



## Doctoral Thesis

# Development of a novel micro-structural finite element approach to model fracture fixation in osteoporotic human bone

**Author(s):**

Steiner, Juri A.

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010594465> →

**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. 23289

**Development of a novel  
micro-structural finite element  
approach to model fracture fixation  
in osteoporotic human bone**

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

presented by

**Juri Alexis Steiner**

M.Sc. Human Movement Sciences, ETH Zurich

born on 18.11.1983

citizen of Ringgenberg BE

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Stephen Ferguson, examiner

Prof. Dr. G. Harry van Lenthe, co-examiner

2016

# Summary

In daily life, our bones fulfill various vital tasks to keep our body functioning properly: They protect delicate organs, produce red blood cells, provide a mineral reservoir to keep for instance calcium and phosphate blood levels in essential balance; and last but not least they provide structural and mechanical support during daily activities. With increasing age however, bones lose their structural integrity. The underlying disease is called osteoporosis and is defined as a systemic bone disease causing decreased bone density and altered bone micro-architecture, which inevitably leads to an increased fracture risk. Despite the advances made in the diagnosis and pharmacological treatment of osteoporosis, the prevalence of osteoporotic fractures is still increasing because the proportion of the elderly in our population is constantly growing. When osteoporotic fractures occur, immediate treatment is required, because in many cases they are very painful and, if left untreated, they can severely limit the individual's mobility for a lifetime. The primary goal of fracture fixation is to obtain secure primary implant stability, in order to reduce the potential risk of fixation failure requiring revision surgery. In osteoporosis, however, fracture treatment is hindered because it is more difficult to obtain a secure, mechanically stable, screw fixation in low quality bone compared to a healthy bone stock. Consequently, the treatment of osteoporotic fractures is sub-optimal.

In order to improve the treatment of fractures in osteoporotic bone, more detailed and quantitative understanding on the role of peri-implant bone for implant (i.e. orthopedic fracture fixation screw) stability is needed. However, systematic mechanical *in vitro* testing on a wide variety of human bone specimens is very costly in terms of material and time. Alternatively, a computational approach, more specifically finite element (FE) modeling, has been proposed as an alternative strategy. In most FE studies that investigate the mechanical competence of bone-screw systems, bone has been treated as a continuum material with homogenous material properties, while only a few actually considered the anisotropic micro-architecture of bone. A high potential is seen in high-resolution micro-computed tomography ( $\mu$ CT) based finite element ( $\mu$ FE) analysis; a technique that has been verified and validated for quantifying stiffness and strength of trabecular bone. However, regarding *in silico*

modeling of screws in trabecular bone, a considerable remaining challenge lies in the description of the implant-bone interface. So far, no single computational study has been performed that fully takes both the bone micro-architecture and the complex mechanical properties of the bone-screw interface into account. Therefore, the aims of this thesis were (i) to develop an imaging method that localizes and quantifies bone damage due to screw insertion, (ii) to improve the *in silico* quantification of the apparent stiffness of screws in human trabecular bone, and (iii) to establish a proof of concept towards a patient-specific organ level *in silico* model to quantify primary implant stability of a fracture fixation device in human osteoporotic bone.

For the first aim, we developed a method that localizes and quantifies bone damage, non-invasively and in three dimensions, along the entire length of the screw. We could show that the trabecular bone structure is affected by screw insertion and that bone damage occurs close to the implant only ( $< 1.0$  mm). We also showed that screws with large threads had a slightly greater impact on the peri-implant bone than screws with small threads. It is the first study to localize and quantify bone damage caused by screw insertion based on a non-invasive, three-dimensional,  $\mu$ CT imaging technique. We clearly demonstrated that peri-implant bone damage already occurs during screw insertion. We hypothesized that the strong over-predictions of the primary implant stability in screw-bone systems, as seen with state-of-the-art computational models, is related to the fact that perfectly intact bone-screw interfaces were assumed. Hence, we recommended that our findings on bone damage should be taken into consideration to further improve primary implant stability, especially in low quality osteoporotic bone. We believe that this technique could be a promising method to assess more systematically the effect of peri-implant bone damage on primary implant stability.

For the second aim, we developed a novel *in silico* method to accurately quantify primary implant stability of screws in trabecular bone. In short, we developed a patient-specific computational model that can quantify the apparent stiffness of screws in bone with an accuracy of 12 % for both uniaxial compressive loading as well as shear loading. The approach uses  $\mu$ FE analysis in combination with a statistical modeling technique that links the tissue modulus of the damaged peri-implant bone to the native bone micro-architecture in a specimen-specific manner. We confirmed our hypothesis that by modeling interface detachment between screw and bone and by considering insertion-related bone damage it is possible to obtain a more accurate prediction of the primary stability of screws in bone. The effects of insertion-related bone damage appear to be stronger than that of interface detachment. In conclusion, we have brought further evidence that screw insertion

causes peri-implant bone damage; a phenomenon that should be considered in the future for any computational analysis of primary implant stability of bone-implant systems. We believe that this novel technique provides an important step towards a better understanding of the detailed mechanisms of primary implant stability in human trabecular bone.

