

Abstract

Over the past decades, timber has gained popularity as a sustainable building material because of the rising environmental awareness. Furthermore, the resurgence of timber has also been encouraged by the advent of the digital age during the 21st century. The development of computer-aided design programming and digital fabrication tools has stimulated significant advances in both architecture and engineering. Within this context, researchers have shown a growing interest in wood-wood connections, inspired by traditional woodworking joints. Geometrically complex timber structures assembled with joints integrated in their plates have been developed using algorithmic geometry processing. However, although their design and fabrication have been automated, research focused on automated numerical tools for their structural analysis has been very limited.

This thesis is providing a design methodology for the structural analysis of timber plate structures composed of a large number of discrete planar elements and wood-wood connections. A finite element model, in which the semi-rigid behaviour of the connections is implemented using springs, is proposed. It is applied to a specific case study, namely the Annen Plus SA head office project in Manternach, Luxembourg, which consists of a series of double-layered double-curved timber plate shells. A design framework is introduced to automate the generation of the model and integrate structural analysis into the existing design and fabrication workflow.

The numerical model was built for both small- and large-scale structures through custom scripts and subsequently assessed through experimental investigations: first, laboratory tests were performed on small assemblies with simplified geometry; secondly, a displacement study was carried out onsite on a 24-metre span structure. Results obtained with the semi-rigid spring model were found to be in good agreement with experimental tests. The proposed model was therefore validated for the serviceability limit state. Furthermore, the semi-rigidity of the connections in translation as well as in rotation was shown to highly influence the model and is therefore crucial for the accuracy of the model.

Based on experimental tests observations, an alternative structural system was proposed and compared to the initial one through numerical investigations within the proposed design framework. A significant influence on the structure's performance was found, demonstrating the possibilities for structural optimisation.

Finally, a three-dimensional finite element model for wood-wood connections was investigated. It aimed to predict their semi-rigid behaviour, generally characterised through experimental tests, necessary for their implementation in global models. The material model was evaluated based on shear load tests performed on different engineered wood products. Stiffness and load-carrying capacity of the connections were approximated with numerical simulations. However, experimental tests remain necessary to precisely predict the behaviour of the joints.

This thesis highlights the importance of adopting an integrated design strategy encompassing engineering and fabrication aspects for geometrically complex timber structures, as well as establishing a link between local behaviour of the connections and global behaviour of the structure. The gained knowledge can facilitate the design and realisation of large-scale freeform timber structures using wood-wood connections.

Key words: *timber plate structures, wood-wood connections, digital fabrication, finite element method, semi-rigidity, spring model*

Résumé

Au cours des dernières décennies, le bois a gagné en popularité en tant que matériau de construction durable en raison de la prise de conscience environnementale croissante. De plus, la réapparition du bois dans le domaine de la construction a également été encouragée par l'avènement de l'ère numérique au cours du 21^{ème} siècle. Le développement de la conception assistée par ordinateur et des outils de fabrication numérique a stimulé des avancées significatives tant en architecture qu'en ingénierie. Dans ce contexte, les chercheurs ont montré un intérêt croissant pour les connexions bois-bois, inspirées des joints traditionnels. Des structures en bois géométriquement complexes et assemblées avec des joints intégrés dans leurs plaques ont donc été développées. Cependant, bien que leur conception et leur fabrication aient été automatisées, peu de recherches ont été réalisées en ce qui concerne le développement d'outils numériques automatisés pour leur analyse structurelle.

Cette thèse propose une méthode de modélisation numérique pour l'analyse structurelle de structures en bois composées d'un grand nombre de panneaux et de connexions bois-bois. Un modèle d'éléments finis, dans lequel le comportement semi-rigide des connexions est représenté par des ressorts, est proposé. Il est appliqué à un projet spécifique, à savoir le siège social de la société Annen Plus SA à Manternach, au Luxembourg, qui consiste en une série de coques en bois à double couche à double courbure. Un cadre de conception est introduit pour automatiser la génération du modèle et intégrer l'analyse structurelle au processus de conception et de fabrication existant.

Le modèle numérique a été construit pour des structures de petite et de grande taille à l'aide de scripts personnalisés et a ensuite été évalué par des études expérimentales : tout d'abord, des tests en laboratoire ont été effectués sur des petites structures avec une géométrie simplifiée; ensuite, une étude de déplacement a été réalisée sur chantier sur une structure de 24 mètres de portée. Les résultats obtenus avec le modèle de ressorts semi-rigides concordent avec les tests expérimentaux et le modèle proposé a donc été validé pour l'état limite de service. En outre, il a été démontré que la semi-rigidité des connexions en translation ainsi qu'en rotation influence fortement le modèle et est donc cruciale pour la précision du modèle.

Sur base d'observations faites lors des tests expérimentaux, un système structurel alternatif a été proposé et comparé au système initial, au moyen du modèle numérique développé et dans le cadre de conception proposée. Une influence significative sur la performance structurelle a

été trouvée, démontrant les possibilités d'optimisation structurelle.

Enfin, un modèle tridimensionnel d'éléments finis pour les connexions bois-bois a été étudié. Il visait à prédire leur comportement semi-rigide, généralement caractérisé par des tests expérimentaux, nécessaire à leur mise en œuvre dans des modèles globaux. Le modèle de matériau a été évalué sur base d'essais de cisaillement effectués sur différents types de panneaux en bois. La rigidité et la capacité des assemblages bois-bois ont été approximées par des simulations numériques. Cependant, des tests expérimentaux restent nécessaires pour prédire avec précision le comportement des assemblages.

