

Abstract

Sharks and stingrays have a distinct skeletal system, which is predominantly made up of unmineralized cartilage, a material that is several orders of magnitude less stiff than the bone forming most vertebrate skeletons. The cartilage skeleton of sharks and rays is wrapped in a surface tessellation composed of minute polygonal tiles called tesserae, which are linked to each other by unmineralized collagenous fibers. The distinct combination of hard and soft tissues —and particularly the arrangements and structure of the tiled layer— is hypothesized to enhance the mechanical properties of this cartilage (which performs many of the same functional roles as bone) by providing either stiffness or flexibility, depending on the nature of the applied load.

This dissertation examines the effect of tesseral shape, ultrastructure and material properties on the mechanics of tessellated cartilage. In a first project phase, two-dimensional analytical models of arrays of different tile shapes (triangle, square and hexagon) surrounded by soft, fibrous joints were developed to evaluate the mechanical performance (effective modulus) of tessellations, as a function of their material and structural parameters. The two dimensional (2D) tiled composites were constructed from simple geometric shapes, and the overall composite effective modulus calculated by making a modification to the traditional Rule of Mixtures. The structural and material properties of joints (thickness, Young's modulus) and tiles (shape, area and Young's modulus) were altered to determine their effect on the mechanical performance of the whole composite. It was observed that for all shapes the effective modulus increases with decrease in joint thickness or increase of tile

stiffness. Square tessellations were mechanically least sensitive and hexagons were most sensitive to changes in the modeled parameters. These observations indicate that mechanical performance (e.g. stiffness) of tessellated cartilage (and tiled composites in general) can be tuned and optimized through changes in joint and tile geometry and materials properties.

In a second project phase, three-dimensional (3D) tesserae were modeled with the ultrastructural features described in natural tessellated cartilage incorporated, and their mechanics evaluated using finite element analysis (FEA). Geometric aspects of these ultrastructural features were varied parametrically, and effective modulus of the whole tessera was calculated. Some structural changes had no effect on tesseral stiffness, whereas an increase in contact surface area of two adjacent tesserae increased the effective stiffness of tesserae by 6%. It was observed that distinct hypermineralized features in tesserae (so-called 'spokes') experience maximum stress, but that their lamellated structure likely helps dissipate crack energy, making tesserae more damage-tolerant. Additionally, my models show that the tesseral center experiences high strain energy densities, suggesting that cells in this region in natural tesserae may be sensors of mechanical information. Building on my model of individual tesserae, modeled stress-strain curves of whole tesseral arrays show that changes in tesserae / joint shape and material properties can have pronounced effects on the mechanical behavior of the whole tiled composite.

Maximum stresses in tension and compression occur in joints or within tesserae, respectively, supporting hypotheses of multi-functional properties of shark and ray tessellated cartilage.

The combined results of the two project phases are useful drivers of hypotheses regarding tesseral growth, mechanics, load management, prevention and 'directing' of cracks and tesseral contribution to cartilage mechanics. Further, these results lay a foundation for deriving guidelines and design principles for developing tunable tiled materials inspired from the tessellations found in shark and stingray skeletons.

Zusammenfassung

Haie und Stachelrochen haben ein besonderes Skelett das überwiegend aus nicht mineralisiertem Knorpel besteht, einem Material, dass um mehrere Größenordnungen weniger steif ist als Knochen im Skelett aller anderen Wirbeltiere. Dieses Knorpelskelett ist nur oberflächlich mineralisiert, eingehüllt in ein Mosaik aus winzigen polygonalen Kacheln, den sogenannten ‚Tesserae‘, die untereinander durch unmineralisierte Kollagenfasern miteinander verbunden sind. Erstaunlicher Weise erfüllt das so ‚gepanzerte Knorpelskelett‘, dieselbe Funktion wie sein viel härteres, knöchernes Pendant. Es wird angenommen, dass die spezifische Kombination von Hart- und Weichgewebe – insbesondere die Anordnung und Struktur von Tesserae– die mechanischen Eigenschaften des Knorpelskeletts verbessern indem je nach Art der Belastung (Druck oder Zug) entweder Steifigkeit oder Flexibilität erreicht wird.

