

Towards the optimal stabilization of complex vertebral fractures

Doctoral Thesis

Author(s):

Koh, Ilsoo

Publication date:

2015

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010646605>

Rights / license:

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

DISS. ETH NO. 23238

TOWARDS THE OPTIMAL STABILIZATION OF COMPLEX VERTEBRAL FRACTURES

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Ilsoo Koh

MSc in Biomedical Engineering, The University of Auckland

Born on 20.12.1983

Citizen of New Zealand

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stephen Ferguson

Prof. Dr. Philippe Zysset

2015

Zusammenfassung

Die perkutane Vertebroplastie (VP) ist eine chirurgische Technik die angewendet wird, um Wirbelkörperfrakturen wieder instand zu setzen. Da die VP eine minimalinvasive Technik ist, kann sie als eigenständige Behandlungsmethode bei Berstungsbrüchen von Wirbelkörpern (VBF's) angewendet werden. Ausserdem kann die Entwicklung von neuen injizierbaren und osteokonduktiven keramischen Knochenzementen zu einer Zunahme dieser Behandlungsmethode bei jungen Patienten führen. Es sind jedoch Fälle dokumentiert, in denen mit VP behandelte VBF's hohe Zugspannungen und eine ungenügende mechanische Stabilisierung aufgezeigt haben, was die Eignung dieser Methode in Frage stellt. Ziel dieser Arbeit ist, die Anwendbarkeit und Wirksamkeit der VP als eigenständige Behandlungsmethode bei VBF's zu untersuchen. Der Fokus wird dabei auf die Anwendung von keramischen Zementen als Knochenersatzmaterial gesetzt.

Für diese Arbeit wurden Versuche mit den folgenden Zielsetzungen durchgeführt: 1) Ermittlung des Einflusses vom Wassergehalt auf die mechanischen Eigenschaften in keramischen Zementen; 2) Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von mit keramischen Zementen verstärkten trabekulären Knochenstrukturen (Keramik-Knochen Komposite) und 3) Ermittlung des Effekts von Faserverstärkungen auf die mechanischen Eigenschaften von keramischen Zementen. Um die mechanischen Eigenschaften von wasserlöslichen, unlöslichen und faserverstärkten Zementen zu ermitteln wurden Zug-, Druck- und Dreipunktbiegeversuche durchgeführt. Die klinischen Auswirkungen von VP auf VBF's wurden auch mittels Finite-Elemente-Methode (FE) analysiert. Für die FE Modelle wurden zwei patientenspezifische VBF's verwendet, welche virtuell mit variierenden Zementvolumina und Verteilungen verstärkt wurden. Für die Simulationen wurden mehrachsige Lastfälle verwendet.

Die in dieser Studie durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass der Wassergehalt einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der keramischen Zemente ausübt. Die Auswirkungen waren sowohl in den wasserlöslichen wie auch in den unlöslichen Zementen zu sehen und haben in erster Linie Zahl und Grösse der keramischen Kristalle und damit die mechanischen Eigenschaften der Zemente beeinflusst. Es zeigte sich weiterhin, dass die Keramik-Knochen Komposite eine höhere Sprödigkeit und bessere Druckeigenschaften besitzen als die Zemente allein. Die Zugspannungen der trabekulären Knochenstrukturen konnten mit den keramischen Zementen nur minimal verbessert werden. Auch Faserverstärkungen konnten die mechanischen Eigenschaften der Zemente nur minimal verbessern. Da der Fasergehalt relativ niedrig gehalten werden musste, um die

injizierbarkeit aufrechtzuerhalten, muss davon ausgegangen werden, dass dies der Grund für den geringen Verstärkungseffekt auf die Zemente war. Die FE Simulationen zeigen Verbesserungen von Steifigkeit und Stabilität der mit VP behandelten VBF's. Nichtsdestotrotz werden relativ grosse Teile der Knochen-, Zement- wie auch der Kompositstrukturen über die Streckgrenzen hinaus belastet. Dies weist darauf hin, dass die VP als alleinige Behandlungsmethode für VBF's nicht geeignet ist.

