

**TIMBER-CONCRETE COMPOSITE SLABS MADE OF  
BEECH LAMINATED VENEER LUMBER WITH NOTCHED  
CONNECTION**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Lorenzo Boccadoro

MSc ETH Civil Eng

born on 22.09.1987

citizen of

Muralto TI

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Andrea Frangi (ETH Zurich, Examiner)

Prof. Dr. Walter Kaufmann (ETH Zurich, Co-examiner)

Prof. Dr. Jan-Willem van de Kuilen (TU Munich, Co-examiner)

Dr. René Steiger (EMPA, Dübendorf, Co-examiner)

## Abstract

This thesis focuses on the structural behaviour of timber-concrete composite slabs made of beech laminated veneer lumber (LVL) with notched connections. A timber-concrete composite member consists of a timber part in the tensile zone, a concrete layer in the compression zone, and a connection between the timber and the concrete. These slabs are usually made of spruce wood, and several connection systems have been developed (e.g. screws and notches). These composite members are interesting systems because they are able to offer several structural, economic and ecological advantages compared to traditional reinforced concrete slabs and timber slabs. Beech LVL is an efficient structural material because it is able to combine the high strength and stiffness of beech wood with the consistency of the mechanical properties of LVL. Moreover, in Europe, beech wood is available in large quantities. The composite slabs studied in this thesis have spans between 5 and 8 m and were developed at ETH Zurich in the framework of a project about innovative uses of beech LVL. In general, if the load-carrying capacity of the notched connection is governed by a compressive failure of the timber, ductility can be achieved. Thus, the design goal is to make sure that yielding of the notches governs the global structural behaviour. This is accomplished through the development and use of a clear and reliable model. At present, several structural aspects of notched connections are still unclear, and the benefit of notch yielding for improved global slab ductility is almost unknown.

This thesis presents both theoretical and experimental investigations. The theoretical studies include development of analytical models to predict the failures of notched timber-concrete connections, and to analyse the structural behaviour of timber-concrete composite members with a ductile connection. The models were able to predict the structural behaviour of several specimens tested during this work with good accuracy, and can be used as a basis to design timber-concrete composite members made of beech LVL.

This work shows that the use of LVL materials, instead of solid wood or glued laminated timber, markedly improves the predictability of the timber behaviour, and a ductile notch design becomes feasible. Notch yielding causes an increase of the curvature of the cross section, which improves global ductility of the composite member. However, the ductility of the slab predicted by the analytical model can be reached only if the composite member is provided with end-to-end vertical reinforcement, which holds the LVL and concrete together and keeps the concrete cracks closed. The composite member should be designed so that, after connection yielding, concrete crushing occurs in the upper part of the composite member. Thanks to this design approach, the load-carrying capacity of the composite member is governed by a series of ductile failures. In general, the deformations of the composite member are limited by the rotation capacity of the LVL part. Thus, to maximise ductility, the parts of the composite member should be designed so that a tensile-bending failure of LVL occurs as late as possible.

In conclusion, this thesis offers a straightforward method to analyse the structural behaviour of a timber-concrete composite member with a notched connection, and demonstrates that, if a ductile design approach is applied, beech LVL, as the tensile part, ensures a good structural performance and a predictable failure behaviour.

