

UNIVERZITA KARLOVA

2. lékařská fakulta

Autoreferát disertační práce



3D analýza dentálních a skeletálních změn po zubní a ortodontické terapii

3D analysis of dental and skeletal changes after dental and orthodontic treatment

Adam Nocar

Praha, 2024

Disertační práce byla vypracována v rámci prezenčního studia doktorského studijního programu Experimentální chirurgie na Stomatologické klinice dětí a dospělých 2. lékařské fakulty Univerzity Karlovy a FN v Motole.

Školitel: prof. MUDr. Tatjana Dostálová, DrSc., MBA, Stomatologická klinika dětí a dospělých 2. LF UK a FN Motol, V Úvalu 84, Praha 5, 150 06

Oponenti:

Obhajoba se bude konat před komisí pro obhajoby oborové rady Experimentální chirurgie dne v od hod.

Předsedou komise pro obhajobu disertační práce byl jmenován:

Předseda oborové rady a garant doktorského studijního programu:
prof. MUDr. Zdeněk Krška, DrSc., I. chirurgická klinika – břišní, hrudní a úrazové chirurgie 1. LF UK a VFN, U Nemocnice 499/2, Praha 2, 128 08

Děkan fakulty: prof. MUDr. Marek Babjuk, CSc.

Tato práce vznikla za podpory grantu 00064203 (FN Motol).

S disertační prací je možno se seznámit na Oddělení Ph.D. studia děkanátu 2. lékařské fakulty Univerzity Karlovy, V Úvalu 84, 150 06 Praha 5 (tel. 224 435 836).

3D analýza dentálních a skeletálních změn po zubní a ortodontické terapii

Abstrakt

Předkládaná disertační práce popisuje možnost využití 3D analýzy a 3D technologií ve stomatologické a ortodontické praxi. Analýza změn je dále popsána ve dvou konkrétních pracích, a to přesně zabývající se laserově tvrzenými 3D vytištěnými modely v ortodoncii a změnami po laserovém bělení zubů. Cílem první práce je analýza změn po ortodontické terapii z pohledu stability modelů vytištěných stereolitografií (SLA) ve srovnání s tradičními sádrovými odlitky po dobu tří let. Experimentální soubor dat se skládal z 36 ortodontických pacientů, z nichž každý měl modely vytištěné pomocí SLA a sádrové odlitky pro horní i dolní čelist, což vedlo k získání celkem 72 skenů ve formě souborů Standard Template Library (STL) a 72 tradičních otisků. Modely horního zubního oblouku byly zkonstruovány pomocí 3D tiskárny SLA, využívající fialový laserový paprsek o vlnové délce 405 nm ke ztuhnutí tekutého polymeru. Klasické sádrové odlitky byly připraveny v zubní laboratoři. K vyhodnocení rozdílů mezi zubními modely byl použit laboratorní skener k vytvoření virtuálních odlitků. Výsledky z 22 experimentálních souborů dat ukázaly vysokou míru shody mezi sádrovými odlitky a virtuálními povrchy s průměrným absolutním rozdílem 0,018 mm a směrodatnou odchylkou 0,17 mm. Celkově tato studie prokazuje srovnatelnost a přesnost modelů vytištěných pomocí SLA ve vztahu k tradičním sádrovým odlitkům, což podporuje jejich potenciál jako spolehlivé alternativy v ortodontické praxi. Ve stomatologické terapii popisuje dále práce změny v oblasti dentálních struktur, a to po bělení zubů s lasery. Světlo může urychlit proces bělení pomocí halogenových lamp, světelných diod, plazmových obloukových lamp a laserů. Výsledky naší práce ukazují, že kombinace bělicího prostředku s laserovým světlem ozařovaným modrou laserovou diodou o vlnové délce 0,44 μm nebo laserovou diodou o vlnové délce 1,7 μm v blízkém

infračerveném pásmu urychlují proces bělení nejen během ozařování zubů, ale také během dvou týdnů po zákroku.

