnehmer an den Auflagern für die Messungen der Relativverschiebungen zwischen Platte und Rippe u_R und u_L .

Für die Bestimmung der lokalen, effektiven Biegesteifigkeit des Verbundquerschnitts wurden LED-Punkte in der abgeschätzten neutralen Faser an einer Seite des Prüfkörpers in Feldmitte und unter den Krafteinleitungspunkten im Abstand l_l von 1.26 m gemäß EN 408 angebracht (s. Abb. 3). Die Lage der neutralen Faser (= globaler Schwerpunkt) wurde mit zwei Höhen abgesteckt: z_{max} für das maximale System (Plattenbreite b) und z_{est} für das zu erwartende System (Plattenbreite b_{ef} nach 2.2.3). Da die tatsächliche Lage innerhalb dieser Grenzen zu vermuten ist, wurde aus den lokalen Verformungen w_{local} beider Höhen ein Mittelwert gebildet.

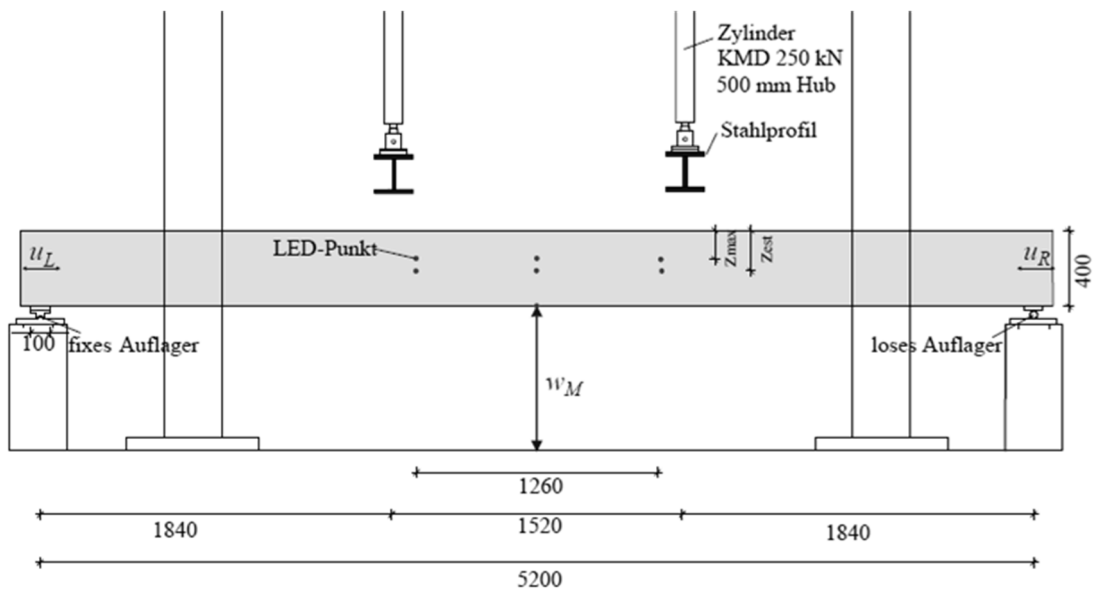


Abb. 3: Versuchsaufbau 4-Punkt-Biegung (Einheit [mm])

Die mittlere Holzfeuchte der CLT-Platten fiel von 10% bei Ankunft auf 9,5% im Bruchversuch ab; der BSH-Rippen von 13% auf 11%. Die mittlere Rohdichte der Platten betrug 465 kg/m^3 und der Rippen 447 kg/m^3 .

Die hydraulische Belastung erfolgte weggesteuert mit einer Belastungs- und Entlastungsgeschwindigkeit von 0.2 mm/s , wobei die Bruchlast innerhalb von 500 s erreicht wurde. Im ersten Zyklus wurde auf 40% der geschätzten Bruchlast $F_{\max, \text{est}}$ belastet und wieder auf 10% entlastet. Im zweiten Zyklus wurde bis zum Bruch gefahren. Für die Berechnung der lokalen effektiven Biegesteifigkeit wurde der erste Zyklus herangezogen und Formel (5) in Anlehnung an EN 408 angewendet.

$$(EI)_{\text{ef,local}} = \frac{al_1^2}{16} \frac{F_2 - F_1}{w_{2,\text{local}} - w_{1,\text{local}}} \quad (5)$$

3.4.2 Ergebnisse

Im Vorfeld zu den Bruchversuchen wurden die E-Module der einzelnen CLT-Platten und BSH-Rippen ermittelt. Der mittlere E-Modul der Platten betrug $13,0 \text{ kN/mm}^2$ (COV = 3%) und der Rippen von A2 bis B3 $11,4 \text{ kN/mm}^2$ (COV = 4%). Auffallend war der überdurchschnittlich hohe Wert der Rippe von A1 mit $15,2 \text{ kN/mm}^2$. Da ebenfalls Bruchlast und resultierende Randspannung für eine Rippenqualität von GL24h überdurchschnittlich hoch lagen, wurde Prüfkörper A1 den nachfolgenden Ergebnissen entnommen.

