

**Polymetylmetakrylátem augmentovaná přímá
přední osteosyntéza zlomeniny typu II dentu
druhého krčního obratle se sníženou kostní denzitou
- biomechanická kadaverózní studie**

MUDr. Petr Řehoušek

Autoreferát disertační práce

Oborová rada experimentální chirurgie

Univerzita Karlova v Praze

Ortopedicko-traumatologická klinika 3. LF UK a FNKV

Praha, Česká republika

2020

Polymetylmetakrylátem augmentovaná přímá přední osteosyntéza zlomeniny typu II dentu druhého krčního obratle se sníženou kostní denzitou - biomechanická kadaverózní studie

MUDr. Petr Řehoušek

2020

Doktorské studijní programy v biomedicině

Disertační práce byla vypracována na Ortopedicko-traumatologické klinice 3. Lékařské fakulty Univerzity Karlovy a FNKV v Praze v letech 2012-2020

Autor: MUDr. Petr Řehoušek
Adresa: Ortopedicko-traumatologická klinika 3. LF UK a FNKV
Šrobárova 50, 100 34, Praha 10
Studijní program: Experimentální chirurgie
Školitel: doc. MUDr. Jiří Skála Rosenbaum, Ph.D.
Oponenti:

Autoreferát byl rozeslán dne:

Obhajoba disertace dne **v** **hod.**

Místo obhajoby:

S disertací je možno se seznámit na děkanátu 3. LF UK, Ruská 87, Praha 10

Předseda oborové rady:

prof. MUDr. Zdeněk Krška, DrSc.

1 OBSAH

1	OBSAH	3
2	SOUHRN	4
3	SUMMARY	6
4	ÚVOD	7
5	HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE	8
6	MATERIÁL A METODIKA	8
7	VÝSLEDKY	12
8	DISKUZE	17
9	ZÁVĚRY	25
10	LITERATURA	26
11	PUBLIKACE	29

2 SOUHRN

Zlomeniny dentu druhého krčního obratle jsou nejčastějšími poraněními v oblasti krční páteře u starší populace. Přímá přední fixace zlomeniny typu II dentu C2 zajišťuje dostatečnou stabilitu bez omezení funkčnosti a zlepšuje přežití u těchto pacientů, ovšem často zde dochází k selhání fixace v důsledku uvolnění implantátu.

Cílem naší studie bylo posoudit, zda cementem augmentovaná přední fixace zlomeniny typu II dentu C2 standardním šroubem poskytne biomechanicky pevnější zajištění implantátu u tohoto typu zlomeniny v porovnání s neaugmentovanou fixací. V druhé části práce jsme se zaměřili na kvalitu a množství cementu nutného k zajištění fixace.

Dvacet kadaverózních vzorků obratle C2 bylo získáno od zemřelých dárců ze starší populace (prům. věk 83 let). Zlomenina typu II dle Anderson D'Alonzovy klasifikace byla uměle vytvořena pomocí oscilační pily a následně byla pod rentgenovým zesilovačem provedena fixace standardním tahovým šroubem. Vzorky obratlů byly rozděleny do dvou skupin po deseti tak, aby byly věkově a genderově vyvážené. Pomocí Jamshidiho jehly jsme 10 vzorků obratlů augmentovali vysokoviskózním polymetylmakrylátem v oblasti baze obratle C2. Druhá skupina vzorků zůstala bez augmentace. Impaktor ve tvaru V byl použit při biomechanickém zatížení dentu C2 v předozadním směru až do doby selhání fixace. Moment selhání byl stanoven při vylomení šroubu z přední části těla obratle nebo při 5 % poklesu aplikované síly. Střední hodnoty síly potřebné k selhání a hodnoty pevnosti byly zaznamenány a propočítány.

Střední hodnota mezní síly potřebné k selhání implantátu byla pro cementovanou skupinu 352 ± 12 N v porovnání 168 ± 23 N pro necementovanou skupinu. Rozdíl vykazoval statistickou významnost ($p < 0,001$). Střední hodnota tuhosti necementované skupiny byla 153 ± 19 N/mm v porovnání s 195 ± 29 pro cementovanou skupinu. Tento rozdíl byl rovněž statisticky signifikantní ($p < 0,001$). V druhé části práce jsme využili metodu konečných prvků při posouzení množství a kvality cementu na vliv pevnosti fixace.

Polymetylmakrylátem augmentovaná standardní přední fixace šroubem u zlomeniny dentu typu II obratle C2 u starších pacientů významně zvyšuje pevnost implantátu při zatížení v předozadním směru v porovnání s neaugmentovanou fixací a zabraňuje tak selhání fixace. Druhá část naší práce prokázala, že homogenní cement příznivě ovlivňuje pevnost implantátu

při augmentované fixaci v in vitro podmínkách. Naše měření vedlo ke zjištění, že i malé množství homogenního cementu bylo dostatečné k zajištění potřebné pevnosti, srovnatelné se stavem před vlastní zlomeninou. U druhého krčního obratle se toto množství pohybuje v rozmezí 0,7-1,2 ml polymethylmetakrylátu.

3 SUMMARY

Odontoid peg fractures are the most common injuries of the cervical spine in the elderly. Anterior screw stabilisation of type 2 odontoid peg fractures improves survival and function in these patients but may be complicated by failure of fixation.

The purpose of our study was to determine whether cement augmentation of a standard anterior screw provides biomechanically superior fixation of type II odontoid fractures in comparison to a non-cemented standard screw. In the second part of the study the aim was focused the role of bone cement amount and its quality to the stiffness of odontoid and vertebrae body junction.

Twenty human cadaveric C2 vertebrae from elderly donors (mean age 83 years) were obtained. Anderson and D'Alonzo type II odontoid fracture was created by transverse osteotomy and fluoroscopy guided anterior screw fixation was performed. The specimens were divided into two matched groups. The cemented group (n=10) had radiopaque high viscosity polymethylmethacrylate cement injected via Jamshidi needle into the base of the odontoid peg. The other group was not augmented. A V-shaped punch was used for loading the odontoid in an antero-posterior direction until failure. The failure state was defined as screw cut-out or 5% force decrease. Mean failure load and bending stiffness were calculated.

The mean failure load for the cemented group was 352 ± 12 N compared to 168 ± 23 N for the non-cemented group ($P < 0.001$). The mean initial stiffness of the non-cemented group was 153 ± 19 N/mm compared with 195 ± 29 N/mm for the cemented group ($P < 0.001$). Finite-element method was used to achieve different scenarios of cement augmentation in the second part of the study.

Cement augmentation of an anterior standard screw fixation of Type II odontoid peg fractures in elderly patients significantly increased load to failure under anterior posterior load in comparison to non-augmented fixation. This may be a valuable technique to reduce failure of fixation. Our second study has shown that the low porous cement was able to significantly influence the stiffness of the augmented odontoid fixation in vitro. Our results suggest that only a small amount of non-porous cement is needed to restore stiffness at least to its pre-fracture level and this can be achieved with the injection of 0.7-1.2 ml of cement.

4 ÚVOD

Zlomenina dentu druhého krčního obratle (C2) je vzhledem k anatomické lokalizaci a riziku závažných a život ohrožujících komplikací, nestabilnímu charakteru většiny poranění s rizikem vzniku pakloubu, obecně indikována k operačnímu řešení. Podle charakteru zlomeniny a kvality kosti volíme mezi přední přímou osteosyntézou dentu C2 a zadní instrumentací ev. s fúzí mezi prvním (C1) a druhým krčním obratlem.

Přední výkon, tedy přímá osteosyntéza dentu C2, představuje pro pacienta méně zatěžující výkon ve srovnání se zadní fúzní technikou C1-C2, a současně zajišťuje zachování pohyblivosti v oblasti horní krční páteře.

U starších pacientů s osteoporózou a sníženou kvalitou kostní tkáně je nicméně přímá osteosyntéza dentu C2 často spojena se selháním osteosyntézy, pakloubem a bolestmi. Proto musíme u geriatrických pacientů ve většině případů přistoupit k zadnímu výkonu. Alternativou by u pacientů se sníženou kostní denzitou mohla být možnost bezpečně provést přímou přední osteosyntézu s využitím standardního implantátu doplněnou augmentací obratlového těla a dentu polymetylmetakrylátem /PMMA/. Doposud byla v literatuře publikována pouze klinická sledování u těchto pacientů. Tento princip augmentace je běžně používaný jak v obecné traumatologii (augmentované krčkové šrouby a čepele u zlomenin proximálního femuru), tak ve spondylochirurgii (vertebroplastika hrudní a bederní páteře, použití kanylovaných šroubů s možností augmentace).

Cílem práce bylo posoudit, zda polymetylmetakrylátem augmentovaná fixace zlomeniny dentu C2 II. typu s využitím standardního, v praxi již používaného imlantátu vykazuje lepší biomechanické vlastnosti v porovnání s neaugmentovanou formou fixace. Pozorování bylo prováděno na kadaverózním materiálu C2 obratle se sníženou kostní denzitou a na počítačovém modelu metodou končených prvků.