For the third aim, we established a proof of concept for a patient-specific *in silico* model to quantify primary implant stability of a complex plate and screw system in human osteoporotic bone. Furthermore, we put in place a methodology to validate such a patient-specific  $\mu$ FE model using *in vitro* biomechanical tests combined with a motion tracking system that measures displacements on various sites of the specimen. We confirmed the hypothesis that the consideration of peri-implant bone damage due to screw insertion improves the accuracy of the prediction of the apparent implant-bone stiffness. Based on this demonstration case, the predictive power of the proposed method can be further validated by including more specimens.

In conclusion, this thesis showed clear evidence for peri-implant bone damage due to screw insertion as well as the need to simulate this damage in computational models in order to achieve a more accurate prediction of the mechanical competence of bone screws in human trabecular bone. Furthermore, the proposed modeling technique shows the potential to also accurately quantify, at the organ level, the mechanical competence of complex fracture fixation systems in human osteoporotic bone.

# Zusammenfassung

Unsere Knochen erfüllen tagtäglich lebenswichtige Aufgaben um grundlegende Körperfunktionen zu gewährleisten: Sie schützen unsere inneren Organe, produzieren rote Blutkörperchen, stellen ein Mineralienreservoir für den kontinuierlichen Ausgleich von Phosphat und Calcium zur Verfügung und sind zudem essentiell für die strukturelle Stabilität und die mechanische Funktion bei unzähligen Alltagsaktivitäten. Jedoch verlieren Knochen im Alter zunehmend ihre strukturelle Stabilität. Wir sprechen hierbei von Osteoporose, welche als systemische Knochenkrankheit definiert ist und sich durch eine verminderte Knochendichte und veränderte Mikroarchitektur äussert. Dies führt unvermeidlich zu einem erhöhten Frakturrisiko. Trotz der Fortschritte, welche in der Diagnose und in der pharmakologischen Behandlung von Osteoporose bisher gemacht wurden, ist die Prävalenz von Knochenbrüchen aufgrund der anhaltenden Alterszunahme immer noch steigend. Wenn osteoporotische Brüche auftreten, ist eine sofortige Behandlung zur Schmerzreduktion und zur Verhinderung einer längeren Immobilisationsdauer erforderlich. Das grundlegende Ziel einer Frakturfixierung ist eine sichere Primärstabilität zu gewährleisten, um das Risiko eines Implantatversagens und somit einer Revisionsoperation zu verringern. Im Zusammenhang mit Osteoporose ist die Frakturbehandlung zusätzlich erschwert, weil hierbei eine sichere und mechanisch stabile Schraubenfixierung wesentlich schwieriger zu erreichen ist als im gesunden Knochen. Aus diesem Grund sind die aktuellen Behandlungsmassnahmen suboptimal.

Um die Behandlung von osteoporotischen Knochenbrüchen zu verbessern, ist ein detaillierteres quantitatives Verständnis der Knochenstruktur in unmittelbarer Nähe des Implantates sowie deren Rolle im Zusammenhang mit der Implantatstabilität notwendig. Jedoch ist eine systematische mechanische *in vitro* Testung eines möglichst weiten Spektrums von menschlichen Knochenproben sehr kosten- und zeitintensiv. Ein computerbasiertes Verfahren namens Finite Elemente (FE) Modellierung stellt einen möglichen alternativen Lösungsansatz dar. Die meisten FE Studien, welche die mechanischen Eigenschaften von Knochen-Schrauben-Systemen untersuchen, modellieren den Knochen jedoch als ein Kontinuum mit homogenen Materialeigenschaften, währenddessen nur wenige Studien die anisotropische

Mikroarchitektur des Knochens berücksichtigen. Ein grosses Potential liegt hierbei in hochauflösenden FE Modellen, welche auf Mikrocomputertomographie ( $\mu$ CT) basieren. Diese sogenannte  $\mu$ FE Analyse ist eine rechenbasierte (*in silico*) Technik, welche für die Messung von Steifigkeit und Versagenskraft im trabekulären Knochen verifiziert und validiert wurde. Im Hinblick auf *in silico* Modelle von Schrauben im trabekulären Knochen liegt jedoch eine grosse Herausforderung in der Beschreibung des Implantat-Knochen-Überganges. Bis anhin wurde noch keine rechenbasierte Studie realisiert, welche die Mikroarchitektur und die komplexen mechanischen Eigenschaften am Schrauben-Knochen-Übergang realistisch simulieren kann. Folglich waren die Ziele dieser Dissertation, (i) eine bildgebende Methode zur Lokalisierung und Quantifizierung der durch Schraubensetzung verursachten Knochenläsionen zu entwickeln, (ii) die *in silico* Quantifizierung der Steifigkeit von Schrauben im trabekulären menschlichen Knochen zu verbessern und (iii) ein Machbarkeitsnachweis zur Entwicklung eines patientenspezifischen Computermodells auf Organebene zur Erfassung der Primärstabilität einer Frakturfixierung im osteoporotischen Humanknochen zu erbringen.

