

DISS. ETH No. 21761

***SORPTION AND SWELLING WITHIN GROWTH RINGS OF
NORWAY SPRUCE AND IMPLICATIONS ON THE
MACROSCOPIC SCALE***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by

CHRISTIAN LANVERMANN

Dipl.-Holzwirt, University of Hamburg

born 11.05.1981

citizen of

Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. P. Niemz, examiner

Prof. Dr. J. Carmeliet, co-examiner

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. R. Wimmer, co-examiner

Dr. Dr. h.c. U. Schmitt, co-examiner

2014

Abstract

Many cellular materials such as wood exhibit excellent load bearing capacity and toughness despite their low density. Changes in the environmental conditions, particularly humidity in regard to wood, lead to a swelling response of the material. This response of wood is highly anisotropic with respect to the principal directions. Due to the strictly hierarchical structure of wood, the macroscopic response originates from lower scale features. For the evaluation of the durability of the material in changing environmental conditions, the understanding of the contribution of the features on the different hierarchical scales is a prerequisite. In this thesis, the influence of the alternating earlywood and latewood bands as the main features within growth rings on the macroscopic swelling is investigated.

The mechanisms involved in the swelling of wood are based on its mechanical properties and its sorption and swelling behaviors. Due to the interaction of these mechanisms, a systematic approach is required based on the biological-geometrical structure. The structure investigations consider the structural and chemical differences within a growth ring and the implications on the physical properties. By combining neutron imaging and local strain measurement, it was possible to show that the considerable structural differences, as found for the cell architecture, do not influence the gravimetric equilibrium moisture content. The architectural differences, however, are reflected in the swelling and mechanical behavior of earlywood and latewood. It was shown that the behavior for the complete stress/strain relationship differs for the two tissues when loading the material in tangential tension. Interestingly, the failure for both tissues occurred in the middle lamella between two adjacent cells. By using digital image correlation techniques for local strain measurement, it was possible to show that where the radial swelling highly depends on the growth ring position, the tangential swelling is constant within a growth ring. The distance to the sample edge was also found to significantly influence the determined local swelling strain. The application of a FEM model showed that the overall swelling is a complex interplay of local expansion and contraction.

The knowledge gained on the growth-ring scale enabled a deeper understanding of the interaction of the properties. The proposed investigation techniques and the investigated parameters, namely cell architectural differences within a growth ring, local gravimetric moisture content, local

swelling properties, and local mechanical characterization until failure of earlywood and latewood, describe the main properties on the growth ring scale.

Together, these properties can be used to explain relevant relationships between macroscopic samples in relation to the different behavior of earlywood and latewood and their different proportions in the sample. Furthermore, this data can be used to numerically reproduce the swelling of these samples while expanding the incorporated features down to the cell wall level. In this respect, the insight gained can help to explore the full potential of the material by assessing the risk of failure at a given configuration under different climatic conditions.

Zusammenfassung

Zahlreiche Materialien – sowohl künstliche als auch natürliche - mit einem zellulären Aufbau weisen exzellente Festigkeitseigenschaften und eine hohe Zähigkeit bei einer gleichzeitig niedrigen Dichte auf. Zu diesen zählt auch der natürliche Werkstoff Holz. Eine Änderung der Umgebungsbedingungen, für das Material Holz vorwiegend eine Änderung der relativen Luftfeuchte, ruft bei diesen Materialien eine Dimensionsänderung hervor. In Bezug auf die Hauptrichtungen ist diese Änderung für das Holz stark anisotrop. Bedingt durch den strikten hierarchischen Aufbau ist es augenscheinlich, dass das makroskopische anisotrope Verhalten durch Merkmale auf tieferliegenden Hierarchieebenen hervorgerufen wird. Zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit des Materials unter sich ändernden klimatischen Bedingungen ist das Verständnis des Beitrags der Merkmale auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen zum makroskopischen Verhalten unerlässlich. Der Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Beitrags der sich abwechselnden Früh- und Spätholzschichten auf das Quellverhalten auf der makroskopischen Ebene.

Die makroskopischen Quellungseigenschaften von Holz werden einerseits durch die lokalen mechanischen Eigenschaften und andererseits durch die lokalen Sorptions- und Quelleigenschaften bestimmt. Um eine Verbindung der Eigenschaften zur Materialstruktur herstellen zu können, ist ein systematischer Ansatz basierend auf den strukturellen Gegebenheiten notwendig um den wechselseitigen Abhängigkeiten der Eigenschaften Rechnung zu tragen. Die strukturellen Untersuchungen in diesem Kontext beinhalten die zellgeometrischen und chemischen Veränderungen innerhalb eines Jahrrings und ihre Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften. Untersuchungen mit einer Kombination von Neutronenradiographie und lokaler Dehnungsmessung ergaben, dass die beträchtlichen strukturellen Unterschiede innerhalb eines Jahrrings keinen Einfluss auf die gravimetrische Ausgleichsfeuchte haben – diese ist konstant, unabhängig von der Position innerhalb des Jahrrings. Dagegen wurde eine starke Abhängigkeit der lokalen Quellung und der mechanischen Eigenschaften von der Jahrringposition festgestellt, unter Berücksichtigung aller darunterliegenden Hierarchieebenen und der Kopplung der einzelnen Gewebe. Es konnte gezeigt werden, dass sich das Spannungs-/Dehnungsverhalten bei einer Beanspruchung auf Zug in tangentialer Richtung bis zum Versagen von Frühholz stark von dem

von Spätholz unterscheidet. Interessanterweise fand der Bruch bei beiden Geweben ausschliesslich in der Mittellamelle zwischen zwei Zellen statt. Unter Verwendung eines digitalen Bildkorrelationssystems zur Bestimmung der lokalen Dehnung konnte gezeigt werden dass, während die radiale Quellung sehr stark von der Jahrringposition und damit der lokalen Dichte abhängt, die tangentielle Quellung über den Jahrring konstant ist. Als ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die lokale Quellung wurde hierbei der Abstand zum freien Rand identifiziert. Der Einsatz eines FEM Modells zeigte, dass die makroskopische Quellung durch ein komplexes Zusammenspiel von lokaler Ausdehnung und Kontraktion der einzelnen Gewebe gekennzeichnet ist.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse auf der Jahrringebene führen zu einem tieferen Verständnis über die Interaktion der einzelnen Eigenschaften. Die angewendeten experimentellen Techniken und untersuchten Eigenschaften, nämlich Unterschiede der Zellarchitektur innerhalb eines Jahrrings, die Bestimmung der lokalen gravimetrischen Ausgleichsfeuchte, der lokalen Quellung und der lokalen mechanischen Eigenschaften bis zum Versagen repräsentieren die wichtigsten Eigenschaften zur Beschreibung der Verhältnisse auf der Jahrringebene.

Es kann zusammengefasst werden, dass ein Grossteil der makroskopisch beobachtbaren Quellungseigenschaften mit den hier gewonnen Erkenntnissen über das Verhalten von Früh- und Spätholz und ihrem Anteil an einer Probe zu erklären sind. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die ermittelten Daten für die numerische Simulation unter Einbeziehung tiefer liegender Hierarchieebenen zur Validierung einzusetzen um auf diesem Wege die volle Kapazität des Werkstoffes auszunutzen. Der Einsatz von Simulationstechniken bietet hier die Möglichkeit schon im Vorfeld die Versagenswahrscheinlichkeit unter wechselnden klimatischen Bedingungen abzuschätzen.