5 HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE

- zhodnocení vlivu augmentace přední fixace dentu C2 na biomechanické vlastnosti při zatížení
- posouzení kvality a množství polymetylmetakrylátu nutné k dostatečné stabilizaci a fixaci implantátu

6 MATERIÁL A METODIKA

Ve spolupráci s Ústavem soudního lékařství 3. LF UK a FNKV v Praze jsme v souladu se směrnicemi Etické komise 3. LF UK získali pro účely experimentu 20 vzorků obratle C2 od zemřelých dárců. Kadaverózní vzorky obratlů C2 byly vybrány podle předem stanovených inkluzních kritérií, mezi které patřil zejména věk zemřelých nad 70 let. Mezi exkluzní kritéria patřily anamnéza onkologického onemocnění, kostní metabolická choroba a úraz krční páteře v anamnéze donora. Vlastní odběr byl proveden v rozmezí 48-72 hodin po úmrtí dárce, abychom předešli znehodnocení biologického materiálu postupujícími rozkladnými procesy.

Vzorky obratlů jsme označili a rozdělili do 2 skupin tak, aby byly genderově a věkově vyvážené. Průměrný věk celého souboru byl 83 let (72-93), ve skupině určené k augmentaci byl průměrný věk 83,2 let (72-93), ve skupině bez augmentace 82,7 let (75-93). Zastoupení mužů a žen v obou skupinách bylo srovnatelné.

Kvalita kostní denzity každého jednotlivého obratle byla stanovena na základě CT vyšetření (CT) Somaton Definition AS (Siemens, Germany). Nastavení technických parametrů CT bylo následující: 120kV, 267 mA, tloušťka jednotlivých řezů byla 1mm. Analýza byla následně provedena pomocí využití x Vision View (Vidis s.r.o.). Oblast centra baze obratle C2 skrz kterou je zaváděn implantát byla zobrazena na axiálních skenech. Obratel byl virtuálně rozdělen na dvě části: tělo obratle a zub obratle C2 (*dens axis*). Denzita centrální části byla poté vypočítána jako průměrná hodnota v rozsahu těchto dvou sledovaných částí obratle a zaznamenána v CT Hounsfieldových jednotkách (HU).

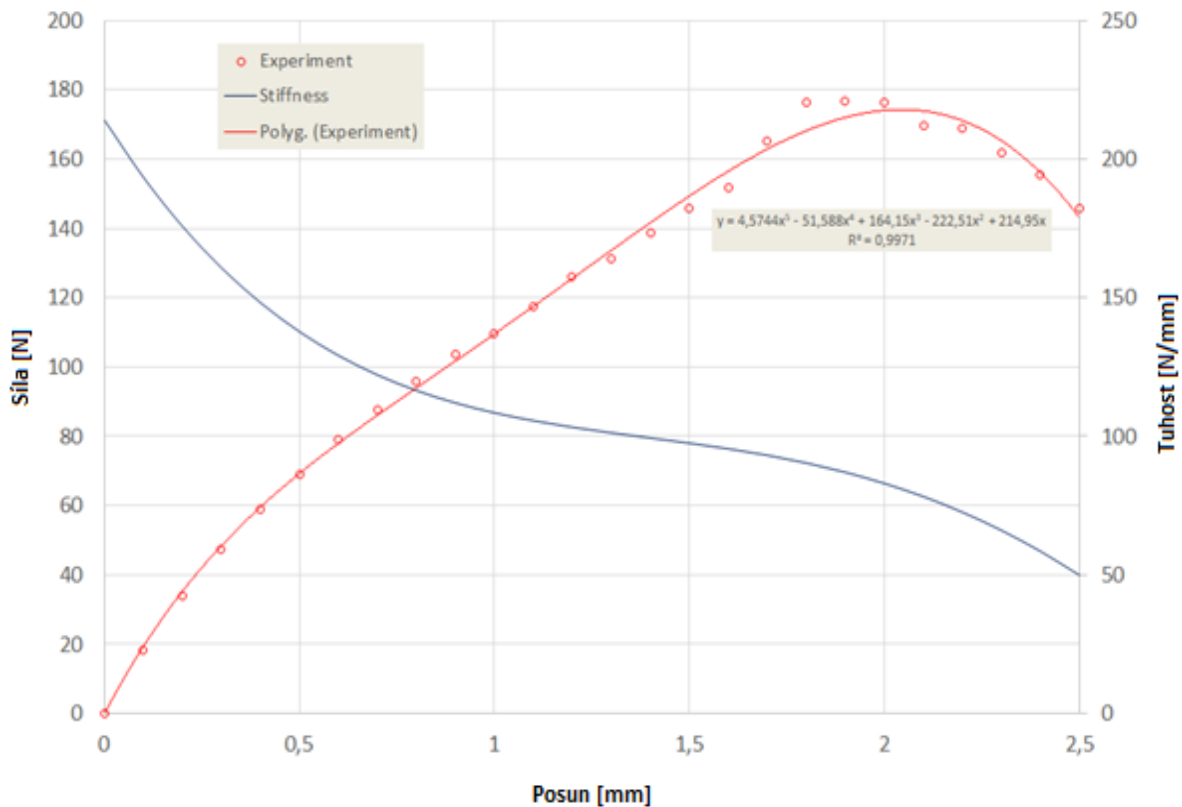
Pro umělé vytvoření II. typu fraktury dentu dle Anderson-D'Alonzovy klasifikace na získaných obratlech z lidských kadaverů jsme použili oscilační kostní pilu. Řez jsme vedli transversálně tak, abychom co nejděleji simulovali právě II. typ fraktury dentu. Zároveň jsme se snažili vyvarovat poškození okolních částí obratlového těla. Poté jsme pod rentgenovým zesilovačem zavedli Kirschnerův drát osově v obou projekcích tak, aby hrot drátu perforoval vrchol dentu. Vstupní otvor byl umístěn ve středu ventrální hrany baze těla C2. Dále následovalo měření potřebné délky šroubu. Délka jednotlivých implantátů tak závisela na velikosti obratle. Následně jsme provedli fixaci arteficiálně vytvořené zlomeniny standardním samořezným kanylovaným tahovým šroubem o průměru 3,5 mm se závitem o délce 12 mm (Dens Access System, De Puy Synthes, Leeds, UK). V klinické praxi je tento implantát využíván právě v indikaci fixace zlomenin dentu C2 II. typu a je nazýván „šroubem na dens“. Pro dosažení dostatečné komprese, je potřeba perforovat apikální kortex dentu a fixovat šroub s bikortikálním zajištěním.

Poté jsme u deseti randomizovaných vzorků při bazi obratle zavedli konvergentně ke šroubu dvě 18G Jamshidiho jehly, pomocí nichž jsme aplikovali vysoko viskózní polymetylmakrylát (PMMA) (Vertecem, DePuy Synthes). Objem aplikovaného PMMA byl v průměru 1ml (v rozmezí 0,7-1,2 ml) v závislosti na velikosti obratlového těla, resp. objemu baze C2. Výplň jsme sledovali pod skiaskopickou kontrolou na monitoru v biplanární projekci. Dalším indikátorem pro dostatečnou výplň byla extravazace PMMA kolem vstupu jehel a z otvorů nutričních arterií kompaktní kosti obratle.

Skupiny vzorků jsme v oblasti zadního oblouku obratle zafixovali do bločku polymetylmakrylátu. Tlakový test byl proveden pomocí dvousloupcového testovacího přístroje, TIRAtest3 (Tira GmbH, SChalkau, Germany). V předozadním směru pod úhlem 90 stupňů jsme na oblast výběžku obratle C2 aplikovali kontinuální mechanickou sílu pomocí zatěžovacího tělesa ve tvaru V do té doby, než došlo buď k vylomení šroubu z baze obratle C2 nebo k významnému poklesu tuhosti zaznamenané na zatěžovacím grafu. Mechanismus selhání byl kontrolován přímo vizuálně a pomocí získaných hodnot na přístroji.

