



Doctoral Thesis

## On the Analysis, Simulation and Structural Design of Helical Constructions

**Author(s):**

Karathanasopoulos, Nikolaos

**Publication Date:**

2015

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010576886> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 22866

# On the Analysis, Simulation and Structural Design of Helical Constructions

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

*presented by*  
Nikolaos Karathanasopoulos

MSc UC Berkeley  
born 22.08.1988  
citizen of Greece

*accepted on the recommendation of*  
Prof. Dr. E. Mazza, examiner  
Prof. Dr. J-F. Ganghoffer, co-examiner  
Dr. G. Kress, co-examiner

2015

# Abstract

---

The present thesis provides analytical and numerical modeling developments on the characterization and simulation of the mechanical response of helical constructions. Moreover, it presents a modeling framework for the assessment of the torsional response bounds of multilayer helical assemblies. Furthermore, it elaborates a methodology for the selection of the braiding pattern of layered helical constructions. Finally, it explicates a modeling scheme for the inference of the structural composition of tendon fascicles.

On the characterization of the helix structural response, a modeling extension is presented, incorporating radial strain as an additional degree of freedom to the commonly favored axial and torsional ones. To that extent, the governing kinematic, constitutive and equilibrium equations are formulated with the use of a beam based model, providing closed-form stiffness term expressions. The extended structural response is further assessed by means of a dedicated planar finite element that not only allows for the simulation of the above broached loading patterns but also for the numerical modeling of thermal loading.

Moreover, the present work provides a modeling scheme for the demarcation of the mechanical response bounds of multilayer helical constructions subject to structural kinematic constraints. In particular, the constructions' torsional response bounds are analyzed considering a wide range of braiding patterns. The response of the kinematically constrained structures is related by means of scaling factors to the stiffness properties of the unconstrained one, which can be analytically calculated upon closed-form expressions.

Furthermore, a quantitative framework guiding the mechanical design of layered helical assemblies is reported. More specifically, a methodology allowing for the optimization of the structural braiding patterns is presented. The favored structural arrangements are selected so that they maximize the resistance of the arising construction to axial loads and concurrently minimize its torsional propensity. The methodology is used to retrieve favorable structural patterns for helical assemblies comprised of up to five layers, providing a database that covers most practical applications.

Finally, the present thesis explicates a numerical model for the inference of the structural composition of tendon fascicles. In particular, tendon experimental data are coupled to finite element and Bayesian uncertainty quantification modeling. The finite element models allow for the recreation of the available experimental set-ups in a computationally tractable way, while the Bayesian framework allows for a direct comparison amongst hundreds of different model classes. Thereupon, probabilistic bounds for the model parameters are provided, establishing a fundamental linkage between successive tendon hierarchi-

cal levels. By that means, not only a direct correlation between structural composition, mechanical properties and experimental data is achieved, but further, a database for the engineering of artificial tendons is furnished.

# Zusammenfassung

---

Die vorliegende Arbeit liefert analytische und numerische Modelle für die Bestimmung und Simulation des mechanischen Verhaltens helixförmiger Konstruktionen. Zudem geht es um einen Modellierungsansatz für die Abschätzung der Torsionssteifigkeitsgrenzen mehrschichtiger Kabel. Des weitern zeigt sie eine Methode zur Bestimmung der Parameter mehrschichtiger Kabel zur Minimierung der Kopplung zwischen Längsdehnung und Torsion. Schliesslich erklärt sie ein Vorgehen für das Auffinden des Strukturaufbaus der Sehnenfaszikel.

Für die Analyse des Strukturverhaltens helixförmiger Konstruktionen wird hier ein existierendes Modell für längs- und Torsionsbelastung um die radiale Deformation erweitert. Hier werden die kinematischen, konstitutiven und Gleichgewichtsgleichungen für eine geschlossene Lösung der Einträge der Struktursteifigkeitsmatrix formuliert. Das ausgebreitete Strukturverhalten ist zusätzlich charakterisiert mittels eines dedizierten planaren finiten Elementmodells, welches nicht nur die Simulation der oben thematisierten Belastungsmuster ermöglicht, sondern auch die numerische Modellierung von Thermalbelastungen.

Des Weiteren gewährt die vorliegende Arbeit ein Modell für die Bestimmung der Grenzen mechanischen Verhaltens von vielschichtigen helixförmigen Konstruktionen, in welchen strukturelle kinematische Beschränkungen enthalten sind. Insbesondere werden die Grenzen des Drehverhaltens analysiert in Bezug auf einen weiten Bereich von Strukturmustern. Das Verhalten kinematisch beschränkter Strukturen ist mit dem Gebrauch von Skalarfaktoren auf Steifigkeit unbeschränkter Strukturen bezogen, welche analytisch mit festgesetzten Gleichungen berechnet werden können.

Ferner wird ein Berechnungsrahmen als Leitmotiv für das mechanische Design der vielschichtigen helixförmigen Gruppen thematisiert. Ausführlicher wird eine Methode präsentiert zwecks der Optimierung der Strukturmuster. Die bevorzugten strukturellen Muster sind so gewählt, dass sie den Widerstand der Konstruktion maximieren und zugleich ihre Drehneigung minimieren. Die Methode wird so angewandt, dass die vorteilhaften Strukturmuster für vielschichtige Gruppen, die aus bis zu fünf Schichten gebildet sind, ausgewählt und verwendet werden, um ein Datenarchiv für alle praktischen Anwendungen zu liefern.

Zum Schluss erklärt die aktuelle These ein numerisches Modell ausführlich, woraus man auf die strukturelle Zusammensetzung der Sehnenfaszikel schliessen kann. Insbesondere werden die Experimentdaten sowohl mit der finiten Elementsimulation als auch mit der Bayesianischen Wahrscheinlichkeitssimulation verbunden. Die finiten Elementmod-

elle erlauben die vom Computer gesteuerte Nachbildung der verfügbaren Experimente, während der Bayesianische Rahmen einen direkten Vergleich zwischen hunderten von verschiedenen Modellkategorien erlaubt. Daraufhin werden Wahrscheinlichkeitsgrenzen für die Modellparameter gewährt, die eine fundamentale Verbindung zwischen aufeinander folgenden hierarchischen Sehnenebenen herstellen. Auf diese Weise werden nicht nur direkte Korrelationen zwischen Strukturzusammensetzung, mechanischen Eigenschaften und Experimentdaten erreicht, sondern auch eine Datenbasis für das Entwickeln künstlicher Sehnen geliefert.