In dieser Dissertation wird der Einfluss von Form, Ultrastruktur und Materialeigenschaften der Tesserae auf die Mechanik der oberflächlich gekachelten Skelettelemente untersucht. In einer ersten Projektphase wurden zweidimensionale (2D) analytische Modelle von Anordnungen unterschiedlicher Kachelformen (Dreieck, Quadrat und Sechseck) entwickelt, bei denen die einzelnen Kacheln durch flexible Gelenke miteinander verbunden sind. Im Anschluss wurde das mechanische Verhalten (zB. Young’s Modulus) der verschiedenen Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit von ihren Material- und Strukturparametern bewertet. Der Elastizitätsmodul des

Verbundwerkstoffs wurde dabei mit Hilfe einer Abwandlung der traditionellen ‚Rule of Mixtures‘ aberechnet. In den Experimenten wurden die Struktur- und Materialeigenschaften der Gelenke (zB. Dicke und Elastizitätsmodul) und der Kacheln (zB. Form, Fläche und Elastizitätsmodul) geändert, um deren Einfluss auf die mechanische Leistung des gesamten Verbundwerkstoffs zu bestimmen. In allen Modellen, unabhängig der Kachelform, nahm der effektive Elastizitätsmodul bei abnehmender Gelenkdicke oder zunehmender Steifigkeit der Kacheln zu. Jedoch im Vergleich der mechanischen Leistung waren Mosaiksteine bestehend aus quadratischen am wenigsten bzw. sechseckigen Kacheln am meisten empfindlich gegenüber Veränderungen der modellierten Parameter. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Steifigkeit von gekachelten Verbundwerkstoffen durch Änderungen der Kachel- und Gelenkform und deren Materialeigenschaften abgestimmt bzw. optimiert werden kann.

In der zweiten Projektphase wurden dreidimensionale (3D) Mosaiksteine mit ultrastrukturellen Merkmalen (abgeleitet von den Beschreibungen der natürlichen Tesserae) modelliert und ihr mechanisches Verhalten mittels Finite-Elemente-Analyse (FEA) analysiert. Zu den inneren Merkmalen der Tesserae zählen hochmineralisierte ‚Spokes‘ [ähnlich den Speichen eines Rades] aufgebaut aus Lamellen, und ein homogenes Zentrum dessen Radius variiert. Geometrische Aspekte dieser ultrastrukturellen Merkmale (Lamellenanzahl und -dicke, Radius des homogenen Zentrums, und Gelenkkontaktfläche) wurden variiert (durch parametrisches Modellieren) und der effektive Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffes berechnet. Die Änderung der ‚Spoke‘-Lamellenzahl und des Radius des homogenen Zentrums hatte keinen Einfluss auf die Steifigkeit der Tesserae, während

eine Vergrößerung der Kontaktfläche von zwei benachbarten Tesserae deren effektive Steifigkeit um 6% erhöhte.

Die maximale Spannung wurde innerhalb der Spokes beobachtet, in Form eines oszillierenden Spannungsmusters, aufgrund des periodisch variierenden Moduls der Lamellen. Ebenso nahm die Wellenlänge der modellierten Spannungsschwankungen mit zunehmender Lamellendicke ab. Letzteres unterstützt gängige Theorien, dass periodische Schwankungen der Materialeigenschaften in natürlichen Materialien dazu führen können die Ausbreitung von Rissen zu beeinflussen oder gar zu verhindern. Meine Modelle zeigen weiterhin, dass das Zentrum von Tesserae eine hohe Dehnungsenergie-dichte aufweist, was darauf hindeuten könnte, dass die Zellen in dieser Region in den natürlichen Tesserae als Sensoren für mechanische Informationen fungieren. Aufbauend auf meinen individuellen Tessera-Modellen, zeigen modellierte Spannungs-Dehnungskurven zusammengesetzter Mosaik, dass Veränderungen der Größe von Tesserae und deren Gelenken sowie ihren Materialeigenschaften signifikante Auswirkungen auf das mechanische Verhalten des Verbundwerkstoffs (des Mosaiks) haben. Maximale Zug- und Druckspannungen treten jeweils in den Gelenken bzw. in Mosaiksteinen auf und stützen somit Hypothesen über die multifunktionalen Eigenschaften des Mosaikknorpels von Haien und Rochen. Die kombinierten Ergebnisse der beiden Projektphasen bieten nützliche Daten für die Erstellung von Hypothesen über das Wachstum, dem mechanischen Verhalten unter Last, sowie der Prävention und Regulierung von Brüchen in Tesserae und ihrem Beitrag zum mechanischen Verhalten von oberflächlich gekachelten, knorpeligen

Skelettelementen. Die hier gezeigten Ergebnisse bilden darüber hinaus die Grundlage für die Ableitung von Gestaltungsprinzipien für die Entwicklung artifiziereller Kachelungen von 3D Objekten, die sich an den Tesserae-Netzwerken in Haifisch- und Rochenskeletten orientieren.