Závislosti síly a posunutí byly aproximovány polynomy pátého řádu s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0,97 - 0,99$. Následně byla spočítána tuhost, jako první derivace těchto polynomů, přičemž počáteční tuhost odpovídá první numerické hodnotě této funkce. První změna tuhosti závislosti byla porovnána s vizuálním záznamem a na základě tohoto spojení byla určena síla potřebná pro poškození tohoto spoje. Data byla analyzována využitím

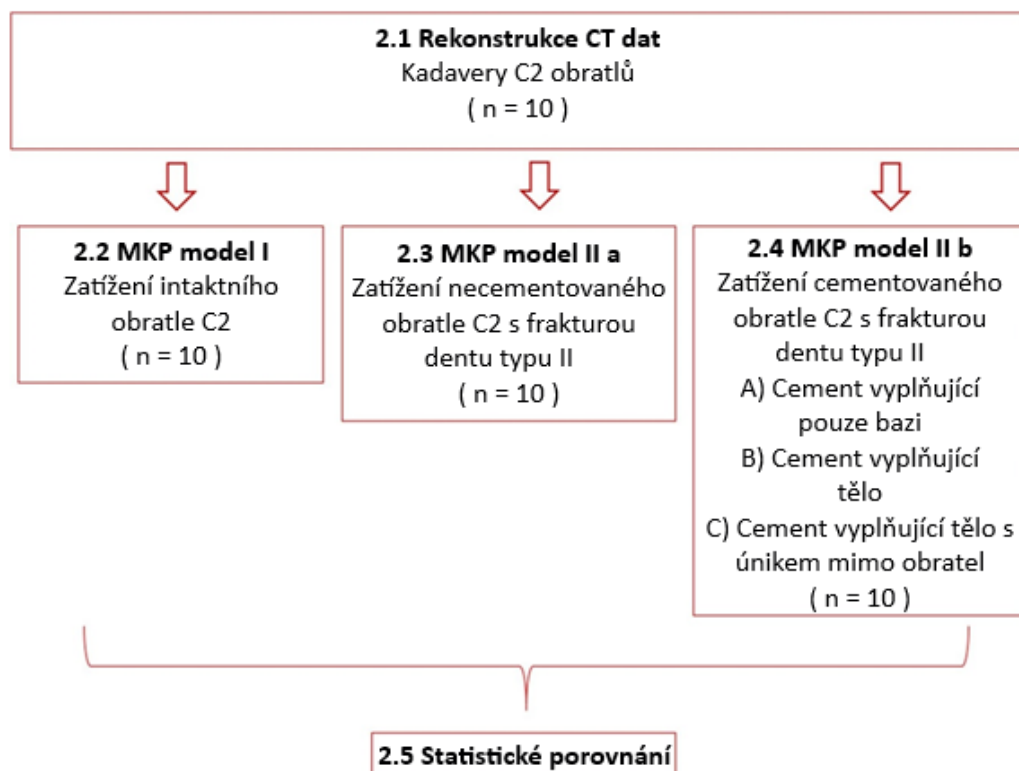
softwaru SPSS verze 21 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Statistická významnost porovnávaných stejně velikých skupin byla provedena Welchovým t-testem, neboť obě skupiny vykazovaly normální rozložení výsledků. Hladina významnosti byla stanovena na $p < 0,05$ (obr. 1).



Obr. 1 Křivka závislosti síly a posunutí, která má obdobný tvar v obou skupinách (cementovaných a necementovaných). První změna závislosti tuhostí byla porovnána s vizuálním záznamem a tím byla určena síla potřebná k posunu. Tuhost pak byla propočítána na základě získaných údajů.

V druhé části práce jsme využili metodu konečných prvků (MKP) jako standardizovaný nástroj v biomechanickém měření.

Obecný přehled našeho experimentálního postupu a hodnocení je znázorněn na schématu (obr. 2). V našem experimentu jsme použili data z vyšetření pomocí počítačové tomografie (CT) vzorků kadaverů druhého krčního obratle získaná v předchozím experimentu.



Obr. 2 Schéma pracovního postupu při experimentu a hodnocení výsledků

Konečně-prvkový (MKP) model byl vytvořen v programu MSC 2016.0 (MSC Software, Czech Republic). Materiálové vlastnosti kostního cementu a titanové slitiny byly stanoveny na základě pomocných experimentů a zkušeností v laboratoři katedry technologií a struktur při Technické univerzitě v Liberci a přiřazeny dle tabulky 1. Pro prokázání vlivu kvality cementu byly zvoleny dva základní typy: homogenní a porózní. Konečně-prvkové modely byly zatíženy a počáteční tuhost byla propočítána dle naší předchozí práce. Výsledná data byla zpracována v programu QC-Expert (Trilobit s.r.o., Czech Republic). Statistická významnost porovnávaných stejně velikých skupin byla provedena Welchovým t-testem, neboť obě skupiny vykazují normální rozložení výsledků. Hladina významnosti byla stanovena na $p < 0,05$.

Materiál	Youngův modul [MPa]	Poissonův poměr [-]
<i>Kostní cement – homogenní</i>	3000	0,3
<i>Kostní cement - porózní</i>	500	0,3
Ti6Al4V	117000	0,38

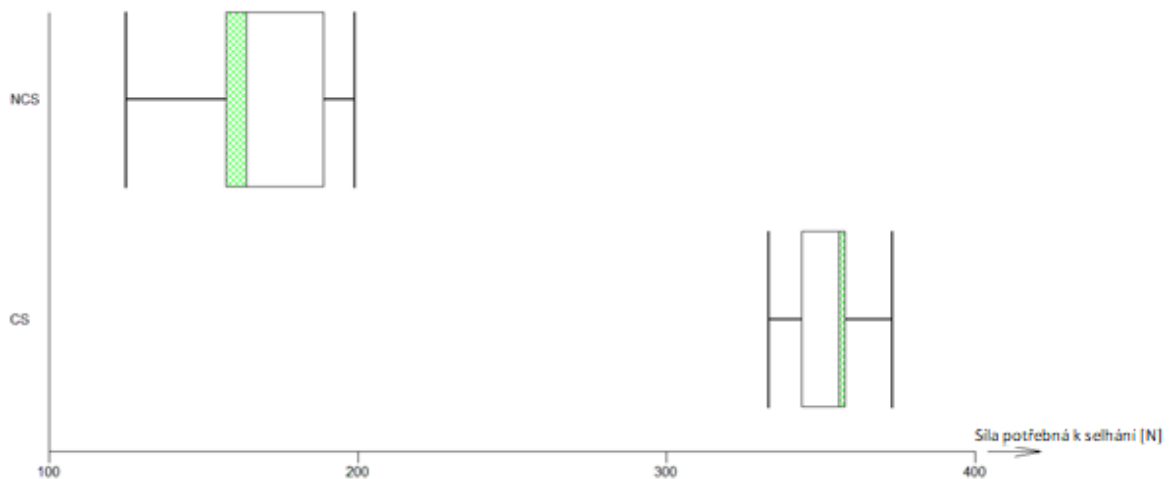
Tab. 1 Hodnoty parametrů materiálových modelů (elastický isotropní)

7 VÝSLEDKY

Polymetylmetakrylátem augmentovaná přímá přední osteosyntéza zlomeniny typu II dentu druhého krčního obratle se sníženou kostní densitou

Obě vybrané testované skupiny nevykazovaly stran věku statistickou rozdílnost ($p = 0,33$). Obě pohlaví byly zastoupeny v obou skupinách rovnoměrně. Srovnatelného výsledku bylo dosaženo i v případě hustoty zkoušených vzorků ($p = 0,34$). Střední hodnota hustoty kostní tkáně v těle obratle byla pro necementovanou skupinu (NCS) 89 ± 6 HU a 88 ± 8 HU pro cementovanou (CS) skupinu vzorků. Střední hodnota hustoty kostní tkáně v odontoidu byla pro NCS skupinu 438 ± 11 HU a 436 ± 24 HU pro CS skupinu vzorků.

Ve všech případech cementované skupiny (CS) kostní cement zcela vyplnil prostory osteoporotické kostní tkáně. Střední hodnota mezní síly potřebné k selhání implantátu byla pro skupinu CS 352 ± 12 N v porovnání 168 ± 23 N pro NCS skupinu (obr. 3). Rozdíl vykazoval statistickou významnost ($p < 0,001$).

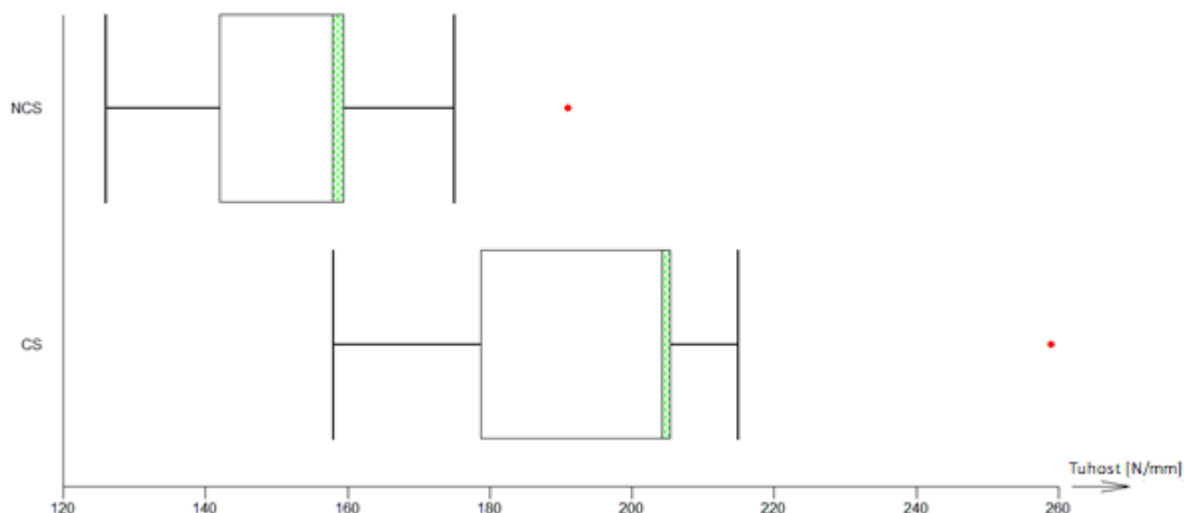


Obr. 3 Graf síly potřebné k selhání spojení implantát - obratel u cementované (CS) a necementované (NCS) skupiny. Cementovaná skupina vykazovala signifikantně vyšší hodnoty síly potřebné k selhání tohoto spojení.