Klíčová slova

3D tisk, 3D skenování, stomatologie, ortodontie, laser, bělení zubů, ortodontické modely

3D analysis of dental and skeletal changes after dental and orthodontic treatment

Abstract

The present dissertation describes the possibility of using 3D analysis and 3D technologies in dental and orthodontic practice. The analysis of changes is further described in two specific papers, specifically dealing with laser hardened 3D printed models in orthodontics and changes after laser teeth whitening. The aim of the first study is to analyse the changes after orthodontic treatment in terms of stability of models printed by stereolithography (SLA) compared to traditional plaster casts over a period of three years. The experimental data set consisted of 36 orthodontic patients, each with SLA-printed models and plaster casts for both the maxilla and mandible, resulting in a total of 72 scans in the form of Standard Template Library (STL) files and 72 traditional impressions. The upper dental arch models were constructed using an SLA 3D printer, using a 405 nm violet laser beam to solidify the liquid polymer. Conventional plaster casts were prepared in the dental laboratory. A laboratory scanner was used to evaluate the differences between the dental models to create virtual casts. The results from the 22 experimental datasets showed a high degree of agreement between the plaster casts and the virtual surfaces with an average absolute difference of 0.018 mm and a standard deviation of 0.17 mm. Overall, this study demonstrates the comparability and accuracy of SLA-printed models in relation to traditional plaster casts, supporting their potential as a reliable alternative in orthodontic practice. In dental therapy, the thesis also describes changes in dental structures after teeth whitening with the lasers. Light can speed up the whitening process by using halogen lamps, light-emitting diodes, plasma arc lamps and lasers. Our results show that the combination of a bleaching agent with laser light irradiated by a blue laser diode with a wavelength of 0.44 μm or a laser diode with a

wavelength of 1.7 μm in the near-infrared band accelerates the whitening process not only during tooth irradiation but also during the two weeks after the procedure.

Keywords

3D print, 3D scanning, dentistry, orthodontics, laser, teeth bleaching, orthodontic models

Obsah

<i>Abstrakt</i>	4
<i>Abstract</i>	6
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY	9
2. CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY	10
2.1. Práce 1: Tříletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace	10
2.2. Práce 2: Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů	11
3. METODIKA	11
3.1. Tříletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace	11
3.1.1. Studijní soubor	11
3.1.2. Analýza a měření	12
3.1.3. Stereolitografická tiskárna.....	14
3.1.4. Analýza profilu a struktury povrchu	14
3.2. Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů.....	15
3.2.1. Mechanismus bělení.....	15
3.2.2. Příprava vzorku	16
3.2.3. Techniky chemického bělení a měření barvy	16
3.2.4. Laserové zdroje.....	17
4. VÝSLEDKY	20
4.1. Tříletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace	20
4.1.1. Hodnocení přesnosti klasického a 3D modelu	20
4.1.2. Charakteristika profilu a struktury povrchu: Analýza zubních modelů	21
4.2. Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů.....	23
5. DISKUZE	27
5.1. Tříletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace	27
5.2. Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů.....	28
6. ZÁVĚR	29
7. SOUHRN	31
8. SUMMARY	32
9. LITERATURA	33
10. SEZNAM PUBLIKACÍ	49

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Stomatologie a ortodontie, jako vědní obory zaměřené na zdraví dutiny ústní a zubního aparátu, neustále hledají inovativní přístupy k diagnostice, léčbě a péči o pacienty. S postupem času a technologickým pokrokem se otevírají nové možnosti pro využití moderních technologií, které přinášejí přesnější a efektivnější metody práce.