Alle Prüfkörper versagten im Bruchversuch spröde auf Biegezug am unteren Rand der Rippe und zeichneten sich durch ein linear-elastisches Tragverhalten aus.

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen lokaler, effektiver Biegesteifigkeit und effektiver Breite (s. Formeln (5) und (1)) wurden die effektiven Breiten je Querschnitt berechnet und mit der Plattenbreite b ins Verhältnis gesetzt. Ebenso wurden die effektiven Breiten mit dem Ansatz des künftigen Eurocode 5 (s. Abschnitt 2.2.3) abgeschätzt. In Abb. 4a sind die Ergebnisse mit Angabe ihrer Mittelwerte dargestellt. Während in den Bruchversuchen gemäß EN 408 die effektive Breite im Durchschnitt 80% der Plattenbreite betrug, wäre sie gemäß Eurocode 5 auf 60% abgeschätzt worden.

Diese Unterschätzung des Verbundsystems wirkt nichtig, vergleicht man in Abb. 4b die Ausnutzungsgrade des Biegezug-Nachweises (EC5-1-1). Die Randspannungen errechnet nach

Formel (3) mit den jeweiligen effektiven Breite wurden den Mittelwerten der Festigkeiten nach JCSS [11] gegenübergestellt.

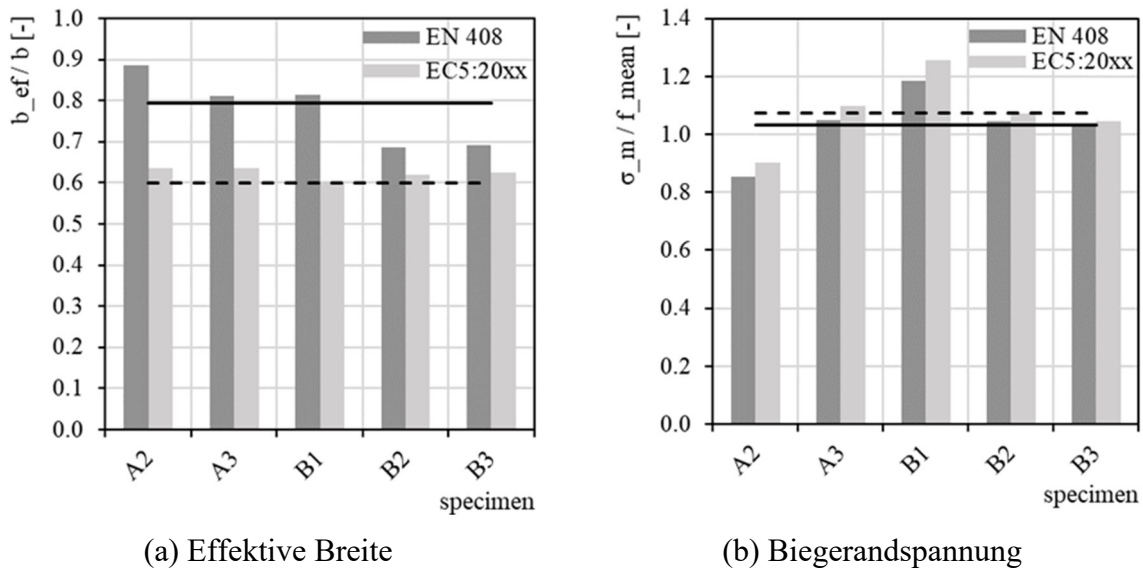


Abb. 4: Ausnutzungsgrad zum Versagenszeitpunkt

Während in den Bruchversuchen die Ausnutzung im Durchschnitt zu 103% überschritten wurde, wäre es nach Eurocode 5 zu 107% errechnet worden.

3.5 Großbrandversuche

3.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Insgesamt wurde ein Prüfkörper je Querschnitt (A, B) im Brandlabor der Eurofins Expert Services Oy in Helsinki im September 2019 getestet. Der horizontale Brandofen besaß eine Spannweite von 5,20 m und eine Breite von 3,00 m (s. Abb. 1b). Die Feuerwiderstandsprüfungen wurden gemäß Europäischem Standard [12][13] durchgeführt.