Střední hodnota tuhosti NCS skupiny byla 153 ± 19 N/mm v porovnání s 195 ± 29 pro CS skupinu (obr. 4). Tento rozdíl byl rovněž statisticky signifikantní ($p < 0,001$). Získané křivky síly a posunu vykazují známky podobnosti pro obě kontrolované skupiny. Naměřené závislosti můžeme rozdělit do dvou oblastí:

- 1) Počáteční lineární závislost s minimálním nárůstem posunutí,
- 2) Nelineární část s velkým nárůstem posunutí.

Mechanismy porušení obratle byly pro obě skupiny rozdílné. V případě NCS došlo vždy k vylomení šroubu skrz kortikalis přední části obratle C2. Ve všech případech CS došlo k výrazné změně křivky tuhosti, která koresponduje s ohybovým zatížením obratle.



Obr. 4 Graf střední hodnoty tuhosti pro cementovanou (CS) a necementovanou (NCS) skupinu. Rozdíl v obou skupinách byl statisticky signifikantní ($p < 0,001$) (blíže v textu)

Vliv aplikovaného objemu polymetylmakrylátu na pevnost implantátu

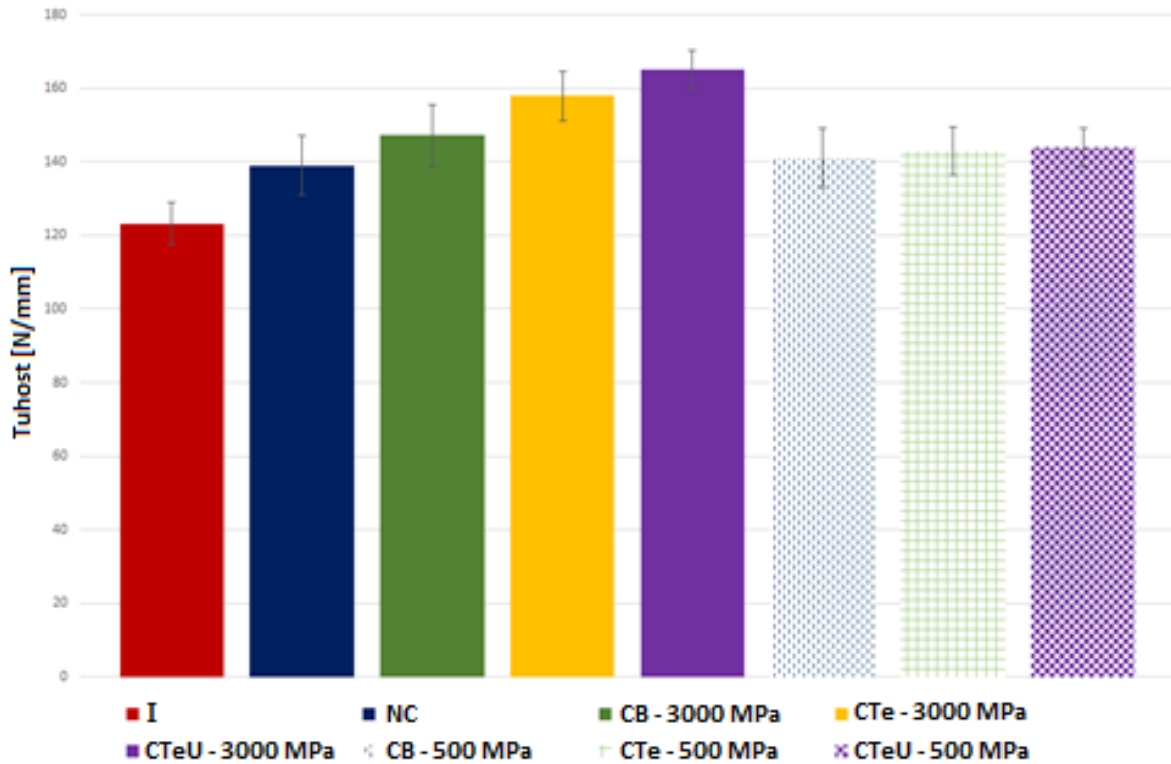
Objem použitého kostního cementu se měnil dle zvoleného augmentačního modelu. Vypočítaný objem pro jednotlivé případy je shrnut v tabulce 2. Nejnižší hodnota objemu kostního cementu byla naměřena pro případ augmentace spodní části těla obratle a to $0,47 \pm 0,03$ ml s průměrnou výškou od baze $8,7 \pm 0,8$ mm. Objem odpovídající standardní augmentaci byl určen na hodnotě $0,95 \pm 0,15$ ml s průměrnou výškou $17,4 \pm 1,2$ mm od baze těla obratle. Nejvyšší hodnota objemu kostního cementu odpovídala případu úniku cementu mimo obratel a to $1,62 \pm 0,12$ ml (výška nebyla stanovena).

Vzorek obratle C2	Věk (roky)	Pohlaví	Objem kostního cementu- baze C2 (ml)	Objem kostního cementu- tělo C2 (ml)	Objem kostního cementu- únik mimo C2 obratel (ml)
1	83	M	0,44	0,87	1,48
2	88	M	0,48	0,96	1,55
3	89	M	0,46	0,93	1,52
4	72	Ž	0,35	1,08	1,57
5	78	M	0,42	0,85	1,63
6	93	Ž	0,51	1,23	1,75
7	90	Ž	0,56	1,11	1,81
8	77	M	0,45	0,97	1,46
9	73	Ž	0,47	0,69	1,68
10	89	Ž	0,53	0,78	1,74
<i>Průměr</i>	83,2 ± 7,26	-	0,47 ± 0,056	0,95 ± 0,15	1,62 ± 0,12

Tab. 2 Měření objemu kostního cementu u jednotlivých obratlů

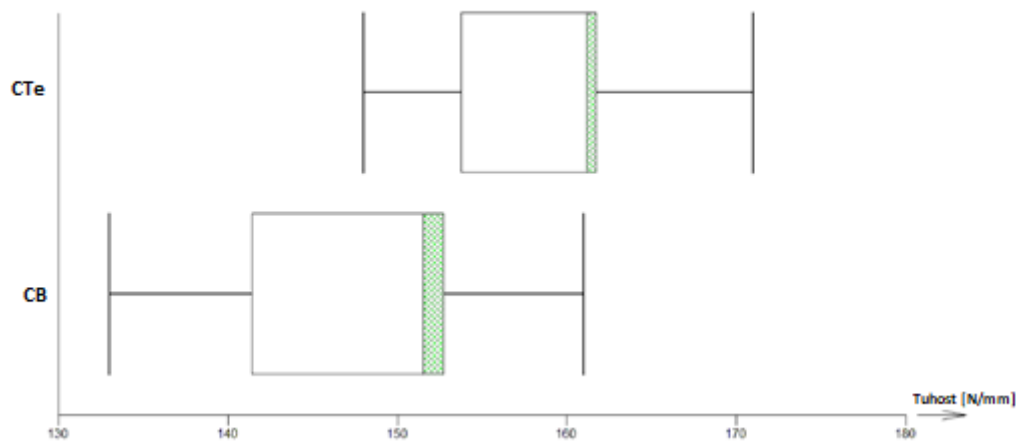
Počáteční tuhost intaktního obratle byla zvolena jako referenční hodnota tuhosti. Střední hodnota počáteční tuhosti pro homogenní kostní cement ($E = 3000$ MPa) se zvyšovala lineárně ($R2 = 0,98$) (obr. 5). Nejnižší hodnota počáteční tuhosti ($123,3 \pm 5,8$ N/mm) byla zaznamenána pro intaktní obratel. Nejvyšší hodnota pak v případě úniku kostního cementu mimo kostní tkáň ($165,2 \pm 5,2$ N/mm). Rozdíl počáteční tuhosti obratle augmentovaného ve spodní části ($147,2 \pm 8,4$ N/mm) byl statisticky významný ($p < 0,0061$) v porovnání s počáteční tuhostí obratle argumentovaného v celém těle ($157,9 \pm 6,6$ N/m) (obr. 6). Střední hodnota počáteční tuhosti pro porózní kostní cement ($E = 500$ MPa) zůstala konstantní. V

případě porózního kostního cementu nebyl rozdíl v tuhostech augmentovaného nebo neaugmentovaného obratle ($p < 0,18$). Augmentace měla vliv i na mechanismus porušení obratle při zatížení.