Jedním z klíčových trendů v inovacích v posledních letech je využití 3D analýzy, laserů a 3D tisku v oblasti stomatologie a ortodontie. Rychlý technologický rozvoj a současně klesající cena těchto technologií umožnily jejich širší použití v medicíně. Lasery se staly nedílnou součástí mnoha stomatologických procedur, ať už jde o chirurgické zákroky, estetické úpravy nebo bělení zubů. Důmyslné využití laserů umožňuje chirurgům přesné řezy, minimalizaci krvácení a zkrácení doby hojení ran. Pokrok v oblasti laserového bělení zubů přináší pacientům rychlejší a efektivnější metody dosažení žádaného estetického vzhledu svých zubů. Tyto trendy jsou dobře patrné i na vybraných příkladech zahraničních pracovišť, jako je Mayo Clinic, kde se již řadu let pracuje s týmem pro anatomické modelování. Výroba 3D modelů slouží chirurgům pro lepší pochopení prostorových vztahů a pacientům pro lepší vysvětlení připravovaných zákroků (3D Anatomic Modeling Laboratories Mayo Clinic, 2023). Podobně i v České republice, například na 2. LF UK, se využívá 3D tisku pro výrobu modelů kostí pro výuku studentů (Ústav anatomie 2. LF UK, 2015). Významným prvkem moderní stomatologie je právě technologie 3D tisku. Tato technologie umožňuje vytváření přesných trojrozměrných modelů zubů a kostí, které jsou nezbytné pro diagnostiku, plánování léčby a výuku. Zvláště v ortodontii se 3D tisk stává nedílnou součástí výroby přesných ortodontických nástrojů a modelů.

Ve světle rychle se rozvíjejících technologií je důležité zkoumat, jak mohou tyto inovace posunout hranice v medicíně a přinést přínos nejen lékařům, ale především pacientům. Předkládaná disertační práce si klade za cíl prozkoumat a zhodnotit možnosti využití 3D analýzy a nových 3D technologií ve stomatologické a ortodontické praxi a poskytnout směr pro budoucí výzkum a vývoj v této oblasti. Specificky se zaměřuje na 3D analýzu a využití fialového laseru pro tvorbu 3D modelů a také červené a modré laserové diody při bělení zubů.

2. CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

2.1. Práce 1: Třiletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace

Cílem této práce je posoudit účinnost stereolitografických tištěných modelů ve srovnání s klasickými sádrovými odlitky v zubní praxi, konkrétně v oboru ortodoncie a protetiky. Zdůrazňuje integrační roli výpočetní inteligence a rostoucí význam technik 3D tisku v těchto oblastech. Studie představuje využití 3D skeneru k získání přesných dat zubního oblouku pacienta, včetně podrobných informací o anatomii zubů a okolních strukturách. Hlavním cílem je vyhodnotit, jak lze tato data převést do 3D modelu, a porovnat je se sádrovým modelem zubního oblouku pacienta. Hodnocení se zaměřuje na různé aspekty, jako je přesnost geometrických detailů, přesnost anatomických rysů a dlouhodobá kvalita povrchu.

2.2. Práce 2: Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů

Bělení zubů je jedním z nejčastějších stomatologických zákroků, protože estetika a barva zubů jsou důležité pro vzhled a sebevědomí pacienta (Kwon, Wertz, 2015). Tmavý odstín vychází z kombinace vnitřní barvy a vnějších skvrn, které se nacházejí na povrchu zubu. Cílem této studie bylo analyzovat vliv laserového záření, generovaného dvěma laserovými diodovými systémy, na aktivaci bělicího prostředku pro bělení odbarvených zubů. Druhým cílem našeho příspěvku bylo změřit stabilitu procesu bělení zubů včetně dlouhodobého digitálního sledování barvy.

3. METODIKA

3.1. Tříletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace

3.1.1. Studijní soubor

Naši studijní skupinu tvořilo 36 ortodontických pacientů léčených na ortodontickém oddělení Stomatologické kliniky dětí a dospělých 2. LF UK a FN Motol. Všichni pacienti podstoupili korektivní terapii fixním horním a dolním ortodontickým aparátem. Při vstupním a výstupním vyšetření u všech pacientů byla zhotovena standardní dokumentace pro dentální a skeletální analýzu, zahrnující přehledový snímek, telorentgenový snímek, dokumentační modely a extraorální a intraorální fotografie zachycující stav chrupu. Dle výsledného léčebného plánu podstoupili někteří pacienti extrakční terapii na lůžkovém oddělení Stomatologické kliniky dětí a dospělých 2. LF UK a FN Motol.