Cette thèse souligne l'importance d'adopter une stratégie de conception intégrée englobant les aspects d'ingénierie et de fabrication pour les structures en bois géométriquement complexes, ainsi que d'établir un lien entre le comportement local des connexions et le comportement global de la structure. Les connaissances acquises peuvent permettre de faciliter la conception et la réalisation de grandes structures en bois de forme complexe utilisant des connexions bois-bois.

Mots clés : *structures en bois, assemblages bois-bois, fabrication digitale, méthode d'éléments finis, semi-rigidité, modèle de ressorts*

Zusammenfassung

Holz, ein nachhaltiger Baustoff, hat aufgrund des gestiegenen Umweltbewusstseins während der vergangenen Jahrzehnte deutlich an Popularität gewonnen. Darüber hinaus hat das Aufkommen des digitalen Zeitalters im 21. Jahrhundert seinen Beitrag geleistet. Die Entwicklung von Programmen zum Computer unterstütztes Entwerfen und für digitale Fertigungswerkzeuge, hat sowohl in der Architektur als auch im Ingenieurwesen bedeutende Fortschritte hervorgerufen. In diesem Zusammenhang haben Forscher ein wachsendes Interesse an Holz-Holz-Verbindungen gezeigt, inspiriert von traditionellen Techniken zur Holzverbindung. Geometrisch komplexe Holzstrukturen, die mit in ihre Platten integrierten Verbindungen zusammengefügt werden, wurden mit Hilfe von algorithmischen Geometrie-Prozessen entwickelt. Obwohl Entwurf und Herstellung automatisiert wurden, war die Forschung nach automatisierten, numerischen Methoden für die Strukturanalyse sehr begrenzt.

In dieser Arbeit wird eine Entwurfsmethodik für die Strukturanalyse von Holzplattenstrukturen, die sich aus einer großen Anzahl von diskreten flächigen Elementen und Holz-Holz-Verbindungen zusammensetzen, präsentiert. Es wird ein Finite-Element-Model vorgeschlagen, in dem das halbstarre Verhalten der Verbindungen mit Hilfe von Federn implementiert wird. Dieses wird auf eine spezifische Fallstudie angewendet, nämlich für das Projekt des Hauptsitzes von Annen Plus SA in Manternach, Luxemburg. Die vorgeschlagene Struktur besteht aus einer Reihe von zweischichtigen, doppelt gekrümmten Holzplattenschalen. Dazu wird ein Design-Framework eingeführt, um die Erzeugung des Finite-Element-Model zu automatisieren und die Strukturanalyse in den bestehenden Design- und Fertigungsablauf zu integrieren.

Das numerische Modell wurde sowohl für kleine als auch für große Strukturen mit Hilfe von benutzerdefinierten Skripten erstellt und anschließend durch experimentelle Untersuchungen bewertet: Erstens wurden Labortests an kleinen Baugruppen mit vereinfachter Geometrie durchgeführt; zweitens wurde eine Verschiebungsstudie *in-situ* an einer Struktur mit einer Spannweite von 24 Metern durchgeführt. Die Ergebnisse, die mit dem halbstarren Federmodell erzielt wurden, stimmten mit den experimentellen Tests gut überein. Das vorgeschlagene Modell wurde daher für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit validiert. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Halbstarreheit der Verbindungen sowohl in Translation als auch in Rotation einen hohen Einfluss auf das Modell hat und daher für die Genauigkeit des Modells entscheidend ist.

Basierend auf experimentellen Testbeobachtungen wurde ein alternatives Struktursystem vorgeschlagen und mit Hilfe von numerischen Untersuchungen innerhalb des vorgeschlagenen Konstruktionsrahmens mit dem ursprünglichen System verglichen. Es wurde ein signifikanter Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Struktur gefunden, was die Möglichkeiten der Strukturoptimierung aufzeigte.

Schließlich wurde ein dreidimensionales Finite-Element-Modell für Holz-Holz-Verbindungen untersucht. Es zielte darauf ab, ihr halbsteifes Verhalten vorherzusagen, das im Allgemeinen durch experimentelle Tests charakterisiert wird, welche wiederum für die Umsetzung in globale Modelle notwendig sind. Das Materialmodell wurde auf der Grundlage von Scherbelastungsversuchen bewertet, die an verschiedenen Holzwerkstoffprodukten durchgeführt wurden. Steifigkeit und Tragfähigkeit der Verbindungen wurden mit numerischen Simulationen approximiert. Um das Verhalten der Verbindungen genau vorherzusagen ist es jedoch weiterhin notwendig experimentelle Tests durchzuführen.

Diese Thesis unterstreicht die Bedeutung einer integrierten Entwurfsstrategie, die sowohl Ingenieur- und Fertigungsaspekte für geometrisch komplexe Holzstrukturen umfasst als auch eine Verbindung zwischen dem lokalen Verhalten der Holz-Holz-Verbindungen und dem globalen Verhalten des Bauwerks herstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse können den Entwurf und die Realisierung von großflächigen Freiform-Holzstrukturen mit Holz-Holz-Verbindungen erleichtern.

Schlüsselwörter: *Holzplattenstrukturen, Holz-Holz-Verbindungen, digitale Fertigung, finite element method, Halbstarrheit, Federmodell*