

## Oponentní posudek disertační práce

<b>Název práce:</b>	<b>Studie biomechanické interakce dentálního implantátu a kosti s využitím výpočtového modelování</b>
<b>Autorka práce:</b>	<b>Ing. Barbora Thomková</b> Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
<b>Studijní program:</b>	Inženýrská mechanika
<b>Školitel:</b>	Ing. Petr Marcián, Ph.D. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
<b>Oponent:</b>	doc. Ing. Tomáš Suchý, Ph.D. Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze

### ***I. Shrnutí významu a aktuálnosti tématu práce***

Disertační práce Ing. Barbory Thomkové se zabývá mechanickou interakcí implantátu s kostní tkání dolní čelisti. Jde o jeden z klíčových faktorů úspěšnosti implantologické léčby. Aktuálnost práce spočívá především v detailním zkoumání několika faktorů, které přímo ovlivňují dlouhodobou stabilitu implantátu a proces oseointegrace. Práce využívá metodu konečných prvků a zahrnuje zhodnocení vlivu klinických odchylek a postupů při zavádění implantátu, jako natočení a hloubka, nebo chirurgických úprav alveolárního výběžku. Práce zkoumá vliv úrovně rozlišení CT a mikro-CT dat, zvláště prahové hodnoty segmentace, které zásadně ovlivňují výsledné deformačně-napěťové stavy a pro zpracování obrazových dat jsou zcela zásadní.

### ***II. Posouzení zvolené metodiky a provedení výzkumu***

Zvolená metodika je vzhledem k cíli práce adekvátní a vhodná. Nesporně kladnou stránkou práce je vysoce detailní a komplexní provedení výzkumu, který zahrnuje širokou škálu variant a citlivostních analýz. Práce analyzuje jak segment dolní čelisti, tak model celé dolní čelisti, a to pro detailní mikro-CT analýzu nebo simulaci klinických dat. Při využití mikro-CT dat, která zachycují trámčitou strukturu kostní tkáně na různých úrovních rozlišení, představují tyto údaje klíčové parametry pro analýzu v periimplantační oblasti. Kromě homogenních izotropních materiálových modelů práce zkoumá i aktuálně využívané heterogenní modely, kde jsou materiálové parametry stanoveny na základě lokální hustoty kostní tkáně. V případě citlivostní analýzy klíčových parametrů byla provedena kritická analýza vlivu volby rozlišení a prahové hodnoty segmentace, volby rozsahu VOI (různé průměry a výšky) a parametrů modelu materiálu v podobě různých úrovní mineralizace. Na modelu dolní čelisti byl sledován vliv polohy, natočení a aplikovaného zatížení na deformačně napěťové stavy, dále pak vliv hloubky zavedení a vliv zřezání kosti, spolu s vlivem aplikované síly. V segmentovaných modelech bylo aplikováno jednoduché statické axiální zatížení. Tento konzervativnější přístup autorka v práci zdůvodňuje a komentuje. V modelech celé čelisti byly použity síly od žvýkacích svalů převzaté z literatury, skus byl simulován podporou v axiálním směru v místě implantátu. Modelováno bylo plné oseointegrační spojení mezi implantátem (Brånemark® System Mk III Groovy) a kostí a byla provedena i analýza vlivu vyšších sil. Metodická část práce je po formální stránce velmi podrobná, logicky strukturovaná a přehledná. Jako statistický postup pro identifikaci významných skupin byla použita hierarchická shluková analýza, resp. dendrogram. Účelné by mohlo být využití jiných statistických metod nebo dalších průzkumových technik vícerozměrného škálování, kterými by bylo možné porovnat celkovou variabilitu různých parametrů a posoudit, které postupy poskytují například nejkonzistentnější výsledky. Obecně tedy přidat možná doporučení.

