

Dissertation ETH Nr. 18208

Zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN
der
ETH ZÜRICH

vorlegt von

Carsten-Daniel Erchinger
Dipl.-Ing., Universität Stuttgart

geboren am 22. Februar 1977
von Villingen-Schwenningen, Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. sc. techn. Mario Fontana, Referent
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Korreferentin
Tekn. dr Jürgen König, Korreferent
Dr. sc. techn. Adrian Mischler, Korreferent

2009

Kurzfassung

Im Ingenieurholzbau wird das Verhalten eines Tragwerkes häufig durch den Tragwiderstand der Verbindungen bestimmt. Hochleistungsfähigen Verbindungen mit grossem Tragwiderstand kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Für Holzbauwerke, an welche Brandschutzanforderungen gestellt werden, sind zuverlässige und möglichst realitätsnahe Berechnungsmodelle für die Bemessung von Verbindungen im Brandfall wichtig, da diese in der Regel dieselbe Feuerwiderstandsdauer wie die entsprechenden Holzbauteile aufweisen müssen. Häufig werden im Verbindungsbereich Stahlelemente eingesetzt, welche sich im Brandfall aufgrund ihrer geringen Masse und hohen Wärmeleitfähigkeit sehr schnell erwärmen. Mit steigenden Temperaturen im Querschnitt ist eine Abnahme der Steifigkeit und Festigkeit von Stahl und Holz und folglich eine Abnahme des Tragwiderstandes zu beobachten.

Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen mit innen liegenden Blechen und durchlaufenden Stabdübeln gehören zu den effizientesten Verbindungen. Allerdings wurde ihr Tragverhalten im Brandfall bisher noch nicht systematisch untersucht. Deshalb wurden am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich experimentelle Untersuchungen an vier- und sechsschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen bei Raumtemperatur und Normbrandbeanspruchung durchgeführt, welche die Grundlage für das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Berechnungsmodell im Brandfall bilden.

Das thermische Verhalten im Verbindungsbereich wird mit Hilfe der *Finite-Elemente-Methode* unter Berücksichtigung der physikalischen und thermodynamischen Gesetzmässigkeiten realistisch abgebildet. Mit dem verwendeten thermischen Materialmodell für Holz lassen sich die Effekte der Pyrolyse, die Änderung der Holzfeuchte bei der Verdampfung des hygroskopisch gebundenen Wassers sowie die Entstehung von Rissen in der Holzkohle berücksichtigen.

Die starr-plastische Theorie von *Johansen* [80] für Stabdübel im Holzbau stellt die Grundlage des entwickelten Berechnungsmodells für mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall dar. Das vorgeschlagene Berechnungsmodell verwendet den nicht-linearen und temperaturabhängigen Verlauf der Lochleibungsfestigkeit und betrachtet räumliche Temperaturfelder zwischen zwei in Beanspruchungsrichtung hintereinander liegend angeordneten Stabdübeln. Damit wird jeder Stabdübel entsprechend seiner Lage im Querschnitt differenziert betrachtet. Weiterhin wird die Anwendung des Berechnungsmodells auf zweischnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen diskutiert. Anhand einer umfangreichen Parameterstudie werden Bestimmungsgleichungen zur Ermittlung des seitlichen und oberseitigen Abbrandes von vier- und sechsschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen entwickelt. Die Genauigkeit der analytischen Methode wird für baupraktisch üblicherweise verwendete Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen überprüft.

In Anlehnung an die *Methode mit reduziertem Querschnitt* der *EN1995-1-2* [38], welche für die Bemessung von Holzbauteilen im Brandfall gültig ist, wird eine Erweiterung dieser Methode auf vier- und sechsschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen vorgeschlagen. Die Berechnung des ideellen (wirksamen) Restquerschnittes aus dem verbleibenden Restquerschnitt wird in Abhängigkeit der Einflussgrössen schrittweise vorgestellt. Durch Multiplikation des ideellen Restquerschnittes mit der charakteristischen Zugfestigkeit des Holzes bei Raumtemperatur lässt sich der Tragwiderstand von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall ermitteln. Ausgewertet wurde eine Vielzahl von baupraktisch üblicherweise verwendeten Verbindungsgeometrien. Abschliessend werden Vergleiche mit den Tragwiderständen bei Raumtemperatur vorgestellt.

Abstract

The load-carrying capacity of timber structures is often defined by the ultimate strength and structural design of the connections. Therefore, highly efficient connections are desired. For timber structures with fire resistance requirements, design models for connections are important since they normally have to fulfill the same fire resistance requirements as the respective timber members. Steel elements as often used in connections heat up quickly under fire conditions. Due to the steel elements, the cross-sectional temperature increases and strength and stiffness of steel and timber decrease significantly. As a consequence, a reduction of the fire resistance can be observed.

The multiple shear steel-to-timber connection with slotted-in steel plates shows a high load-carrying capacity at ambient temperature. But their structural behaviour under fire conditions has not been studied yet and no design models are available so far. Thus, an extensive testing programme on multiple shear steel-to-timber connection with slotted-in steel plates at ambient and under ISO-fire conditions was carried out at the Institute of Structural Engineering of the ETH Zurich. The test results provided the basis for the calculation model for multiple shear steel-to-timber connections under fire conditions developed in the present study.

The fire behaviour is mainly influenced by the thermal properties of wood and steel. Therefore, numerical finite element analyses under ISO-fire conditions are applied to describe the thermal behaviour of wood and steel considering the physical and thermo-dynamical reactions. The thermal model is able to take into account the effects of pyrolysis, evaporation of moisture and cracks in the charcoal.

The theory of *Johansen* [80] for dowels in timber structures constitutes the basis for the calculation model for multiple shear steel-to-timber connections with four or six shear planes under fire conditions. Considering the non-linear and temperature depending characteristic embedment strength, the calculation model requires three-dimensional temperature fields between two fasteners in a row. Hence, non-uniform and different temperature distributions are considered depending on the position of each dowel in the cross-section. Furthermore, the application of the analytical calculation model on multiple shear steel-to-timber connections with only two shear planes is discussed.

Based on an extensive parametric study, conditional equations were developed to determine the top and side charring of multiple shear steel-to-timber connections with four or six shear planes taking into account geometrical parameters like the thickness of timber side and middle members and the dowel diameter. The analytical model was verified by analysing normally used multiple shear steel-to-timber connections with four or six shear planes.

The proposed design model is based on the reduced cross-section method applying effective cross-sections. This method is given in *EN1995-1-2* [38] and is the recommended procedure to determine the fire resistance of timber members. The reduced cross-section method was extended on multiple shear steel-to-timber connections with two or four shear planes. Therefore, the effective cross-section is calculated by reducing the residual cross-section in such a way, that the effective cross-section multiplied with the characteristic tensile strength of timber at ambient temperature will lead to the same results as obtained by numerical finite element analysis. The reduction factor is in good agreement with numerical results on multiple shear steel-to-timber connections. Finally, a comparison between the load-carrying capacity under fire conditions proposed by the design model and the expected load-carrying capacity at ambient temperature is presented.