Ponechané extrahované zuby byly dále využity pro druhou část práce ohledně analýzy laserového bělení zubů. Celkově jsme získali 72 souborů dat klasických otisků a sádrových odlitků a 72 souborů dat 3D skenů a stereolitografických tištěných modelů jejich horních a dolních zubních oblouků. Data byla získána v průběhu ortodontické terapie pomocí skeneru 3Shape TRIOS 3. Před účastí ve studii poskytli vybraní pacienti informovaný souhlas podepsáním formuláře. Všichni účastníci byli celkově v dobrém zdravotním stavu a studie byla provedena v souladu s doporučeními Americké stomatologické asociace (ADA) a zásadami uvedenými v Helsinské deklaraci. Aby bylo zajištěno dodržování etických norem, museli pacienti poskytnout informovaný souhlas s klinickým vyšetřením, jak bylo uvedeno ve formuláři informovaného souhlasu. V průběhu studie byla přísně zachována důvěrnost a anonymita shromážděných údajů. Etický souhlas s výzkumem byl získán od etické komise (EK-973IGA 1.12/11). Kritéria pro zařazení do studie byla následující: nepřítomnost kariézních lézí a aktivních parodontálních onemocnění v zubních obloucích.

3.1.2. Analýza a měření

Konstrukce 3D zubních modelů zahrnuje dva hlavní principy: (i) použití tištěného 3D modelu vytvořeného z dat získaných 3D skenerem a (ii) použití sádrového modelu. Tyto modely se pak porovnávají pomocí laboratorního skeneru a příslušných softwarových nástrojů. Statistická vyhodnocení byla provedena ve výpočetním prostředí MATLAB 2022 (MathWorks, Boston, MA, USA).

Proces začíná nejprve získáním dat zubního oblouku pacienta pomocí 3D skeneru. Tento skener zachytí přesné detaily zubní anatomie a vytvoří digitální reprezentaci zubů a okolních struktur pacienta. Tato data se poté použijí k vytvoření 3D modelu, který lze vytisknout pomocí 3D tiskárny. Druhou tradiční metodou je vytvoření sádrového modelu zubního oblouku pacienta. To zahrnuje

pořízení otisku zubů pacienta pomocí dentálních materiálů, nejčastěji alginátu, a následné zalití otisku sádrou v laboratoři, čímž se vytvoří fyzický model.

Jakmile je k dispozici vytištěný 3D model i sádrový model, naskenují se pomocí laboratorního skeneru. Tento skener zachytí geometrické detaily a vlastnosti každého modelu a převede je do digitální podoby. Nakonec se digitální reprezentace vytištěného 3D modelu a sádrového modelu porovnají pomocí příslušných softwarových nástrojů. Tyto nástroje umožňují vyhodnocení různých aspektů, jako je přesnost, preciznost a anatomické detaily. Srovnání pomáhá posoudit kvalitu a spolehlivost vytištěného 3D modelu ve vztahu k tradičnímu sádrovému modelu. Pro zarovnání virtuálních odlitků byly provedeny úpravy pomocí algoritmu nejlepší shody v programu Autodesk Meshmixer 3.5 (Autodesk, Inc., San Rafael, Kaliforni, USA). Referenční síť (sádrový model) byla upravena tak, aby byla zřetelně větší než srovnávaná síť. Následně byly modely importovány do programu CloudCompare 2.13, kde byla provedena konečná jemná registrace pomocí algoritmu iterativního nejbližšího bodu (ICP). Nepřesnost virtuálních odlitků byla určena výpočtem vzdáleností mrak-síť pomocí metody střední kvadratické hodnoty:

$$RMS = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\sum_{i=1}^N D_i^2}$$

pro N rozdílů mrak-mrak $\{D_i\}_{i=1}^N$, vyhodnocených pro každý bod porovnávaného mraku, přičemž se hledá nejbližší trojúhelník v referenční síti.

Zubní modely byly uloženy pro dlouhodobou kontrolu ortodontické terapie. K posouzení změn mezi zubními modely byl použit laboratorní skener (AG Map 300; Amann Girrbach AG) k získání virtuálního odlitku. Pro tištěné modely byly použity dvě barevné varianty materiálu. Bílá varianta však vykazovala nadměrné odlesky, které bránily přímému zpracování laboratorním skenerem. V důsledku

toho byly ze studie vyloučeny všechny poškozené sádrové modely nebo tištěné modely, které vyžadovaly před skenováním zaprášení. Konečný soubor dat pro srovnání se skládal z 22 párů tištěných a sádrových modelů. Použitím tohoto postupu lze analyzovat a vyhodnotit výhody a omezení tištěného 3D modelu ve srovnání s konvenčním sádrovým modelem, což poskytuje cenné poznatky pro zubní lékaře a výzkumné pracovníky.

3.1.3. Stereolitografická tiskárna

V naší studii jsme použili 3D tiskárnu FormlabsForm 2, která využívá technologii stereolitografie. Tato tiskárna využívá fialový laser (405 nm) s výkonem 250 mW. Tiskárna pracuje na technologii stereolitografie s nízkou silou, která zahrnuje fokusovaný laserový paprsek, čočky a pohyblivá parabolická zrcadla, která bodově vytvrzují pryskyřici v pružné nádrži. Velikost použitého laserového bodu byla 140 mikronů. Pro naši studii jsme použili pryskyřici Dental SG Resin, biokompatibilní pryskyřici třídy 1. Každá vrstva vytištěného modelu měla výšku 50 μm a byla nepřetržitě vystavena laserovému světlu po dobu 5 s, přičemž datové body byly zaznamenávány každých 0,3 s. Laser byl přesně regulován dvěma galvanometry. Jak laserové světlo procházelo optickou dráhou, bylo vychylováno dvěma rychle oscilujícími, přesně vyladěnými zrcadly, která přesně nastavovala polohu laseru. Tento řídicí hardware umožnil laseru procházet konstrukční plošinou stovky až tisícekrát za sekundu se submilimetrovou přesností. Výška vrstvy se mohla pohybovat mezi 25 a 100 μm .

3.1.4. Analýza profilu a struktury povrchu

Podrobná analýza povrchu sádrových odlitků a modelů byla provedena pomocí skenovacího elektronového mikroskopu JSM 5500 LV (Jeol, Tokio, Japonsko) v režimu sekundárních elektronů po naprašování povrchu zlatem (JFC-1200 Fine

Coater, Jeol, Tokio, Japonsko). Rozdíly mezi SLA a sádrovými odlitky byly rovněž hodnoceny pomocí stereomikroskopu NIKON SMZ-2T připojeného k barevné videokameře Mintron (MTV-73X11P-R). Porovnávaný model (vytištěný) horní a dolní čelisti byl oříznut tak, aby obsahoval zuby a asi 5 mm měkkých tkání. Měření drsnosti probíhalo na profilometru Alpha Step IQ s délkou snímání 5 mm, silou stylusu 14,5 μm a rychlostí snímání 20 μms^{-1} . Diamantový hrot stylusu má poloměr 5 μm a úhel 60°. Průměrné hodnoty drsnosti (Ra) a střední kvadratické hodnoty (Rq) byly vypočteny v souladu s normou ISO 4288 s Gaussovými filtry s různými mezními hodnotami (25/80/250/800 μm). Pro získání reprodukovatelných výsledků bylo skenování provedeno na dvou místech v každém ze dvou na sebe kolmých směrů (ve směru růstu/otisku zubu a kolmo na něj) a každá linie byla měřena třikrát.

3.2. Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů

3.2.1. Mechanismus bělení

Mechanismus bělení zubů má tři fáze – vniknutí bělicí látky do struktury zubu; interakci s molekulami skvrn a poslední je změna odrazu světla na povrchové struktuře zubu (Kwon, Wertz, 2015). Transparentnost, průsvitnost a opalescence jsou zásadní při výběru barvy a tvoří základ jednotlivých barevných odstínů. Také tloušťka skloviny a dentinu hraje významnou roli hlavně ve věku pacienta, kdy starší pacienti mají tmavší barvu zubů. Vnější skvrny na povrchových barevných oblastech jsou ovlivněny špatnou hygienou, stravou, kouřením atd. (Dostálová et al., 2020). Možné nevýhody bělicích prostředků mohou zahrnovat zvýšené demineralizace zubů, zdrsnění nebo změkčení povrchu zubů a také degradace zubních náhrad. Tento proces může vést k nepříjemné citlivosti zubů a podráždění dásní. Je známo, že pacienti dávají přednost rychlejším výsledkům, a proto lze