### ***III. Posouzení výsledků a jejich interpretace***

Interpretace výsledků je založena především na klasické Frostově teorii mechanostatu, která umožňuje posoudit, v jakých intervalech přetvoření je kostní tkáň namáhána. To poskytuje kvalifikovaný pohled na

rizika remodelace kosti. Obecně binarizace, redukce šumu, zvýšení kontrastu nebo definování VOI jsou klíčové kroky při zpracování obrazových mikro-CT dat, které mohou významně ovlivnit výsledky jejich kvantifikace. Výsledky práce prokázaly zásadní vliv rozlišení a segmentace. Ukazují na konkrétní omezení vyplývající z použití různých rozlišení, nabízí také možné kompenzace (např. změna prahu při použití horšího rozlišení) na základě provedené shlukové analýzy. Práce dále ilustruje vliv modelu materiálu na rozložení namáhání, zejména s ohledem na stupeň mineralizace kostní tkáně a s ohledem na použití modelu zahrnujícího lokální změnu hustoty nebo modelu s oddělenou spongiózní a kortikální tkání. V případě klinických faktorů, výsledky ukazují, že poloha dentálního implantátu významně ovlivňuje namáhání okolní kostní tkáně, zatímco natočení má zásadní vliv pouze na maximální hodnoty napětí na samotném implantátu. Hlubší zavádění mění rozložení namáhání, způsobuje nárůst namáhané spongiózní tkáně a může zvýšit napětí na implantátu. Podobně alveoloplastika zvyšuje hodnoty napětí na implantátu a hrozí patologickým přetěžováním kostní tkáně. Z pohledů stanovených cílů lze konstatovat, že byly splněny. Z přehledu publikací autorky je zřejmé, že dílčí výsledky disertační práce prezentovala na významných mezinárodních i tuzemských konferencích. Část věnovaná biomechanické analýze implantátů uložených v různých klinických situacích byla publikována v prestižním recenzovaném odborném časopise *The Journal of Prosthetic Dentistry*.

Výsledky jsou v práci zpracovány velmi pečlivě a přehledně, dovolím si zde uvést jen poznámku, nebo spíše můj dojem z interpretace některých z nich. V některých částech práce (např. 11.1.1, Obr. 65) se zdá, že zjištěné rozdíly jsou interpretovány dvojím způsobem. Autorka píše, že při zmenšování průměru VOI roste množství tkáně v I5 a klesá v I1 (to ale neplatí pro 4 mm) - zde jde o změny v jednotkách procent a jsou popisovány jako nárůst nebo pokles. Dále v textu, u variant VOI s průměrem 7 a 8 mm (str. 81 dole) jsou rozdíly mezi intervaly komentovány jako „v jednotkách procent“ (už nejde o pokles nebo nárůst). Z toho se zdá, že stejné rozdíly v jednotkách procent jsou interpretovány nekonzistentně, tedy buď jako změna, nebo jako nevýznamné. Podobně hodnoty uvedené v Tab. 23 (str. 101) jsou interpretovány tak, že z hlediska natočení implantátu výsledky neukazují významné rozdíly mezi jednotlivými variantami. To ale neplatí pro kortikální kost, např. v I2 A-5: 7,21%; A0: 13,53%; A+5: 32,51%. Více než čtyřnásobný rozdíl v tomto intervalu mezi natočením o  $-5^\circ$  a  $+5^\circ$  je tedy interpretován jako nevýznamný. Obdobně pro kortikálu rozdíl D-5 a D+5 v I5 ukazuje dokonce na téměř devítinásobný pokles z 3,38% (D-5) na 0,38% (D+5). Z pohledu v práci uvedeného vyhodnocení vlivu různých poloh implantace (A-D), kde je (na str. 100) komentována změna největšího objemu zatěžovaného v I4 (poloha A) a I2 (poloha D), by bylo možné i změnu natočení komentovat obdobně, tedy tak že největší procento kortikální kosti je namáhané v oblasti I4 pro natočení A-5 a A0, naopak v případě zavedení s natočením  $+5^\circ$  (A+5) je největší procento kortikální kosti zatěžované v oblasti I2. Přesto je zde v práci vliv natočení komentován jako nevýznamný. Možná jde jen o mé nepochopení zvoleného přístupu k hodnocení potenciálních změn.