Für die erste Zielsetzung haben wir eine Methode entwickelt, welche Knochenläsionen nicht-invasiv und in allen drei Dimensionen entlang der ganzen Schraubenslänge lokalisiert und quantifiziert. Wir konnten zeigen, dass die trabekuläre Struktur durch die Schraubensetzung beeinträchtigt wird und Läsionen nur sehr nah ( $< 1.0$  mm) am Implantat entstehen. Des Weiteren konnten wir zeigen, dass grössere Schraubengewinde mehr Auswirkungen auf die Knochenstruktur haben als kleinere Schraubengewinde. Wir konnten klar aufzeigen, dass Knochenläsionen am Schrauben-Knochen-Übergang bereits während der Schraubensetzung entstehen. Aufgrund dessen vermuteten wir, dass die zu hohen Steifigkeitswerte in den klassischen FE Modellen darauf zurückzuführen sind, dass für deren Berechnung eine komplett intakte Knochenstruktur in Implantatnähe angenommen wurde. Wir empfehlen daher, unsere Erkenntnisse betreffend Knochenläsionen im osteoporotischen Knochen bei der Verbesserung der Implantatstabilität zukünftig zu berücksichtigen. Wir glauben, dass diese Methode ein vielversprechendes Verfahren ist, um die Auswirkungen der durch Schraubensetzung verursachten Knochenläsionen auf die Primärstabilität systematisch zu untersuchen.

Für die zweite Zielsetzung haben wir einen neuartige *in silico* Methode entwickelt um genaue Voraussagen über die Primärstabilität von Schrauben im trabekulären Knochen zu machen. Dazu haben wir ein patientenspezifisches Modell entwickelt, welches die Steifigkeit von Schrauben im menschlichen Knochen in uniaxialer Richtung (parallel zur Schraubenlängsachse) und vertikal dazu mit einer Genauigkeit von

12 % vorhersagen kann. Der Ansatz verwendet  $\mu$ FE Analyse in Kombination mit einer statistischen Modellrechnung, welche den E-Modul des zerstörten Knochens am Schrauben-Knochen-Übergang aufgrund des patientenspezifischen, mikrostrukturellen Knochenaufbaus berechnet. Wir konnten unsere Hypothese bestätigen, dass die Modellierung von Knochenablösung vom Implantat sowie die Modellierung von Knochenläsionen, welche durch die Schraubensetzung bedingt sind, es ermöglichen, eine grössere Genauigkeit in der Vorhersage der Primärstabilität von Knochen-Schrauben-Systemen zu erreichen. Es stellte sich heraus, dass die Schraubensetzung einen grösseren Einfluss hatte als die Ablösung des Knochens vom Implantat. Wir glauben, dass diese neue Methode weitere wichtige Erkenntnisse über die detaillierten Mechanismen der Primärstabilität im menschlichen Knochen liefern kann.

Für die dritte Zielsetzung erbrachten wir einen Machbarkeitsnachweis für ein patientenspezifisches Computermodell zur Quantifizierung der Primärstabilität eines komplexen Platten-Schrauben-Systems im osteoporotischen Humanknochen. Des Weiteren führten wir eine Methodik ein zur Validierung eines solchen  $\mu$ FE Modells mittels *in vitro* biomechanischer Tests kombiniert mit einem optischen Kamerasystem zur Bewegungserfassung, mit welchem Verschiebungen an verschiedenen Stellen der Knochenprobe gemessen werden können. Wir bestätigten die Hypothese, dass die Berücksichtigung der durch die Schraubensetzung verursachten Knochenläsionen die Genauigkeit der Vorhersage der Steifigkeit verbessert. Basierend auf dieser Machbarkeitsstudie kann nun das Vorhersagepotential dieser vorgestellten Methode mit weiteren Knochenproben evaluiert werden. Zusammengefasst zeigt diese Doktorarbeit, dass es essentiell ist die durch die Schraubensetzung verursachten Knochenläsionen in Computermodellen zu berücksichtigen. Dies ermöglicht eine höhere Genauigkeit in der Vorhersage des mechanischen Verhaltens von Schrauben im trabekulären Humanknochen. Des Weiteren zeigt der vorgestellte Modellansatz auch das Potential das mechanische Verhalten von komplexen Frakturfixierungen in osteoporotischen Knochen auf Organebene genau vorhersagen zu können.