Während des Versuchs erfolgte eine konstante Belastung über gleichmäßig verteilte Hydraulikzylinder, wobei das maximale Moment in Feldmitte der Bemessung (s. Abschnitt 3.3) entsprach. Die Messtechnik umfasste neben den aufgebrachten Zylinderkräften drei Wegaufnehmer je Rippe. Der Ofen wurde mit Plattenthermometern geregelt, um der ISO-Einheits-Temperaturzeitkurve zu folgen. Nach Fahrni [14] wurden Thermolemente des Typs K-w-e-0.5/2.2/in-pa während der Herstellung, parallel zu den Isothermen, in unterschiedlichen Levels und über die Spannweite verteilt eingelegt.

Vor Transport der Bauteile wiesen die CLT-Platten eine Holzfeuchte von im Mittel 12%, die BSH-Rippen zwischen 12 - 14%. Die Rohdichte der Platten kann auf 465 kg/m^3 angenommen werden. Weitere Informationen konnten nicht eingeholt werden.

3.5.2 Ergebnisse

Die Versuche wurden beendet sobald die Durchbiegungsgeschwindigkeit an einer Rippe den Grenzwert gemäß [12] überschritt bzw. den linear-elastischen Bereich verließ. Dies erfolgte bei Querschnitt A nach 91 und bei Querschnitt B nach 120 Minuten. Die Prüfkörper wurden so schnell wie möglich vom Brandofen gehoben und gelöscht (Dauer ca. 25 Minuten).

Nach dem Versuch wies Querschnitt B in Feldmitte Biegezugrisse am unteren Rand der Rippe auf. In Abb. 5 ist der Restquerschnitt von Querschnitt B nach Löschen des Prüfkörpers zu sehen. Die Wirkung der Verbundverklebung blieb über die gesamte Branddauer erhalten.

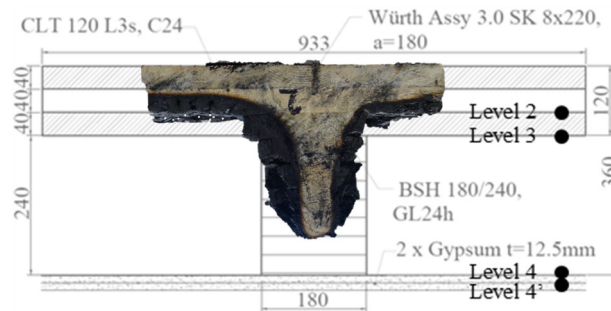


Abb. 5: Restquerschnitt Querschnitt B nach (120+25) Minuten

In Abb. 6 sind die Messungen der Plattenthermometer (Furnace) als Mittelwert und der Thermoelemente (Level 4', 4, 3, 2, s. Abb. 5) als Einzel- und Mittelwerte zusammengelegt.

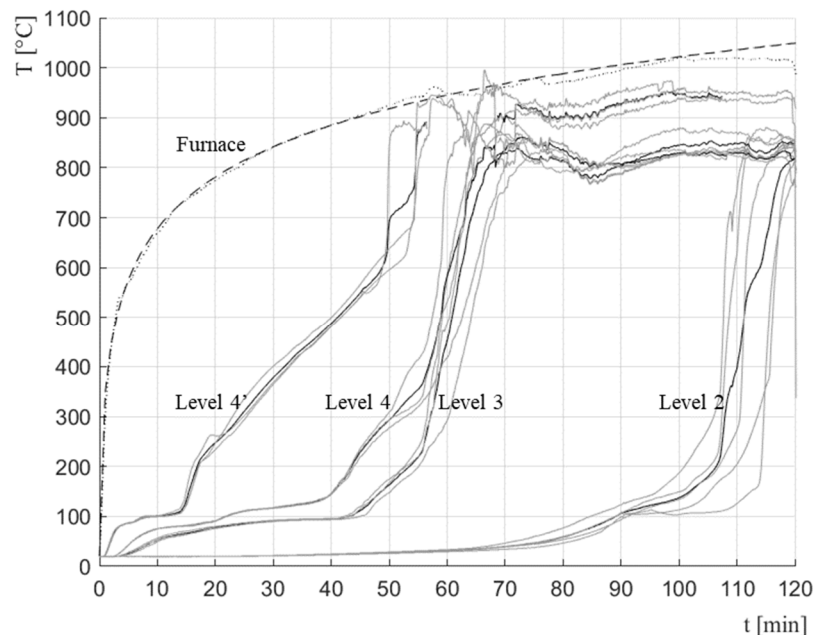


Abb. 6: Zeit-Temperaturverläufe Querschnitt B: Einzelne Werte (hell), Mittelwert (dunkel)

Durch Beobachtungen konnte festgehalten werden, dass ein Ablösen der GKP gegen 30 und 55 Minuten erfolgte. Die Messungen zeigen, dass der Abbrand ($T > 300^{\circ}\text{C}$) im Hohlraum um 50 Minuten (Level 4) verzögert wurde und ein Ablösen der unteren CLT-Lamellen (Level 2) gegen 110 Minuten erfolgte. Die Handrechnungen hatten für letzteres 98 Minuten prognostiziert. Der Abbrand schritt in den restlichen (10+25) Minuten weiter voran und stoppte in der mittleren CLT-Lamelle. Der vorhandene Restquerschnitt bestätigt dies (s. Abb. 5).

