

The Principles of Plant Growth Inspiring the Design of Concrete Structures

Prinzipien des Pflanzenwachstums als Inspiration für Strukturen aus Beton

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Jakob Platen
geboren am 08. März 1997 in Demmin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. habil. Sven Klinkel
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Prof. Dr.-Ing. habil. Detlef Kuhl
Universität Kassel

Tag der Einreichung: 11. Dezember 2023

Tag der Verteidigung: 03. Juli 2024

Summary

Plants are subjected to evolution over a long period of time. Since a struggle for resources, including light, occurs in nature, evolution influenced the growth of plants in order to increase efficiency. Efficient structures are a goal of engineering disciplines as well. Concrete is a widely used building material. Hence, the application of growth principles onto concrete engineering structures is desired.

Firstly, the continuum mechanical balance equation describing growth processes are formulated to be applicable for plants. Consequently, an evolution equation for the field variable describing growth is obtained. The constitutive equations arising in the description of growth are chosen in such a way to model different phenomena typical for plants. The results are processed to enable solution by the finite element method. By comparing the results of the numerical simulations to experiments, a good alignment with reality is observed. The main factors influencing the direction of the plant growth can be captured by the proposed formulations. The mechanical behavior of plants is characterized by a viscoelastic material model, which is demonstrated to capture experiments on plants.

Secondly, further contributions to the modeling of concrete are outlined in the thesis at hand. Further extensions of the well known microplane framework are detailed, in order to include a consistent modeling of finite strain plasticity inducing damage. Additionally, the microlayer framework is described as an alternative multiscale modeling approach for concrete. Due to the *Principle of Multiscale Virtual Power*, a stronger decoupling of the spatial directions is obtained. Both models are extensively compared on purely numerical examples and on experimental data. It is shown that, the microlayer model is better capable of predicting the multiaxial behavior concrete.

Finally, the application of the growth of plants onto engineering challenges is shown. For the utilization of fiber growth principles, plausible results are obtained within engineering examples. The adaption of the geometry of engineering structures by the principles of plant growth is shown as well. In these examples, the reduction of stress peaks and the transition of stresses to previously unloaded regions is observed.

Zusammenfassung

Pflanzen wurden über einen langen Zeitraum durch die Evolution an ihre Umgebung angepasst. Da die Ressourcen in der Natur, zum Beispiel Licht, limitiert sind, führte die Evolution zu effizienteren Strukturen. Eine Steigerung der Effizienz ist ein Ziel in Ingenieurdisziplinen. Beton ein ist weitverbreitetes Baumaterial. Daher ist die Anwendung von Wachstumsprinzipien im technischen Strukturentwurf für Betonstrukturen erstrebenswert.

Die grundlegenden Erhaltungsgleichungen der Kontinuumsmechanik werden für Wachstumsprozesse von Pflanzen formuliert. Basierend auf den Erhaltungsgleichungen wird eine zeitliche Entwicklung der Feldvariable, die das Wachstum beschreibt, ermöglicht. Die entstehenden konstitutiven Gleichungen sind so gewählt, dass die typischen Phänomene des Pflanzenwachstums abgebildet werden. Die Lösung der entstehenden Gleichungen erfolgt mit der Finiten Elemente Methode. Die Ergebnisse der Simulationen werden mit Experimenten verglichen, um die Übereinstimmung zwischen Realität und Simulation zu demonstrieren. Die Formulierung des Pflanzenwachstums kann die maßgeblichen Richtungseinflüsse abbilden. Das mechanische Verhalten der Pflanzen wird durch ein viskoelastisches Materialmodell beschrieben, das Experimente an Pflanzen beschreiben kann.

Zusätzlich erfolgt eine Weiterentwicklung der Materialmodellierung von Beton. Das bekannte Microplanemodell wird, um eine konsistente Modellierung von plastizitätsinduzierter Schädigung bei finiten Deformationen, weiterentwickelt. Das Microlayermodell wird als ein alternativer Ansatz für die Beschreibung von Beton entwickelt. Durch das *Principle of Multiscale Virtual Power* wird eine stärkere Entkopplung der Raumrichtung erreicht. Beide Modellansätze werden umfassend anhand von rein numerischen Beispielen und Experimenten verglichen. Das Microlayermodell kann das Verhalten von Beton in mehraxialen Versuchen besser abbilden.

Abschließend erfolgt die Anwendung des Pflanzenwachstums auf Ingenieurstrukturen. Durch die Verwendung der Faserwachstumsprinzipien können plausible Ergebnisse im technischen Strukturentwurf erzielt werden. Die Anwendung des Wachstums auf Ingenieurstrukturen erzeugt eine Reduktion von Spannungspitzen und eine höhere Belastung von weniger belasteten Regionen.