#### **IV. Hodnocení formální stránky práce**

Předložená disertační práce dosahuje velmi vysoké formální a jazykové úrovně. Je členěna systematicky a obsahuje veškeré náležitosti, včetně seznamů symbolů, zkratk, ilustrací, tabulek, použité literatury i vlastních vědeckých výstupů autorky. Práce se opírá o mimořádně rozsáhlý soubor odborných publikací. Grafické zpracování práce je mimořádně zdařilé a přispívá k její přehlednosti a srozumitelnosti. Práci se nedá mnoho vytknout, přesto si dovolím jen pár drobných poznámek. Vliv volby studovaných parametrů na relativní podíl kostní tkáně v jednotlivých intervalech dle Frosta je v práci uváděn formou tabulek. Snazší interpretaci by dle mého názoru prospělo i grafické znázornění, například spojnicovými grafy podobně jako je autorka uvádí v jejím článku v *The Journal of Prosthetic Dentistry* (Obr. 9 pro varianty A-D). Tabulky s procentními podíly kostní tkáně zastoupených v jednotlivých intervalech I1-I6 obsahují také škálu v odstínech šedi, která má zpřehlednit vyšší a nižší hodnoty. Použitou škálu by bylo vhodné vysvětlit. V části věnované metodě supersamplingu (7.1.1) by bylo vhodné jen stručně popsat její princip a způsob aplikace. V případě shlukové analýzy by bylo vhodné popsat použitý postup v metodické části, včetně výběru stanovení míry podobnosti mezi objekty (v práci je využita euklidovská vzdálenost), jakou vazební metodou bylo provedeno shlukování nebo jak bylo stanoveno vzdálenostní kritérium, případně jaký byl použit software. Některé citace literárních zdrojů nejsou uváděny jednotným citačním stylem. A jen okrajově, část 3.1.1 věnovaná mechanostatu může na čtenáře působit tak, že mezní hodnoty MES byly stanoveny pouze na

základě v práci uvedených studií. Obecnému vztahu mechaniky a fyziologie kosti se ale věnovala opravdu početná skupina autorů, významná je i československá stopa.

#### **V. Stručné vyjádření k předloženým tezím**

Součástí posudku má být i krátké vyjádření k předloženým tezím. Ty jsou stručným výtahem předkládané disertační práce, věcně a přehledně seznamují se současným stavem v práci řešené problematiky, s cíli práce, se zvolenou metodikou a s hlavními výsledky, které v závěru stručně shrnují. Spolu se seznamem použité literatury a životopisem autorky tak obsahují vše potřebné. Pouze bych někde doporučil text v místech s popisky obrázků a tabulek přehledněji formátovat vložením mezer. V případě, že teze v souvislosti se zestručněním neobsahují konkrétní výsledky, které jsou ale v textu komentovány (např. vliv natočení implantátu v kap. 7.2), tak bych doporučil tuto skutečnost doplnit odpovídajícím komentářem.

#### **VI. Otázky oponenta**

1. V tabulce na Obr. 65 se podíl kostní tkáně v intervalu I5 zvýší z 0,98% (VOI s průměrem 8 mm) na 2,77% (4 mm). Je tento téměř trojnásobný nárůst významný?
2. Mohla byste, prosím, stručně okomentovat Vaší interpretaci výsledků vlivu natočení implantátu z kapitoly 12.1 kterou zmiňuji výše v posudku?
3. Zvolené materiálové parametry mohou výrazně ovlivnit rozložení napětí v kostní tkáni. Jaký by mohl být přínos méně častěji používaného ortotropního materiálového modelu?
4. Lze na základě Vámi získaných poznatků učinit nějaká obecná doporučení ve smyslu volby parametrů mikro-CT metody a následného zpracování obrazových dat pro tvorbu výpočtového modelu?

#### **VII. Závěrečné shrnutí**

Závěrem konstatuji, že předložená **disertační práce splnila stanovené cíle a vykazuje znaky kvalitní vědecké práce**. Předloženou **disertační práci doporučuji k obhajobě** a po jejím úspěšném provedení, udělení titulu doktor vyznačovaného zkratkou Ph.D. užívanou za jménem tak, jak stanoví Zákon č. 111/1998 Sb.

Ů Praze 3. 11. 2025

doc. Ing. Tomáš Suchý, Ph.D.

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky  
Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze