

**Modellierung und Simulation  
hygro-mechanisch beanspruchter  
Strukturen aus Holz  
im Kurz- und Langzeitbereich**

**Modelling and simulation  
of hygro-mechanically loaded  
wooden structures  
in short-term and long-term range**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der

Fakultät Bauingenieurwesen

der

Technischen Universität Dresden

eingereichte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Susanne Reichel

eingereicht am 24.02.2015

verteidigt am 12.06.2015

---

## Zusammenfassung

Die realitätsnahe numerische Simulation der Strukturantwort von Konstruktionen aus Holz erfordert die Formulierung zutreffender Modellierungsansätze. Insbesondere unter gekoppelter hygro-mechanischer Beanspruchung ist aufgrund der gegenseitigen nichtlinearen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen multiphysikalischen Prozessen die Anwendung numerischer Methoden für die Strukturanalyse unabdingbar. In der vorliegenden Arbeit werden Materialformulierungen zur Beschreibung des Kurz- und Langzeitverhaltens hygro-mechanisch beanspruchter Strukturen aus Holz für die Nutzung im Rahmen der Finite-Elemente-Methode vorgestellt.

Für eine zutreffende Modellierung der Materialcharakteristiken sind umfassende Kenntnisse hinsichtlich der Physik des Holzes erforderlich. Aufgrund dessen ist eine ausführliche Literaturstudie zur Phänomenologie des hygro-mechanischen Kurz- und Langzeitverhaltens von Holz unter besonderer Berücksichtigung von nichtlinearen Phänomenen und Versagensprozessen Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Als ein Resultat der damit verbundenen Recherchen werden die feuchteabhängigen mechanischen und Diffusionseigenschaften von 7 europäischen Holzarten angegeben.

Darauf aufbauend werden 2 Modellierungsansätze zur Erfassung des feuchteabhängigen Kurzzeitversagens von Holzstrukturen hergeleitet. Hierbei dient ein hygro-mechanisch gekoppeltes Mehrflächenplastizitätsmodell zu der Abbildung des duktilen Versagens unter Druckbeanspruchung. Sprödes Versagen unter Zug- und Schubbeanspruchung wird mittels einer hybriden Interface-Elementformulierung und eines zugehörigen hygro-mechanisch gekoppelten Materialmodells simuliert.

Ebenfalls basierend auf der Literaturstudie wird ein Modellierungsansatz zur Abbildung des Langzeitverhaltens von Holz unter Berücksichtigung linear viskoelastischen sowie nichtlinear viskoelastisch-viskoplastischen Materialverhaltens und Kriechversagens entwickelt. Der Einfluss der Höhe der konstanten Holzfeuchte wird erfasst. Darauf aufbauend wird im Rahmen einer hygro-mechanischen Kopplung der bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung und Feuchteänderung auftretende mechano-sorptive Effekt modelliert. Analog zu den Ansätzen zur Abbildung des Kurzzeitversagens wird hinsichtlich der Deformationsanteile zwischen Beanspruchungsursache und Strukturantwort unterschieden. Im Gegensatz zur Mehrzahl der veröffentlichten Kriechmodelle wird demnach eine lineare Verknüpfung von elastischen, viskoelastischen und viskoplastischen Deformationsanteilen mit den mechano-sorptiven Deformationen nicht a priori vorausgesetzt.

Die beschriebenen Modellierungsansätze werden im Rahmen von Anwendungsbeispielen für die Analyse verschiedener Strukturen eingesetzt. Die Nutzung nichtlinearer FE-Simulationen gewährt hierbei Einblicke in die ablaufenden Prozesse, die auf experimentellem Weg nicht zugänglich wären.

## Summary

The realistic numerical simulation of the structural behaviour of wooden constructions requires appropriate modelling approaches. Especially when hygro-mechanically coupled loadings are applied, the utilisation of numerical models for the structural analysis is indispensable due to the mutual non-linear dependencies between the different multiphysical processes. The thesis at hand deals with modelling approaches for the description of the short-term and long-term material behaviour of hygro-mechanically loaded wooden structures to be used within the framework of the Finite-Element-Method.

To be able to appropriately model the material characteristics, comprehensive knowledge on wood physics is required. Therefore, an extensive literature study with respect to the phenomenology of the hygro-mechanical short- and long-term behaviour of wood under special consideration of non-linear phenomena and failure processes is an important part of the work at hand. As a result, the moisture-dependent short-term properties of 7 European wood species are indicated.

Basing on that, 2 material formulations for the description of moisture-dependent short-term failure of wooden structures are derived. At this, a hygro-mechanically coupled multi-surface plasticity model captures ductile failure in compression. Brittle failure in tension and shear is simulated by means of a hybrid interface-element and a related hygro-mechanically coupled material formulation.

Using also the outcome of the literature study, a modelling approach for the description of the long-term behaviour of wood under consideration of linear viscoelastic and non-linear viscoelastic-viscoplastic material behaviour and creep failure is developed. The influence of the magnitude of constant moisture content is captured. Basing on this, mechano-sorptive effects occurring at simultaneous mechanical loading and moisture changes are modelled. Analogously to the approaches to capture short-term failure, origin of loading (mechanical, hygical, combined) and structural behaviour (linear and non-linear viscoelastic, viscoplastic) are distinguished with respect to the identification and determination of deformation components. Consequently, in contrast to the majority of published approaches, the additive combination of viscoelastic, viscoplastic, hygro-expansional and mechano-sorptive creep components is not a priori assumed.

The material models introduced in the work at hand are applied for the analysis of different structures. Utilising non-linear FE-simulations, at this, allows insight into multiphysical processes within the structures, which would not be available by experimental means.