Obr. 5 Sloupcový graf rozdílů počáteční tuhosti (N/mm) dle navržených virtuálních modelů; **I** - Intaktní obratel, **NC** – necementovaný vzorek C2, **CB** – cementovaná база C2, **CTe** – cementované tělo C2, **CTeU** – cementované tělo C2 s únikem, **3000 MPa** – střední hodnota počáteční tuhosti pro homogenní cement, **500MPa** – střední hodnota počáteční tuhosti pro porózní cement

Z našeho experimentu lze vyvozovat, že pokud nepodpoříme implantovaný šroub augmentací homogenním kostním cementem, dojde k vylomení šroubu v přední části obratlového těla. V případě augmentace kostním cementem, a to bez ohledu na aplikovaný objem, dochází k ohybu dentu spolu s augmentovaným šroubem v rovině zatížení. Nezaznamenali jsme případ vylomení šroubu v přední části obratlového těla. Dochází zde k významné změně tuhosti, která souvisí s ohybovým zatížením.



Obr. 6 Graf znázorňující počáteční tuhost (N/mm) souboru obratlů cementovaných pouze při bazi v porovnání se souborem obratlů cementovaných i v oblasti těla; CB – cementovaná baza C2, CTe – cementované tělo C2

8 DISKUZE

Polymetylmetakrylátem augmentovaná přímá přední osteosyntéza zlomeniny typu II dentu druhého krčního obratle se sníženou kostní denzitou

V naší studii jsme prokázali, že augmentace přední přímé fixace pomocí polymetylmetakrylátu u zlomeniny II. typu druhého krčního obratle výrazně zvyšuje pevnost při experimentálním zatížení v předozadním směru v porovnání s neaugmentovanou fixací u lidských kadaverů druhého krčního obratle ve věku nad 70 let. U všech vzorků v augmentované skupině cementem došlo k ohýbání titanového šroubu a k dotyku fragmetů kosti v oblasti zadní části lomné linie. Všechny necementované vzorky druhého krčního obratle vykazovaly selhání implantátu při bazi těla obratle a docházelo k vylovení šroubu přes přední kortikalis obratlového těla. Výsledky našeho měření poukázaly na možnost, že tato metoda by se dala využít pro významně pevnější ukotvení šroubu v kostní tkáni se sníženou denzitou u zlomenin dentu II. typu.

V práci jsme použili nemodifikovaný, standardní a v klinické praxi používaný 3,5 mm široký kanylový titanový šroub. Maximální silové zatížení před selháním u augmentované

fixace bylo v našem experimentu 352 N, v podobné studii, kde byl využit modifikovaný šroub se jednalo o sílu 353 N /26/. Tuhost dosahovala hodnot 195 N/mm, oproti 125 N/mm ve výše zmíněné práci. Důvodem vyšší tuhosti u augmentované fixace v naší práci byl pravděpodobně fakt, že jsme použili nemodifikovaný šroub, kdežto v původní studii byl použit šroub modifikovaný, s perforovanou stěnou, která mohla zapříčinit jeho sníženou pevnost.

Analýza distribuce polymetylmakrylátu pod biplanární skiaskopickou kontrolou ukázala, že polymetylmakrylát kompletně vyplňuje volný prostor v oblasti druhého krčního obratle. Únik polymetylmakrylátu jsme v oblasti linie lomu nezaregistrovali. Naše studie naznačuje, že technika, kterou jsme zvolili, tedy injektáž vysokoviskózního polymetylmakrylátu v oblasti baze pomocí konvergentně zavedených Jamshidiho kanyl, je efektivní a bezpečná metoda augmentace zajišťující dostatečnou pevnost implantovaného šroubu. Monitorace distribuce polymetylmakrylátu pod biplanární skiaskopickou kontrolou a současná vizuální kontrola případného úniku polymetylmakrylátu v oblasti zavedených kanyl nám umožnila efektivně vyplnit volný prostor v oblasti baze druhého krčního obratle, aniž bychom zaznamenali únik cementu v oblasti lomné linie. Naše studie prokázala, že zavedení nemodifikovaného šroubu neovlivňuje biomechanické vlastnosti fixace ani adekvátní distribuci polymetylmakrylátu při bazi obratle.

U tříštivých zlomenin lze předpokládat zvýšené riziko úniku polymetylmakrylátu, avšak je třeba mít na paměti, že tyto zlomeniny jsou v klasifikaci podle Andersona D'Alonza řazeny do skupiny zlomenin III. typu a tento typ zlomenin jsme v naší studii nehodnotili. V klinické praxi bychom proto přistoupili k pečlivému prozkoumání typu zlomeniny pomocí CT vyšetření a posoudili, zda je vhodná k přímé fixaci s podporou augmentace polymetylmakrylátem. Autoři práce s podobnou problematikou formou metaanalýzy hodnotili riziko úniku polymetylmakrylátu při vertebroplastice u osteoporotických zlomenin thorakolumbální páteře a v průměru u 25 % (rozmezí 9 – 75 %) augmentací docházelo k úniku polymetylmakrylátu mimo obratlové tělo /21/. U tohoto typu zlomenin důsledky úniku polymetylmakrylátu jsou obecně z velké části pokládány za klinicky nevýznamné. Skutečnost, že jsme v naší studii nepozorovali únik polymetylmakrylátu mimo obratlová těla byla z části dána tím, že jsme použili pouze malé množství PMMA (průměr 1 ml), v porovnání se 3-4 ml ve výše uvedené metaanalýze. Hlavní rozdíl je dán faktem, že u standardní augmentace obratlů se cement zavádí do blízkosti oblasti zlomeniny, kde je jeho únik rizikovější, kdežto u augmentace C2 je cement vstřikován pouze do „zdravé“ baze obratlového těla, tedy mimo zlomeninu samotnou. Je ale nutné upozornit na riziko úniku

cementu do linie lomu dentu C2, a to nejen stran ohrožení vitálně důležitých struktur, ale i z pohledu vytvoření možného interpozita bránícího případnému zhojení.

Při použití naší techniky a dodržení zásad správného posouzení typu zlomeniny obratle C2 v in vivo podmínkách považujeme únik polymetylmetakrylátu za velmi nepravděpodobný. Zároveň jsme si vědomi toho, že většina doposud publikovaných prací se věnovala problematice zlomenin obratlů v oblasti hrudní a bederní páteře oproti páteři krční.

V systematické revizi a metaanalýze vertebroplastiky a kyfoplastiky u metastatického postižení krční páteře riziko asymptomatického úniku polymetylmetakrylátu se pohybovalo kolem 16 % /5/. Většinou byl únik polymetylmetakrylátu lokalizován v oblasti měkkých tkání paraspinálního prostoru podél dráhy zavedené kanyly, v menší míře byl pak únik zaregistrován v oblasti epidurálního žilního plexu. Riziko výskytu komplikací bylo poměrně nízké, a to kolem 4 %, v jednom z případů se jednalo o závažnou komplikaci s následkem cévní mozkové příhody v oblasti okcipitálního laloku po úniku polymetylmetakrylátu do cévního řečiště s následnou embolizací /16/. Venózní drenážní systém v oblasti krční páteře ve většině případů odvádí krev mimo intrakraniální řečiště a studiem literatury jsme neodhalili podobný případ klinicky symptomatického úniku polymetylmetakrylátu při vertebroplastice v oblasti krční páteře. Přesto doporučujeme, aby před vlastní augmentací byla vždy věnována maximální pozornost při posuzování charakteru a typu zlomeniny. Stejně tak je zcela zásadní kontrola distribuce polymetylmetakrylátu během aplikace za biplanární fluoroskopické kontroly. Tímto se vyvarujeme potencionálním nežádoucím komplikacím spojeným s únikem polymetylmetakrylátu mimo obratel.

Ačkoli operační léčba zlomenin dentu II. typu druhého krčního obratle u starší populace má lepší klinické výsledky v porovnání s konzervativní léčbou /19, 24/, riziko perioperačních a pooperačních komplikací zůstává vysoké /1/. U 90 % populace starších pacientů, kteří utrpěli zlomeninu výběžku dentu C2, jsou pozorovány výrazné degenerativní změny v oblasti krční páteře /12/. Z výše uvedeného lze usuzovat, že tato populace starších pacientů, kteří podstoupí fixaci zlomeniny II. typu druhého krčního obratle z předního přístupu, budou mít již primárně výrazně zredukovaný rozsah pohybu v oblasti krční páteře v porovnání s populací mladších pacientů. Tato skutečnost, spolu s předpokládaným vyšším výskytem komorbidit u těchto pacientů znamená, že technicky jednoduchá a rychlá operace, vyžadující standární vybavení a postup bude jedním z klíčových parametrů pro dobrý klinický výsledek. Právě přímá fixace zlomeniny II. typu druhého krčního obratle s augmentací

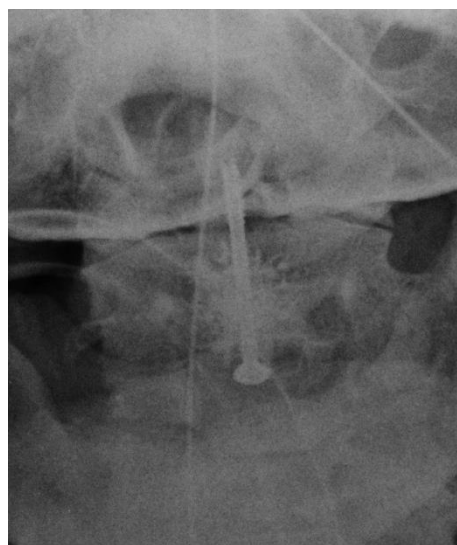
polymetylmetakrylátem by mohla vést k redukci náročných zadních výkonů a být tak elegantním operačním řešením u tohoto typu zlomenin ve starší populaci pacientů, aniž bychom je zatížili příliš vysokou perioperační morbiditou.

Snížená kvalita kostní tkáně při bazi těla druhého krčního obratle u geriatrických pacientů s osteoporózou je hlavním faktorem při selhání přímé přední fixace šroubem u II. typu zlomenin dentu C2 /7, 17/. Augmentace baze druhého krčního obratle kontrastním vysokoviskózním, rychle aplikovatelným polymetylmetakrylátem zajišťuje dostatečnou pevnost v zatížení a snižuje tak riziko vylomení šroubu v oblasti baze druhého krčního obratle. V in vivo podmínkách by proto nemělo docházet k selhání implantátu. Tento fakt jsme potvrdili na několika případech starších pacientů, u kterých jsme přistoupili k augmentované přední osteosyntéze zlomeniny dentu (obr. 7). Ani v jednom případě nedošlo k úniku cementu a současně nedošlo k vylomení šroubu z baze obratlového těla C2. Tento soubor pacientů nebyl zpracován k publikaci vzhledem k malému počtu pacientů s krátkodobým sledováním.

a)



b)



Obr. 7 Fixace zlomeniny II. typu dentu C2 kanylovaným tahovým šroubem s augmentací baze obratlového těla vysokoviskozním polymetylmetakrylátem u 87 letého pacienta, RTG snímek; *a* – boční pohled, *b* – zadopřední pohled

V naší experimentální práci vysokoviskózní polymetylmetakrylát vyplňoval volný prostor v trámčině baze druhého krčního obratle a vytvořil tak pevný blok s ukotvením šroubu v proximální části obratle. Tímto mechanismem se redukuje možnost případných

mikropohybů v porózní kostní tkáni. Podobně i hlavička šroubu je zajištěna pevně při vstupu do baze obratle a šroub tak využívá svých kompresních vlastností, což vede k pevnější stabilizaci zlomeniny s větší šancí na kvalitní kostní prohojení. Je známo, že síla potřebná k vytažení augmentovaného kanylovaného šroubu v oblasti pediklů hrudní a bederní páteře je výrazně vyšší v porovnání s neaugmentovanými /6, 14/, a pro naši práci je to další nepřímý důkaz vyšší pevnosti augmentované fixace.

Jsme si vědomi řady limitujících faktorů naší studie. Jedním z nich je simulace místa vytvoření lomné linie pomocí oscilační pily, jejíž použití nevytváří věrný charakter zlomeniny a dochází tím také k částečné ztrátě kostní tkáně. V in vivo podmínkách by se jednalo o přímou sílu, která by zlomeninu způsobila. Důvodem této arteficiálně vytvořené zlomeniny bylo získání identických modelů zlomeniny dentu typu II druhého krčního obratle u všech dvaceti vzorků. U přímo aplikované extenční a kompresní síly na výběžek dentu C2 jsme se obávali rizika poškození obratle ve větším rozsahu než bylo žádoucí pro potřeby našeho měření /22/. Dalším limitujícím faktorem při měření potřebné síly nutné k selhání implantátu je vystavení vzorků obratlů předozadní střížné síle. Toto ne zcela kopíruje celou škálu sil, které na atlantoaxiální segment působí v in vivo podmínkách. Je nutno ale poznamenat, že dostupné biomechanické studie dokazují, že jsou to právě předozadní střížné síly potřebné k dosažení zlomeniny dentu II. typu druhého krčního obratle, kdežto u laterálně působících sil k tomuto typu zlomeniny nedochází /8/. Proto směr silového působení, které jsme zvolili při našem biomechanickém měření považujeme za adekvátní pro zhodnocení a posouzení stability fixace tohoto typu zlomeniny druhého krčního obratle.

Dále jsme nebyli schopni plně zhodnotit kostní denzitu, tedy ve smyslu zda se u donora kadaverózního vzorku jednalo o klinickou diagnózu osteoporózy. U výběru věkové skupiny v našem experimentu lze ale předpokládat, že většina vzorků obratlů musela vykazovat známky snížené kostní minerálové denzity /27/. Kostní denzita u jednotlivých vzorků obratlů byla hodnocena pomocí počítačové tomografie (CT) a měřena v Hounsfieldových jednotkách. Nejedná se o standardní měření kostní minerálové denzity, avšak tuto metodu lze spolehlivě použít a korelace mezi hodnotami získanými tímto měřením a změnami minerálové kostní denzity byla prokázána v předchozích studiích a může být aplikována při diagnostice osteoporotických změn kostní tkáně /18/. Různé hodnoty kostní denzity byly rovněž pozorovány na jednotlivých etážích páteřního sloupce. U druhého krčního obratle je 3x až 5x vyšší kostní denzita v porovnání s obratlem L1, a to dokonce i u pacientů s osteoporózou /2/. To je také důvodem relativně vyšších hodnot v měření pomocí

Hounsfieldových jednotek u našich vzorků obratlů C2. Je vhodné předpokládat, že vzorky obratlů použité v našem experimentu reprezentují klinicky relevantní vzorek populace s frakturou dentu II. typu druhého krčního obratle se sníženou kostní minerálovou denzitou a osteoporózou.

Augmentace přední přímé fixace šroubem u zlomeniny dentu II. typu C2 u populace starších pacientů byla již aplikována v klinické praxi u malého počtu těchto pacientů v retrospektivních klinických sledováních /9, 25/. Abychom mohli posoudit klinický prospěch tohoto terapeutického přístupu, bylo by potřeba tuto metodu systematicky zhodnotit v kontrolním prospektivním klinickém sledování.

Vliv aplikovaného objemu polymetylmetakrylátu na pevnost implantátu

Doposud se žádná biomechanická studie nevěnovala problematice vlivu objemového množství a kvality polymetylmetakrylátu na pevnosti přední fixace u zlomeniny dentu II. typu druhého krčního obratle. Z biomechanického hlediska nás zajímala zejména informace, jaké minimální objemové množství polymetylmetakrylátu je ještě dostatečné k zajištění pevnosti a stability augmentované přední fixace šroubem zlomeniny odontoideálního výběžku druhého krčního obratle. Provedli jsme detailní analýzu pomocí metody konečných prvků, abychom pochopili chování polymetylmetakrylátu z hlediska biomechaniky u augmentace přední fixace těchto zlomenin. Prokázali jsme, že se jedná o **lineární vztah mezi pevností fixace a množstvím a distribucí aplikovaného polymetylmetakrylátu** do oblasti druhého krčního obratle.

Využití evoluční rovnice v ITK-SNAP softwaru bylo schopno zhodnotit variabilitu objemového množství aplikovaného polymetylmetakrylátu v těle druhého krčního obratle. Průměrné objemové množství polymetylmetakrylátu bylo zaznamenáno jako nejnižší v oblasti baze obratle s hodnotami $0,47 \pm 0,03$ ml, standardní výplň celého těla odpovídala hodnotám $0,95 \pm 0,15$ ml a nejvyšší hodnoty objemového množství byly zaznamenány u případů, kdy docházelo k úniku polymetylmetakrylátu mimo obratel. V tomto případě se jednalo o objemové množství $1,62 \pm 0,12$ ml. Tato zjištění jsou v souladu s naší předchozí studií, kde se získané hodnoty objemového množství pohybovaly v rozmezí 0,7-1,2 ml /20/. Výsledky jsou rovněž podobné závěrům práce Liebschnera et al., kteří poukázali na to, že i pouze malé

množství polymetylmetakrylátu je nutné k dosažení dostatečné pevnosti a stability zlomeniny bederního obratle srovnatelné s jeho původními biomechanickými vlastnostmi před vlastním traumatem /13/. Naše výsledky naznačují, že i minimální množství polymetylmetakrylátu je dostatečné k obnovení pevnosti a stability zlomeniny dentu II. typu druhého krční obratle, a to v objemovém množství 0,7-1,2 ml. Použití nadměrného množství polymetylmetakrylátu je spojeno s rizikem zvýšené tuhosti obratle a tím i se změnou biomechanických vlastností přilehlých segmentů páteře. Dále je aplikace nadměrného množství PMMA spojená s rizikem úniku cementu do okolní tkáně, případně venózních plexů, které následně může způsobit závažnou komplikaci ve formě plicní embolizace. Jako přirovnání se nabízí vliv rigidity osteosyntézy na proces hojení zlomenin dlouhých kostí, kdy pevnost fixace může mít pozitivní či negativní vliv na vlastní hojení (pakloub z instability – hojení – pakloub z nadměrné rigidity) /3/. Je třeba poznamenat, že odhad tak malého objemu polymetylmetakrylátu by mohl představovat určitý problém v klinické praxi, stejně jako předčasný únik polymetylmetakrylátu mimo obratel z důvodu rozdílné porozity kostní tkáně.

Analýza pevnosti fixace prokázala vzestupnou lineární úměrnost mezi pevností a množstvím kostního polymetylmetakrylátu aplikovaného do obratle. Zjistili jsme, že nejmenší hodnoty pevnosti jsou u necementovaných obratlů, kdežto u obratlů, kde docházelo k úniku polymetylmetakrylátu, byla zaznamenána pevnost největší. Bohužel, **naše první hypotéza nebyla potvrzena**. Rozdíl mezi pevností u obratle vyplněného polymetylmetakrylátem pouze při bazi byl signifikantní v porovnání s pevností obratle, kde polymetylmetakrylát vyplňoval celé tělo C2. Překvapivým zjištěním byla skutečnost vlivu rozdílné porozity polymetylmetakrylátu na pevnost fixace, což by se mohlo stát spolehlivým faktorem při výběru vhodného materiálu pro augmentaci. Augmentace pomocí homogenního polymetylmetakrylátu o malém objemu signifikantně zvyšuje pevnost fixace a snižuje tak riziko vylomení implantátu, oproti aplikaci velkého objemu vysokoporózního polymetylmetakrylátu. Příznivá korelace mezi porozitou polymetylmetakrylátu a pevností naznačuje, že minimalizace nebo snížení porosity aplikovaného materiálu, v tomto případě polymetylmetakrylátu, má význam při celkovém zvýšení pevnosti fixace. Naš experiment prokázal **pozitivní vliv aplikace homogenního polymetylmetakrylátu na pevnost fixace** a proto můžeme tuto metodu považovat za bezpečnou a efektivní při léčení zlomenin dentu II. typu druhého krční obratle u pacientů se sníženou denzitou kostní tkáně. Výsledek naší práce je v souladu s jinými biomechanickými studiemi, které prokázaly příznivý vliv i malého množství objemu polymetylmetakrylátu na pevnost augmentovaného obratle /13, 15/.

Roli objemového množství polymetylmakrylátu na úlevu od bolesti, stejně jako vliv na proces hojení zlomeniny nelze samozřejmě v podmínkách kadaverózní biomechanické studie hodnotit. Tyto aspekty by se samozřejmě daly hodnotit formou prospektivní klinické studie. Výsledky našeho experimentu však nabízejí srovnání s klinickými daty, které prokázaly, že již malé objemové množství polymetylmakrylátu působí efektivně na bolest, což v minulosti nebylo jednoznačně akceptováno /3, 13/. Řada studií se zabývala problematikou úniku polymetylmakrylátu mimo obratlové tělo. Jedná se o častou nežádoucí komplikaci perkutánní vertebroplastiky, či jiných moderních augmentačních technik ve spondylochirurgii (kyfoplastika, vertebroplastika), naštěstí s minimálními klinickými důsledky pokud se jedná o malé množství uniklého materiálu /3, 11/. Dalším nežádoucím faktorem vertebroplastiky by mohlo být potenciální riziko lokálního tkáňového tepelného poškození a toxicita neaktivovaných monomerů /4/. V jedné z biomechanických studií využívající osteoporotické obratle byl únik polymetylmakrylátu zaznamenán v osmi případech. Objem extravazátu byl v průměru 1 ml, pokud objem aplikovaného množství přesahoval 6 ml /10/. V naší studii jsme množství uniklého materiálu neměřili.

V práci jsme rovněž prokázali, že metoda aktivní kontury při segmentaci obrazu může být využita k simulaci toku kostního cementu ve struktuře kostní tkáně. Výhoda tohoto přístupu spočívá v efektivní simulaci toku polymetylmakrylátu ve struktuře kostní tkáně v porovnání s počítačově zobrazenou průtokovou dynamikou /10, 23/.

Dalším důležitým poznatkem této studie je způsob selhání augmentované a neaugmentované fixace druhého krčního obratle. V necementovaném případě se jedná o vylomení implantátu v oblasti přední části druhého krčního obratle. U augmentované fixace jsme prokázali, že i malé množství homogenního polymetylmakrylátu v oblasti baze obratle může zabránit prolomení šroubu skrze přední kortikalis této části druhého krčního obratle.

Naši studii limituje několik aspektů. V aplikaci silového působení při měření jsme sledovali chování fixovaného obratle pouze vůči přímým kompresním silám. Naše technika rovněž nesledovala biomechanické vlastnosti přilehlých tkání jako jsou pevnost vůči ohybu nebo rozložení sil. V podmínkách in vivo dochází při zatížení ke komplexnímu rozložení sil spolu s významnou složkou ohybu. Přidružené faktory jako věk, pohlaví, stavba těla, kostní denzita a přidružené choroby mohou obecně způsobit významnou variabilitu geometrických a biomechanických vlastností testované oblasti, v našem případě druhého krčního obratle.

9 ZÁVĚRY

Postgraduální studium i samotná práce bylo od počátku zaměřeno na biomechanické testování druhého krčního obratle po arteficiálně vytvořené a z předního přístupu zafixované zlomenině dentu II. typu standardním šroubem používaným v klinické praxi při chirurgické léčbě tohoto typu poranění. Záměrně jsme jako testovací model zvolili kadaverózní vzorky obratlů C2 zemřelých dárců ve věkové skupině nad 70 let. V této populaci je totiž využití této metody stále kontroverzní z důvodu nekvalitní kostní tkáně a vysokému riziku vylomení implantátu z obratlového těla a tím selhání vlastní fixace. Myšlenka augmentace standardního implantovaného šroubu pomocí polymetylmakrylátu nás přivedla k úvaze, zda by kombinace přímé přední fixace s vyztužením obratlového těla C2 polymetylmakrylátem zajistila dostatečnou pevnost implantátu a tím se zabránilo jeho vylomení. Byli jsme si vědomi toho, že v klinické praxi byla tato metoda již použita, ale dosud nebylo provedeno biomechanické testování na kadaverózním materiálu za použití standardních, v praxi používaných implantátů.

Práce byla koncipována do dvou experimentálních částí. V *prvním experimentu* jsme se zaměřili na to, zda augmentace fixace zlomeniny dentu druhého krčního obratle II. typu polymetylmakrylátem zajistí dostatečnou pevnost implantátu a zabrání tak jeho vylomení. Podařilo se nám prokázat statisticky významnější pevnost polymetylmakrylátem augmentované fixace, a to do té míry, že ve skupině augmentovaných, šroubem fixovaných obratlů, nedošlo při zatížení k vylomení implantátu ani v jednom případě.

Povzbudivé výsledky naší první práce nás přivedly k otázce, jaké množství polymetylmakrylátu je nutné k tomu, aby augmentace zajistila dostatečnou pevnost implantátu. V *druhém experimentu* jsme se proto na tuto problematiku zaměřili. Experiment byl prováděn na virtuálním modelu za využití vstupních dat z naší původní práce. Zde jsme měli vytvořeny dvě hypotézy. Jednak nás zajímalo, jaká část obratle musí být vyplněna polymetylmakrylátem, aby zajistila dostatečnou pevnost implantátu fixujícího zlomeninu. Druhá hypotéza byla zaměřena na vliv porozity polymetylmakrylátu na pevnost fixace. Výsledky měření prokázaly vzestupně lineární závislost objemového množství polymetylmakrylátu na pevnosti fixace. Jako ideální by v tomto případě byla hodnota pevnosti získaná při výplni baze a těla obratle C2. Dostatečná náplň a distribuce polymetylmakrylátu nám zajistí pevnost implantovaného šroubu a zároveň se vyvarujeme

úniku cementu mimo obratel. Hodnoty pevnosti získané při náplni pouze baze obratle C2 zabránily sice vylovení implantátu při zatížení, ale v porovnání s hodnotami při náplni baze a těla obratle byly signifikantně nižší. Druhá hypotéza vlivu porozity polymetylmetakrylátu na pevnost fixace byla jednoznačně potvrzena ve prospěch homogenního materiálu.

