

Christian Jenkel

# **Structural and Material Inhomogeneities in Timber**

**Modelling by Means of the Finite Element Method**

# **Strukturelle und materielle Inhomogenitäten in Holz**

**Modellierung mittels der Finite Elemente Methode**

## Summary

Structural inhomogeneities in wood are defects in the naturally grown material, which cause a significant decrease of strength and stiffness. The additional uncertainty in material parameters is referred to as material inhomogeneities. In the present work, new approaches for the modelling of structural and material inhomogeneities within the Finite Element Method (FEM) are presented to enable a realistic numerical analysis of wooden structures. The basis of the developments are material models for the simulation of perfect wood free of inhomogeneities using macroscopic material parameters, such as the elasticity moduli and material strengths.

Knots in timber are considered as the most relevant structural inhomogeneities. In this work, each knot is modelled in particular in the numerical analyses. Therefore, a geometrical modelling procedure for timber based on experimental measurements on the wood surfaces is introduced. Two approaches are presented to model the grain course numerically and assign an individual material coordinate system to each integration point in the finite elements. The procedures are based on the computation of principal stress trajectories and on a flow-grain analogy. To transfer the geometrical description into an FE model, two automated meshing procedures are introduced, whereas knots and surrounding wood are distinguished either directly by element edges or indirectly by integration points. The models are applied to simulate the elastic, plastic and brittle material behaviour of timber including damage and failure. The analysis procedure is automated and can therefore be used for numerical timber grading, whereas global material parameters are computed on the basis of a few input parameters. For verification, all developed methods are applied in simulations of real timber boards tested experimentally at tensile loading.

The developed FEM is enhanced to consider material inhomogeneities and the uncertainty of further structural parameters. To incorporate different uncertainty characteristics, the uncertainty models randomness, fuzziness and fuzzy randomness are utilized. The procedure in uncertain structural analyses is described and demonstrated exemplarily. Relevant material parameters are modelled as uncertain variables based on experimental investigations on small specimen. The uncertainty in geometrical measures is described due to subjective estimations of tolerances. Since the available data base is restricted, the requirements for the application of randomness are not sufficiently fulfilled. The limitations of the model randomness are shown in stochastic simulations of wooden structures. In fuzzy stochastic structural analyses, material inhomogeneities are represented by fuzzy random variables while dimensions and structural inhomogeneities are described as fuzzy variables taking into account all available information. Finally, comments on the evaluation of uncertain result quantities for the purpose of structural design are given.

## Zusammenfassung

Strukturelle Inhomogenitäten in Holz sind Fehler im natürlich gewachsenen Material, die zu einer maßgeblichen Verringerung von Steifigkeit und Festigkeit führen. Die zusätzliche Unschärfe der Materialparameter wird als materielle Inhomogenität bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit werden neue Ansätze für die Modellierung struktureller und materieller Inhomogenitäten im Rahmen der Finite Elemente Methode (FEM) vorgestellt, um eine realitätsnahe numerische Analyse von Tragwerken aus Holz zu ermöglichen. Die Entwicklungen basieren auf Materialmodellen zur Simulation von Holz ohne Unstetigkeiten, in denen makroskopische Materialparameter wie z.B. Elastizitätsmoduln und Festigkeiten genutzt werden.

Die bedeutendsten strukturellen Inhomogenitäten in Holz sind Äste. In dieser Arbeit wird jeder Ast einzeln in der numerischen Analyse modelliert. Dafür wird eine Methode zur geometrischen Modellierung von Holz, basierend auf Messungen auf den Oberflächen, vorgestellt. Zwei Ansätze werden eingeführt, um den Faserverlauf numerisch zu bestimmen und jedem Integrationspunkt in den finiten Elementen ein individuelles Materialkoordinatensystem zuzuweisen. Die Prozeduren basieren auf der Berechnung von Hauptspannungstrajektorien und einer Faser-Fluid-Analogie. Zur Überführung des geometrischen Modells in ein FE Modell werden zwei Vernetzungsalgorithmen präsentiert. Die Unterscheidung von Ästen und umgebendem Holz erfolgt entweder direkt über Elementkanten oder indirekt durch Integrationspunkte. Die Modelle werden angewandt, um das elastische, plastische und spröde Materialverhalten von Holz, einschließlich Schädigung und Versagen, zu simulieren. Das Analyseverfahren ist automatisiert und kann somit für die numerische Sortierung von Bauholz genutzt werden, wobei eine Berechnung globaler Materialparameter auf Basis weniger Eingangsparameter erfolgt. Zur Verifikation werden alle entwickelten Methoden in Simulationen von experimentell getesteten Holzbrettern angewandt.

Die entwickelte FEM wird erweitert, um materielle Inhomogenitäten sowie die Unschärfe weiterer Tragwerksparameter zu erfassen. Entsprechend der verschiedenen Ursachen für Unschärfe werden die Unschärfemodelle Zufälligkeit, Fuzziness und Fuzzy-Zufälligkeit genutzt. Die unscharfe Tragwerksanalyse wird beschrieben und beispielhaft demonstriert. Maßgebliche Materialparameter werden auf der Basis von Experimenten an Kleinproben als unscharfe Größen modelliert. Die Beschreibung der Unschärfe in geometrischen Größen erfolgt durch subjektive Abschätzung von Toleranzen. Durch die begrenzte Datenbasis sind die Bedingungen für eine stochastische Modellierung nicht hinreichend erfüllt. Die Anwendungsgrenzen des Modells Zufälligkeit werden in stochastischen Simulationen von Holztragwerken aufgezeigt. In der fuzzy-stochastischen Tragwerksanalyse werden materielle Inhomogenitäten durch fuzzy-stochastische Variablen repräsentiert während Abmessungen und strukturelle Inhomogenitäten als Fuzzy-Variable beschrieben werden. Abschließend werden Möglichkeiten zur Auswertung unscharfer Ergebnisse für den Tragwerksentwurf aufgezeigt.