

Abstract

The mechanical behavior of glued laminated timber (GLT) beams strongly depends on natural growth characteristics of wood. For this reason, the wooden boards are sorted according to strength classes before the beams are manufactured. Sorting is mainly based on morphology data of knots, which nowadays is gained by laser scanning exploiting the tracheid effect. Then, in accordance with current standards, each board is assigned a strength grade. However, the further manufacturing process does not take into account the detailed information about the morphology of knots. Current standards regulate the assembly of the sorted boards to beams, where length limitations are overcome by finger-jointing the individual boards, resulting in continuous lamellas. The obtained beams are then assigned a strength class, regardless of the location of the weak points, such as knots and finger joints.

Current research focuses on exploiting this detailed morphology data. An automated three-dimensional reconstruction process uses the data of the individual boards to successfully determine the position and orientation of the knots. The modeled knots in combination with a reconstructed fiber course are the basis to derive individual stiffness profiles. The morphology data are also used as basis for selected indicating parameters (IPs) for the derivation of strength profiles. In a previous study, laser-scanned boards were processed into GLT beams, covering three beam sizes and two strength classes. The use of boards without finger joints ensured the focus on knots as weak points. The beams with well-known knot morphology were subjected to static four-point bending tests until failure, some of which showed non-linear behavior in the load-displacement curve. This motivated the development of an approach to model failure mechanisms.

In this thesis, a computational modeling approach is developed to determine the bending strength as well as failure mechanisms of GLT beams. The approach considers the knot morphology with section-wise constant effective material properties from the stiffness and strength profiles without using a predefined grid. Stress and strain fields are accessed by using a linear elastic material model within the framework of the non-linear finite element method (FEM). The description of vertical cracks is realized with the use of the extended finite element method (XFEM). Horizontal cracks are implemented in a simplified way as delamination between adjacent timber boards. This allows horizontal crack propagation and the merging of two vertical cracks with a horizontal distance in adjacent boards. Without this implementation the predicted load-bearing capacity would be overestimated. Delamination, introduced to describe horizontal cracking in a simplified way, is not intended to depict failure in the adhesive joint and, therefore, does not use material properties of an adhesive. For both cracking mechanisms (orientations) modified traction-separation laws are used to model quasi-brittle material failure. Global failure will occur after a defined load drop in the load-displacement curve, where additionally the compliance with two energy criteria is necessary. This approach covers a nonlinear load-displacement curve and progressive failure.

The computational modeling approach is able to determine both the bending strength and failure mechanisms in a reliable way. Simulation accuracy was found to be sufficient by using three finite elements per board height. With two different beam sizes, the so-called size effect could be successfully covered for both strength classes of GLT beams. The experimentally observed positions of fracture in the outermost board on the tensile side could be successfully predicted by simulations in more than 75 % of the beams.

Kurzfassung

Das mechanische Verhalten von Brettschichtholzträgern (BSH-Trägern) hängt stark von den natürlichen Wachstumseigenschaften von Holz ab. Aus diesem Grund werden die Holzbretter vor der Trägerherstellung nach Festigkeitsklassen sortiert. Die Sortierung basiert hauptsächlich auf Morphologiedaten von Ästen, die heutzutage durch Laserscanning unter Ausnutzung des Tracheid-Effekts gewonnen werden. Anschließend wird in Übereinstimmung mit den aktuellen Normen jedem Brett eine Festigkeitsklasse zugewiesen. Der weitere Herstellungsprozess berücksichtigt jedoch nicht die detaillierten Informationen über die Morphologie von Ästen. Aktuelle Normen regeln die Zusammensetzung der sortierten Bretter zu Trägern, wobei Längenbegrenzungen durch Keilzinkenverbindungen der einzelnen Bretter und die dadurch entstehenden durchgehenden Lamellen überwunden werden. Die erhaltenen Träger sind anschließend einer Festigkeitsklasse zugeordnet, unabhängig von der Lage der Schwachstellen, wie etwa Ästen und Keilzinkenverbindungen.

Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Nutzung dieser detaillierten Morphologiedaten. Ein automatisierter dreidimensionaler Rekonstruktionsprozess verwendet die Daten der einzelnen Bretter, um erfolgreich Position und Orientierung der Äste zu bestimmen. Die modellierten Äste in Verbindung mit einem rekonstruierten Faserverlauf bilden die Grundlage zur Ableitung individueller Steifigkeitsprofile. Die Morphologiedaten dienen weiter als Grundlage für ausgewählte Sortierparameter zur Ableitung von Festigkeitsprofilen. In einer früheren Studie wurden die laser-gescannten Bretter zu BSH-Trägern verarbeitet, wobei drei Trägergrößen und zwei Festigkeitsklassen abgedeckt wurden. Die Verwendung von Brettern ohne Keilzinkenverbindungen sicherte die Fokussierung auf Äste als Schwachstellen. Die Träger mit bekannter Astmorphologie wurden statischen Vier-Punkt-Biegeversuchen bis zum Versagen unterzogen, bei dem einige ein nichtlineares Verhalten in der Last-Verschiebungskurve zeigten. Dies motivierte die Entwicklung von einem Rechenmodell zur Modellierung von Versagensmechanismen.

In dieser Arbeit wird ein computergestützter Modellierungsansatz entwickelt, um sowohl die Biegefestigkeit als auch die Versagensmechanismen von BSH-Trägern zu bestimmen. Der Ansatz berücksichtigt die Astmorphologie mit abschnittsweise konstanten effektiven Materialeigenschaften mittels den Steifigkeits- und Festigkeitsprofilen ohne Verwendung eines vordefinierten Rasters. Spannungs- und Dehnungsfelder werden durch die Verwendung eines linear elastischen Materialmodells im Rahmen der nichtlinearen Finite-Elemente-Methode (*finite element method* FEM) beschrieben. Die Beschreibung von vertikalen Rissen wird mit der Anwendung der erweiterten Finite-Elemente-Methode (*extended finite element method* XFEM) realisiert. Horizontale Risse werden auf vereinfachte Weise als Delamination zwischen benachbarten Holzbrettern implementiert. Dies ermöglicht eine horizontale Rissausbreitung und die Vereinigung von zwei vertikalen Rissen mit einem horizontalen Abstand in benachbarten Brettern. Ohne diese Implementierung würde die prognostizierte Traglast überschätzt werden. Die Delamination, die zur vereinfachten Beschreibung von horizontalen Rissen eingeführt wurde, soll kein Versagen in der Klebefuge darstellen und verwendet daher nicht die Materialeigenschaften eines Klebstoffs. Für beide Rissmechanismen (bzw. -orientierungen) werden modifizierte Spannungs-Separations-Gesetze (*modified traction-separation laws*) verwendet, um ein quasi-sprödes Materialversagen zu modellieren. Das globale Versagen tritt nach einem definierten Abfall der Belastung in der Last-Verschiebungskurve

ein, wobei zusätzlich die Einhaltung von zwei Energie-Kriterien notwendig ist. Dieser Ansatz bildet eine nichtlineare Last-Verschiebungskurve und progressives Versagen ab.

Der computergestützte Modellierungsansatz ist in der Lage, sowohl die Biegefestigkeit als auch Versagensmechanismen auf zuverlässige Art und Weise zu bestimmen. Die Simulationsgenauigkeit erwies sich bei Verwendung von drei finiten Elementen pro Bretthöhe als ausreichend. Bei zwei verschiedenen Trägergrößen konnte der sogenannte Größeneffekt erfolgreich für zwei Festigkeitsklassen von BSH-Trägern abgedeckt werden. Die experimentell beobachteten Bruchpositionen im äußersten Brett auf der Zugseite konnten durch Simulationen bei mehr als 75 % der Träger erfolgreich prognostiziert werden.