Die Resultate dieser Arbeit identifizieren folgende Gründe die eine VP als Behandlungsmethode für eine VBF in Frage stellen: 1) Die bisher verwendeten Testmethoden zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von keramischen Zementen sind nur bedingt für diese Anwendung geeignet; 2) Hohe Sprödigkeit von keramischen Zementen; 3) Keramische Zemente können die mechanischen Eigenschaften der trabekulären Knochenstrukturen nur minimal verbessern; 4) Es ist nicht möglich faserverstärkte Zemente mit einem ausreichend hohen Faseranteil zu injizieren und 5) Grosse Teile der Strukturen der mit VP behandelten VBF's werden überbelastet.

Es wird empfohlen Zementformulierungen, Wege zur Zementinjektion und Berechnungsmodelle weiter zu erforschen und zu verbessern. Mit den entsprechenden Verbesserungen kann die VP als alleinige Behandlungsmethode bei VBF's in Zukunft erfolgreich angewendet werden.

Abstract

Percutaneous vertebroplasty (VP) is a surgical technique used to augment fractured vertebrae by injection of bone cement. The minimal invasiveness of VP makes it attractive as a potential stand-alone treatment for stable vertebral burst fractures (VBFs). Moreover, the development of injectable and osteoconductive ceramic cements may likely lead to an outgrowth of the technique as a treatment for VBFs in young patients. However, inadequate mechanical stabilization and the development of large tensile stresses in the cemented regions of VP treated VBFs raise questions about its suitability. Therefore, the aim of this thesis was to investigate the efficacy of VP as a stand-alone treatment for VBFs, with a focus on the use of ceramic cements as a stabilizing material.

The experiments conducted during this thesis were designed to determine the effect of water saturation on the mechanical properties of ceramic cements, the mechanical properties of trabecular bone augmented using a ceramic cement (ceramic-bone composites) and the effect of a novel fiber reinforcement on the mechanical properties of ceramic cement. Compression, three-point bending and direct tension tests were performed on soluble, insoluble and fiber reinforced ceramic cements to obtain their mechanical properties. The clinical implications of VP treated VBFs were further investigated using finite element (FE) analysis. The FE models comprised two VBFs virtually injected with various cement volumes and distributions. The model response to multi-axial load cases was studied.

It was determined, via the results generated experimentally during this study, that the mechanical properties of ceramic cements are altered significantly following water saturation. The alterations to the mechanical properties were observed in both soluble and insoluble materials due to the changes in the number and sizes of ceramic crystals. It was also found that the ceramic-bone composites were brittle, and had superior compressive properties to the native trabecular bone, but inferior to the native ceramic cement. The tensile properties of the trabecular bone showed minimal improvements with ceramic cement augmentation. Furthermore, fiber reinforcement was shown to have minimum impact on the mechanical properties of ceramic cement. It was proposed that the fiber content, limited by the injectability of the cement into the trabecular bone, was inadequate to obtain positive results. Finally, the results of the FE simulations showed improvements in the stiffness and stability of VP treated VBFs. However, substantially large volumes of the trabecular bone, ceramic cement and composite regions were found to deform beyond the theoretical yield point, implying adverse effects of VP as a stand-alone treatment for VBFs.

In conclusion, the results obtained in this thesis have identified the drawbacks of using VP and ceramic cement as a treatment for VBFs. Inappropriate testing protocols for the determination of the mechanical properties of ceramic cements, brittleness of ceramic cement, inadequate improvements in the mechanical properties of trabecular bone with ceramic cement augmentation, inability to inject fiber reinforced ceramic cement with a sufficient fiber content, and large volumes exceeding theoretical yield in VP treated VBFs remain as challenges that restrict the development and applicability of VP as a stand-alone treatment for VBFs. Further researches into ceramic cement formulation, injection strategies, and pre-clinical evaluation with computational models are suggested to advance the application of VP as a stand-alone treatment for VBFs.