4. Zusammenfassung und Ausblick

- Die Qualität der Schraubpressverklebung gilt als Grundvoraussetzung für das schubsteif verklebte Verbundsystem. Die Wirkung der Klebeverbindung zwischen CLT und Rippe bleibt im Brandfall erhalten.
- Die effektive Breite betraf im Mittel 80% der Plattenbreite. Dabei reagiert die Berechnung sehr sensitiv auf die gemessenen lokalen Verschiebungen. Mit dem Ansatz nach 2.2.3 wurde eine effektive Breite von im Mittel 60% der Plattenbreite errechnet.
- Die Bruchspannungen entsprachen den zu erwartenden Mittelwerten der Festigkeiten. Diese zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den prognostizierten Werten unter Verwendung der effektiven Breite mit dem Ansatz nach 2.2.3.

- Der Abbrand des T-Querschnitts wurde aufgrund der GKP um etwa 50 Minuten verzögert. Der Abbrand des Verbundquerschnitts konnte nach aktuellem Eurocode 5 prognostiziert werden. Der Feuerwiderstand wurde aufgrund des semi-probabilistischen Sicherheitskonzepts und eines konservativen Ansatzes der effektiven Breite unterschätzt.

Die Verwendung weiterer Materialien in Kombination einer massiven Holzrippendecke werden angestrebt. Das System ließe sich ebenso auf Brettstapelholz und Furnierschichtholz anwenden.

Danksagung

Dem Unternehmen Stora Enso Wood Products GmbH, Ybbs, Österreich - insbesondere Thomas Demschner und Niko Kumer - sei für die Unterstützung des Forschungsprojektes gedankt.

Literatur

- [1] TIMOSHENKO, S. P.: *Strength of materials. Advanced Theory and Problems*. New York: van Nostrand, 1941.
- [2] MASOUDNIA, R.; HASHEMI, A.; QUENNEVILLE, P.: *Predicting the Effective Flange Width of a CLT Slab in Timber Composite Beams*. In *J. Struct. Eng.* 144, Nr. 7, p. 4018084, 2018.
- [3] DIAS, A.; SCHÄNZLIN, J.; DIETSCH, P.: *Design of timber-concrete composite structures - A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4*. Shaker, 2018.
- [4] AUGUSTIN, M.; THIEL, A.: *Proposal for the determination of the effective width and the verification of ribbed plates*. Research Report hbf 02_2017. holz.bau forschung gmbh, 2017.
- [5] BOGENSPERGER, T.: *Darstellung und praxistaugliche Aufbereitung für die Ermittlung mitwirkender Plattenbreiten von BSP-Elementen*. Forschungsbericht focus_sts 2.2.3_1. holz.bau forschung gmbh, 2013.
- [6] CEN - CENELEC: *M515 SC 5/T1 - Phase 1 final deliverables*. CEN/TC 250/SC 5 – N 892, April 2018
- [7] BRATULIC, K.; AUGUSTIN, M.; SCHICKHOFER, G.: *Investigations concerning screw-press gluing of assemblies with CLT*. Tacoma: INTER, 2019.
- [8] KLIPPEL, M.; SCHMID, J.: *Design of cross-laminated timber in fire*. In: *Structural Engineering International*, 27, Nr. 2, S. 224-230, 2017.
- [9] ETA 17/0911: *CLT Rib Panels by Stora Enso - Prefabricated wood-based loadbearing stressed skin panels*. Helsinki: VTT Expert Services LTD, 2018/2/12.
- [10] DIN EN 408: *Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2012-10.
- [11] JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY: *JCSS probabilistic model code - Part 3: resistance models – 3.5 properties of timber*. JCSS, August 2006
- [12] DIN EN 1363-1: *Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2012-10.
- [13] DIN EN 1365-2: *Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 2: Decken und Dächer*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2015-02.
- [14] FAHRNI, R.; SCHMID, J.; KLIPPEL, K.; FRANGI, A.: *Correct temperature measurements in fire exposed wood*. Seoul: WCTE, 2018.