Výsledky našeho měření a závěry obou experimentů potvrdily pozitivní vliv augmentace homogenním polymetylmetakrylátem na pevnost přímé přední fixace zlomeniny dentu typu II druhého krčního obratle kanylovaným tahovým šroubem. Vzhledem k tomu, že byla tato metoda již v praxi využita, nelze hovořit o zcela novém chirurgickém postupu. Věříme ale, že výsledky naší experimentální práce rozšíří spektrum využití této metody v klinické praxi, převážně pak u pacientů, kde lze předpokládat horší kvalitu kostní tkáně.

10 LITERATURA

1. Andersson S, Rodrigues M, Olerud C. Odontoid fractures: high complication rate associated with anterior screw fixation in the elderly. *Eur Spine J.* 2000;9(1):56–59
2. Anderst WJ, Thorhauer E, Lee J, Donaldson W, Kang J. Cervical Spine Bone Mineral Density as a Function of Vertebral Level and Anatomic Location. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society.* 2011;11(7):659-667
3. Belkoff SM, Mathis JM, Jasper LE, Deramond H. The biomechanics of vertebroplasty. The effect of cement volume on mechanical behavior. *Spine (Phila Pa 1976).* 2001;26(14):1537-1541
4. Belkoff SM, Molloy S. Temperature measurement during polymerization of polymethylmethacrylate cement used for vertebroplasty. *Spine (Phila Pa 1976).* 2003;28(14):1555-1559
5. De la Garza-Ramos R, Benvenuti-Regato M, Caro-Osorio E. Vertebroplasty and kyphoplasty for cervical spine metastases: a systematic review and meta-analysis. *Int J Spine Surg.* 2016;10:7.
6. Goost H, Deborre C, Wirtz DC, Burger C, Prescher A, Fölsch C, Pflugmacher R, Kabir K. PMMA-augmentation of incompletely cannulated pedicle screws: a cadaver

- study to determine the benefits in the osteoporotic spine. *Technol Health Care.* 2014;22(4):607-615
7. Huybregts JG, Jacobs WC, Peul WC, Vleggeert-Lankamp CL. Rationale and design of the INNOVATE Trial: an international cooperative study on surgical versus conservative treatment for odontoid fractures in the elderly. *BMC Musculoskeletal Disorders.* 2014;15:7
 8. Ivancic PC. Odontoid fracture biomechanics. *Spine.* 2014;39(24):E1403-1410
 9. Kohlhof H, Seidel U, Hoppe S, Keel MJ, Benneker LM. Cement-augmented anterior screw fixation of Type II odontoid fractures in elderly patients with osteoporosis. *Spine J.* 2013;13(12):1858-1863
 10. Kurutza M, Vargab P, Jakab G. Prophylactic vertebroplasty versus kyphoplasty in osteoporosis: A comprehensive biomechanical matched-pair study by in vitro compressive testing. *Med Eng Phys.* 2019;65:45-46
 11. Lador R, Dreiangel N, Ben-Galim PJ, Hipp JA. A pictorial classification atlas of cement extravasation with vertebral augmentation. *Spine J.* 2010;10(12):1118-1127
 12. Lakshmanan P, Jones A, Howes J, Lyons K. CT evaluation of the pattern of odontoid fractures in the elderly--relationship to upper cervical spine osteoarthritis. *Eur Spine J.* 2005 Feb;14(1):78-83
 13. Liebschner MA, Rosenberg WS, Keaveny TM. Effects of bone cement volume and distribution on vertebral stiffness after vertebroplasty. *Spine (Phila Pa 1976).* 2001;26(14):1547-54
 14. Liu D, Zhang B, Xie QY, et al. Biomechanical comparison of pedicle screw augmented with different volumes of polymethylmethacrylate in osteoporotic and severely osteoporotic cadaveric lumbar vertebrae: an experimental study. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society.* 2016;16(9):1124-1132
 15. Luo J, Daines L, Charalambous A, Adams MA, Annesley-Williams DJ, Dolan P. Vertebroplasty: only small cement volumes are required to normalize stress distributions on the vertebral bodies. *Spine (Phila Pa 1976).* 2009;34(26):2865-2873
 16. Mont'Alverne F, Vallée JN, Cormier E, Guillevin R, Barragan H, Jean B, et al: Percutaneous vertebroplasty for metastatic involvement of the axis. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2005;26:1641-1645
 17. Osti M, Philipp H, Meusburger B, Benedetto KP. Analysis of failure following anterior screw fixation of Type II odontoid fractures in geriatric patients. *European Spine Journal.* 2011;20(11):1915-1920

18. Pickhardt PJ, Pooler BD, Lauder T, del Rio AM, Bruce RJ, Binkley N. Opportunistic Screening for Osteoporosis Using Abdominal Computed Tomography Scans Obtained for Other Indications. *Annals of internal medicine*. 2013;158(8):588-595
19. Robinson Y, Robinson AL, Olerud C. Systematic review on surgical and nonsurgical treatment of type II odontoid fractures in the elderly. *Biomed Res Int*. 2014;231948
20. Řehoušek P, Jenner E, Holton J, Czyz M, Čapek L, Henyš P, et al. Biomechanical comparison of cemented versus non-cemented anterior screw fixation in type II odontoid fractures in the elderly: a cadaveric study. *Spine J*. 2018;18(10):1888-1895
21. Sun H, Li C. Comparison of unilateral and bilateral percutaneous vertebroplasty for osteoporotic vertebral compression fractures: a systematic review and meta-analysis. *J Orth Surg Res*. 2016; 11:156
22. Teo EC, Paul JP, Evans JH, Ng HW. Experimental investigation of failure load and fracture patterns of C2 (axis). *J Biomech*. 2001;34(8):1005-1010
23. Teo JCM, Teoh SH. Permeability study of vertebral cancellous bone using micro-computational fluid dynamics. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2012;15:417- 423
24. Vaccaro AR, Kepler CK, Kopjar B, Chapman J, Shaffrey C, Arnold P, Gokaslan Z, Brodke D, France J, Dekutoski M, Sasso R, Yoon ST, Bono C, Harrop J, Fehlings MG. Functional and quality-of-life outcomes in geriatric patients with type-II dens fracture. *J Bone Joint Surg Am*. 2013;95(8):729-735
25. Waschke A, Berger-Roscher N, Kielstein H, Ewald C, Kalff R, Wilke HJ. Cement augmented anterior odontoid screw fixation is biomechanically advantageous in osteoporotic patients with Anderson Type II fractures. *J Spinal Disord Tech*. 2015;28(3):E126-132
26. Waschke A, Ullrich B, Kalff R, Schwarz F. Cement-augmented anterior odontoid screw fixation for osteoporotic type II odontoid fractures in elderly patients: prospective evaluation of 11 patients. *Eur Spine J*. 2016;25(1):115-121
27. Zhang Y, Zhou Z, Wu C, et al. Population-Stratified Analysis of Bone Mineral Density Distribution in Cervical and Lumbar Vertebrae of Chinese from Quantitative Computed Tomography. *Korean Journal of Radiology*. 2016;17(5):581-589

11 PUBLIKACE

1. Řehousek P, Jenner E, Holton J, Czyz M, Čapek L, Henyš P, Kulvajtová M, Krbec M, Skála-Rosenbaum J. Biomechanical comparison of cemented versus non-cemented anterior screw fixation in type II odontoid fractures in the elderly: a cadaveric study. *Spine J.* 2018;18(10):1888–1895. (IF 3,220)
2. Čapek L, Řehousek P, Henyš P, Bleibleh S, Jenner E, Kulvajtová M, Skála-Rosenbaum J. Cement augmentation of odontoid peg fractures: the effect of cement volume and distribution on construct stiffness [published online ahead of print, 2020 Jan 4]. *Eur Spine J.* 2020;10.1007/s00586-019-06286-6. (IF 2,513)
3. Řehousek P, Jenner E, Czyz M, Holton J, Skála–Rosenbaum J. Biomechanical Comparison Of Cemented Versus Non-Cemented Screw Fixation In Type II Odontoid Fractures In Elderly - A Cadaveric Study. *Global Spine Journal*, vol. 8, 1_ suppl: pp. 375S-383S., First Published April 30, 2018, P 026 abstract

Publikace nesouvisející s disertační prací

4. Holton J, Jones M, Klézl Z, Czyz M, Grainger M, Řehoušek P. A rare case of Paget's disease affecting the cervical spine. *Ann R Coll Surg Engl.* 2019;101(2):e38–e42. (IF 1,259)
5. Kaiser R, Behrbalk E, Waldauf P, Řehoušek P, Perez B, Mehdian H. Paraspinal muscle volume in patients with Scheuermann's Kyphosis. *Acta Orthop Belg.* 2016;82(3):467–473