## Riassunto

Questa tesi riguarda il comportamento strutturale di solette composite legno-calcestruzzo realizzate con multistrato impiallacciato di faggio (LVL), con connessione ad intaglio. Le solette composite legno-calcestruzzo sono costituite da un elemento in legno sotto trazione, che può fungere da cassero a perdere, da uno strato di calcestruzzo sotto compressione, e da una connessione legno-calcestruzzo. Queste strutture sono solitamente realizzate in abete, ed esistono diversi tipi di connessione (ad esempio viti e intagli). Il legno-calcestruzzo può rappresentare un'alternativa interessante alle solette in legno e in calcestruzzo armato, in quanto offre vantaggi di tipo economico, ecologico e strutturale. L'LVL di faggio è un materiale molto efficace dal punto di vista strutturale poiché combina le elevate resistenze e rigidità del faggio con la bassa varianza delle proprietà meccaniche tipica delle configurazioni LVL. Inoltre, in Europa, il faggio è una specie vegetale presente in quantità molto abbondanti. Le solette composite sviluppate in questo lavoro sono pensate per campate tra 5 e 8 m, e sono state ideate al Politecnico Federale di Zurigo (ETHZ) in seno ad uno studio sugli usi innovativi del faggio. In generale, se il comportamento dell'intaglio è governato da una rottura compressiva del legno, si ottiene duttilità, un'importante ed apprezzata caratteristica strutturale. L'idea di base è di fare in modo che le deformazioni plastiche degli intagli governino il comportamento globale della soletta ottenendo così una struttura duttile. Lo sviluppo di questa soletta composita richiede modelli chiari e affidabili per prevederne il comportamento strutturale. Diversi problemi statici delle connessioni a intaglio non sono ancora stati risolti con sufficiente chiarezza, e l'influsso della plastificazione degli intagli sul comportamento dell'intera struttura è pressoché sconosciuto.

Questa struttura composita è stata studiata sia sul fronte teorico sia su quello sperimentale. Gli studi teorici comprendono una serie di modelli analitici per la previsione delle rotture della connessione a intaglio, e un modello per quantificare il comportamento statico di strutture composite legno-calcestruzzo con connessione duttile. I risultati di una serie di test al taglio e alla flessione sono stati paragonati alle previsioni effettuate con i modelli analitici, convalidando gli studi teorici.

Questo lavoro dimostra che l'uso dell'LVL al posto del legno massiccio e del legno lamellare incollato migliora l'affidabilità delle previsioni delle rotture del legno, rendendo possibile un dimensionamento duttile basato sulla rottura compressiva del legno. La plastificazione degli intagli genera un aumento della curvatura delle componenti della sezione che si traduce in una deformazione plastica della soletta. Dagli studi condotti nell'ambito di questa tesi risulta che la duttilità può svilupparsi solo se la soletta è munita di rinforzi verticali in grado di impedire un'apertura della fuga tra le due parti e di tenere chiuse le crepe del calcestruzzo. La struttura composita dovrebbe essere dimensionata affinché la plastificazione degli intagli sia seguita da una rottura compressiva del calcestruzzo nella zona superiore della sezione, anch'essa dotata di duttilità. In questo modo la resistenza della soletta è determinata da una serie di rotture duttili. Tuttavia le deformazioni plastiche della soletta sono limitate dalla capacità di rotazione del legno. Per massimizzare la duttilità si consiglia quindi di progettare la struttura in modo che una rottura fragile del legno dovuta alla combinazione trazione-flessione avvenga il più tardi possibile.

In conclusione questa tesi offre un modello chiaro per l'analisi del comportamento strutturale di solette composite legno-calcestruzzo con connessione a intaglio, e dimostra che, seguendo un metodo di dimensionamento duttile, l'uso dell'LVL di faggio assicura un comportamento strutturale ottimale.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation konzentriert sich auf das Tragverhalten von Holz-Beton Verbunddecken aus Buchenfurnierschichtholz (LVL) mit Kerbenverbindung. Holz-Beton Verbundstrukturen bestehen aus einem Holzelement in der Zugzone, einer Betonschicht in der Druckzone und einer Schubverbindung zwischen Holz und Beton. Solche Verbundbauteile bestehen in der Regel aus Fichtenholz, und verschiedene Verbindungssysteme wurden entwickelt (zum Beispiel Schrauben und Kerben). Holz-Beton-Verbunddecken repräsentieren attraktive Systeme, weil sie verschiedene strukturelle, ökonomische und ökologische Vorteile im Vergleich zu konventionelle Stahlbetondecken und reine Holzdecken bieten können. Buchenfurnierschichtholz ist ein leistungsfähiger Baustoff, weil er die hohe Festigkeit und Steifigkeit des Buchenholzes mit der geringen Variabilität der mechanischen Eigenschaften des Furnierschichtholzes kombiniert. Darüber hinaus ist in Europa Buchenholz in grossen Mengen verfügbar. Die Verbunddecken, die in dieser Arbeit untersucht wurden, haben eine Spannweite zwischen 5 und 8 m und wurden an der ETH Zürich im Rahmen eines Forschungsprojektes über innovative Nutzungen von Buchenfurnierschichtholz entwickelt. Im Allgemeinen, wenn die massgebende Versagensart der Kerbe ein Druckversagen des Holzes ist, entstehen plastische Druckverformungen und es stellt sich ein duktileres Tragverhalten der Kerbenverbindung ein. Das Grundkonzept der in dieser Arbeit entwickelten Verbunddecke ist sicherzustellen, dass das Druckversagen des Furnierschichtholzes in den Kerben massgebend ist, und die Verbunddecke sich duktil verhält, was eine sehr wichtige Anforderung ist. Um diese Verbunddecken zu bemessen, sind klare und zuverlässige Modelle notwendig. Des Weiteren sind einige statische Aspekte der Kerbenverbindung noch unklar und der Einfluss plastischer Verformungen in den Kerben auf die globale Duktilität der Verbunddecke ist fast unbekannt.

Diese Arbeit enthält theoretische und experimentelle Untersuchungen. Die theoretische Studien umfassen analytische Modelle, mit denen die Versagensarten von Holz-Beton Kerbenverbindungen vorausgesagt werden können, sowie Modelle, die das Tragverhalten von Holz-Beton Verbundstrukturen mit duktiler Schubverbindung beschreiben. Die entwickelten Modelle wurden mit Laborversuchen validiert, und bilden die Basis zur Erarbeitung von Bemessungsverfahren für Holz-Beton Verbunddecken aus Buchenfurnierschichtholz.

Diese Arbeit zeigt, dass die Verwendung von Furnierschichtholz anstelle von Vollholz oder Brettschichtholz die Berechenbarkeit des Tragverhaltens der Holzkomponente deutlich verbessert, und eine duktile Bemessung der Kerbe somit sinnvoll wird. Die Auswirkung plastischer Druckverformungen des Furnierschichtholzes in den Kerben verursacht eine Zunahme der Krümmung der Querschnittsteile der Verbunddecke. Dadurch wird Duktilität erzeugt. Es wurde aber beobachtet, dass die mit dem Modell vorausgesagte Duktilität nur erreicht werden kann, wenn vertikale Verstärkungen eingebaut werden, die Holz und Beton zusammenhalten und die Vergrösserung der Schubrisse im Beton vermeiden. Die Verbunddecke sollte so dimensioniert werden, dass, nachdem die Fliessgrenze der Kerben erreicht wird, die Betondruckzone zu stauchen beginnt. Somit besteht der Bruchmechanismus der Decke aus einer Serie von duktilen Versagen, und die Decke versagt nach grossen Verformungen. Im Allgemeinen werden die Verformungen des Verbundbauteils durch die Rotationsfähigkeit des Holzquerschnittes begrenzt. Um die Duktilität

zu maximieren, sollten die Teile der Verbunddecke so bemessen werden, dass ein kombinierter Biegezugbruch des Holzes so spät wie möglich auftritt.

Diese Dissertation stellt ein klares und nachvollziehbares analytisches Modell zur Verfügung, um das Tragverhalten von Holz-Beton Verbunddecken mit Kerbenverbindung zu beschreiben, und zeigt, dass, wenn ein duktiler Bemessungsansatz angewendet wird, der Einsatz von Buchenfurnierschichtholz als Zugelement ein berechenbares und duktileres Tragverhalten der Verbunddecke gewährleistet.