



Doctoral Thesis

Morphometric methods for the direct three-dimensional analysis of bone microarchitecture

Author(s):

Hildebrand, Tor

Publication Date:

1996

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001755413> →

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](#).

**Morphometric Methods for
the Direct Three-Dimensional Analysis of
Bone Microarchitecture**

Dissertation for the degree of

DOCTOR OF THE TECHNICAL SCIENCES

of the

**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH, SWITZERLAND**

presented by

TOR HILDEBRAND

**M. Sc. El. Eng. Lund Institute of Technology
born on July 2, 1967
citizen of Sweden**

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Niederer, examiner
Prof. Dr. P. Rügsegger, co-examiner

1996

Abstract

The degenerative process of bone associated with diseases such as osteoporosis is only partially reversible and leads to an increased fracture risk of e.g. the spine, the proximal femur and the distal radius. An early diagnosis of bone disorders is, therefore, of importance for a successful treatment and prevention of fractures. For a precise assessment of the pathological state of bone the established measures of bone mass are to be complemented with measures of bone microarchitecture (referred to as trabecular or cancellous bone). The analysis of the complex three-dimensional network of trabecular bone requires three-dimensional imaging techniques. Data acquisition and representation are available, procedures for the direct quantification of the primary structural features, however, are missing. In this work such methods are introduced by means of direct three-dimensional image processing.

The cells responsible for bone resorption (osteoclasts) cause a local thinning of the trabecular structure. So far thickness changes were estimated stereologically assuming simple models. With such indirect methods the derived value will be biased to an unknown extent if the examined structure derives from the assumed model. By introducing a general thickness definition, a model independent mean thickness is assessable from arbitrary structures. The method is implemented efficiently using three-dimensional distance transformation of voxel images. In addition to the mean thickness, the thickness distribution is also available, revealing information of spatial variations of the structure width.

Bone loss causes the structure type to change. A pathological bone is characterized by a rod-like trabecular structure while a healthy bone is more plate-like. A new parameter called Structure Model Index (SMI) is introduced to quantitatively describe the structure type of trabecular bone. SMI is calculated by a dynamic analysis of the structure surface using surface triangulation algorithms.

The new methods were applied to a large set of human bone samples from the lumbar spine, the femoral head and the iliac crest. The results show, at all examined sites, considerable inter-individual variations in the model type, discouraging the use of established indirect methods to derive structural parameters. For the first time it is now possible to quantify the conversion from plates to rods as bone volume declines. The remodeling rule seems to be the same for all examined sites.

The new methods allow to quantify primary structural properties in a direct and unbiased way. Together with *in vivo* three-dimensional measuring techniques they have the potential as powerful tools for the diagnosis and treatment monitoring of bone disorders.

Zusammenfassung (Abstract in German)

Der im Zusammenhang mit Krankheiten wie Osteoporose auftretende Knochenabbau ist nur teilweise reversibel und führt zu einem erhöhten Frakturrisiko, insbesondere von Wirbelsäule, proximalem Femur und distaler Tibia. Eine Früherkennung von pathologischen Veränderungen des Knochengewebes ist für eine erfolgreiche Behandlung und Verhinderung von Frakturen deshalb besonders wichtig. Für eine genaue Abschätzung des Knochenzustandes müssen die etablierten Messgrößen Knochenmasse und Knochendichte durch solche ergänzt werden, welche die Mikrostruktur des trabekulären Knochens widerspiegeln. Die Untersuchung des komplexen Knochennetzwerkes verlangt dreidimensionale Analyseverfahren. Messmethoden, Bildrekonstruktion und Darstellung sind vorhanden, jedoch fehlen Prozeduren für die direkte Quantifizierung primärer struktureller Eigenschaften. In dieser Arbeit werden solche Methoden mit Hilfe von direkter dreidimensionaler Bildverarbeitung entwickelt und angewendet.

Die für den Knochenabbau verantwortlichen Zellen (Osteoklasten) verursachen eine lokale Verdünnung der trabekulären Struktur. Bis jetzt konnten Veränderungen der Knochendicke nur mittels stereologischer Verfahren abgeschätzt werden. Diese indirekten Methoden gehen von Modellen aus, welche nicht mit den realen Strukturen übereinstimmen und daher verfälschte Werte liefern. Durch die Einführung einer allgemeinen Definition der Dicke ist es möglich, eine modellunabhängige mittlere Dicke von beliebigen Strukturen zu bestimmen. Die Methode ist für Voxelbilder effizient implementiert, wobei dreidimensionale Distanztransformationen verwendet werden. Neben der mittleren Dicke wird auch die Dickeverteilung bestimmt, mit welcher die räumliche Variation der Strukturbreite erfasst werden kann.

Der Knochenabbau führt auch zu Veränderungen des Strukturtyps. Krankhafte Knochen sind durch eine stabähnliche Struktur gekennzeichnet, gesunde Knochen sind dagegen eher plattenähnlich. Ein neuer Parameter, genannt *Structure Model Index* (SMI), wurde eingeführt, um den Strukturtyp quantitativ beschreiben zu können. SMI wird durch eine dynamische Analyse der Strukturoberfläche und unter Verwendung einer Oberflächentriangulation berechnet.

Mit Hilfe der entwickelten Verfahren wurden Knochenproben der lumbalen Wirbelsäule, des Femurkopfes und des Beckenkammes von 70 Patienten analysiert. Un-

abhängig vom Messort zeigten die Resultate eine erhebliche inter-individuellen Variation des Modelltyps, d.h. die Verwendung von etablierten indirekten Methoden für die Ableitung struktureller Parameter ist fragwürdig. Zum erstenmal konnte die Umwandlung von Platten zu Stäben in Folge einer Abnahme des Knochenvolumens quantifiziert werden. Diese Umwandlung scheint unabhängig von den gewählten Messorten zu sein.

Mit den neuen Methoden ist es nun möglich, primäre strukturelle Eigenschaften direkt und unverfälscht zu quantifizieren. Zusammen mit dreidimensionalen *in vivo* Messverfahren können sie in Zukunft für die Diagnose, die Verlaufs- und Therapiekontrolle bei Knochenfunktionsstörungen von grossem Nutzen sein.