bělící systém aktivovat pomocí tepelných nebo světelných zdrojů. Světlo může bělicí proces urychlit a vyšší teplota zvyšuje rozklad volných radikálů, který vede k oxidaci složitých organických molekul. Existuje mnoho typů světelných aktivačních zdrojů, například halogenové lampy, světelné diody, plazmové obloukové lampy a lasery. Účinnost každého systému se liší a musí být hodnocena samostatně (Maran et al., 2019). Bylo také potvrzeno, že fotobiomodulace pomocí nízkourovňové laserové terapie může mít pozitivní účinky nejen na proces bělení, ale má také slibný efekt při prevenci citlivosti po bělení (Carneiro et al., 2022; Maran et al., 2019).

3.2.2. Příprava vzorku

Studie zahrnovala dvacet zdravých lidských horních středních řezáků a premolárů extrahovaných účastníkům/pacientům obou pohlaví ve věku minimálně 18 let. Důvodem byly ortodontické nebo pouřazové stavy. Etický souhlas se studií byl získán od univerzitní etické komise. Vylučovací kritéria byla následující: zubní kaz, zlomenina zubu, tetracyklinová skvrna, fluoróza a zuby bez pulpy.

3.2.3. Techniky chemického bělení a měření barvy

V experimentu byl použit 16% karbamid peroxid (Yotuel Biocosmetic laboratories). Přípravek byl ve formě gelu. Postup bělení měl následující kroky: předoperační fotografický záznam; mechanické odstranění plaku – pemza, očištění alkoholem a vysušení; pokrytí poloviny zubu aplikací gelu ve vrstvě 1–2 mm; bylo kontrolováno měření času bělicího procesu a na konci experimentu byl bělicí gel odstraněn vodou. Poté byla přímo změřena plocha každého zubu pomocí hrotu ruční sondy Easyshade. Proměření odstínu zubů byl použit spektrofotometr Vita Easyshade (VITA Zahnfabrik). Tento systém měří spektrální křivku odrazivosti nebo propustnosti zubu. Světlo je uvolňováno ze zdroje světla ve spektrofotometru a poté rozptylováno hranolem do spektra různých vlnových

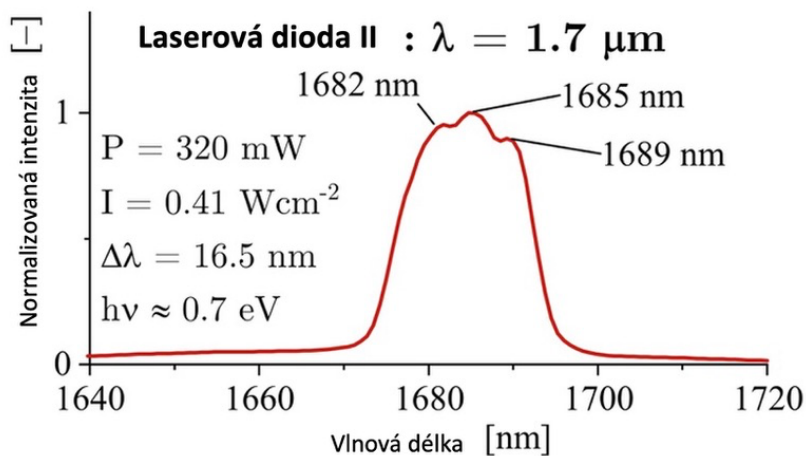
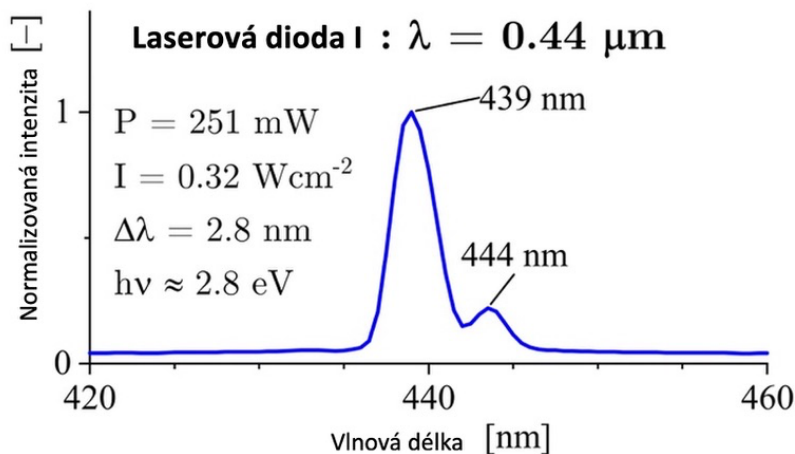
délek v rozmezí 380–780 nm. Po kalibraci přístroj měří změnu množství světla odraženého od vzorku pro každou vlnovou délku ve viditelném spektru světla a převádí data na číselné hodnoty. Tyto hodnoty jsou přiřazeny k odstínům zubů definovaným podle systému odstínů VITA 3D-MASTER. Reprezentace tohoto systému je zobrazena v podobě vzorkovnice VITA Toothguide 3D-MASTER (Ragain, 2016).

3.2.4. Laserové zdroje

V tomto experimentu byly jako zdroj záření použity dvě laserové diody, z nichž jedna (označená I) generovala záření o vlnové délce přibližně 0,44 μm (modrá část viditelného spektra) a druhá (označená II) záření o vlnové délce 1,7 μm (blízká infračervená část spektra). Každá dioda byla spojena s vláknem s numerickou aperturou vlákna $NA = 0,44$ a průměrem jádra vlákna $d = 400 \mu\text{m}$. Záření z vlákna bylo sbíráno a kolimováno pomocí jediného objektivu s ohniskovou vzdáleností $f = 40 \text{ mm}$. Kolimované záření pak procházelo hliníkovou clonou o průměru 1 cm, čímž se definovala plocha průřezu svazku $A = 0,79 \text{ cm}^2$, a tedy i energetický tok za jednotku času, zde označovaný jako intenzita záření I (ve wattech na jednotku plochy). Každý zub byl umístěn do kolimovaného svazku ve vzdálenosti 5 cm od apertury. Obě laserové diody pracovaly v režimu kontinuálních vln (CW).

Spektrum laserové diody v pracovním bodě bylo měřeno pomocí mřížkového spektrometru StellarNet BLUE-wave pro diodu o vlnové délce 0,44 μm a mřížkového spektrometru StellarNet Dwarf-star pro diodu o vlnové délce 1,7 μm . Výsledná emisní spektra laserových diod jsou zobrazena na obrázku 1. Vícenásobně špičatý charakter spekter by neměl mít na experiment žádný vliv. Modrá laserová dioda má kratší vlnovou délku, což odpovídá vyšší energii fotonů $h\nu$. Výstupní výkon laseru dopadající na zub (po průchodu kolimující čočkou a

aperturou) byl měřen pomocí sondy Molectron PM3 a wattmetru FieldMate firmy Coherent. Podle výsledků z oddílu 4.2. byl výkon laseru CW nastaven na 250 mW pro laserovou diodu I ($\lambda = 0,44 \mu\text{m}$) a 320 mW pro laserovou diodu II ($\lambda = 1,7 \mu\text{m}$).



Obr. 1 Emisní spektra a základní parametry záření laserových diod použitých v experimentu. P je výstupní výkon a I je odpovídající intenzita záření. $\Delta\lambda$ je šířka čáry emisního spektra a $h\nu$ je energie fotonu

Po průchodu kolimující čočkou a aperturou byl změřen profil paprsku laserové diody pomocí kamery Spiricon IV Pyrocam pro záření $1,7 \mu\text{m}$, resp. kamery WinCamD pro záření $0,44 \mu\text{m}$. Oba laserové paprsky měly vícemódový příčný profil intenzity, jak naznačují jednorozměrné průřezy, oba paprsky se blížily

plochému profilu, tj. nevyskytovaly se v nich žádné výrazné vrcholy intenzity. Provedený ohřev lze tedy považovat za dostatečně prostorově rovnoměrný. Pro každý ozařovací experiment byl elektrický proud protékající laserovou diodou nastaven tak, aby generoval výstupní výkon, který vedl k ohřevu vnitřního zubu v rámci bezpečné meze, jak je popsáno v části 3.2.5.

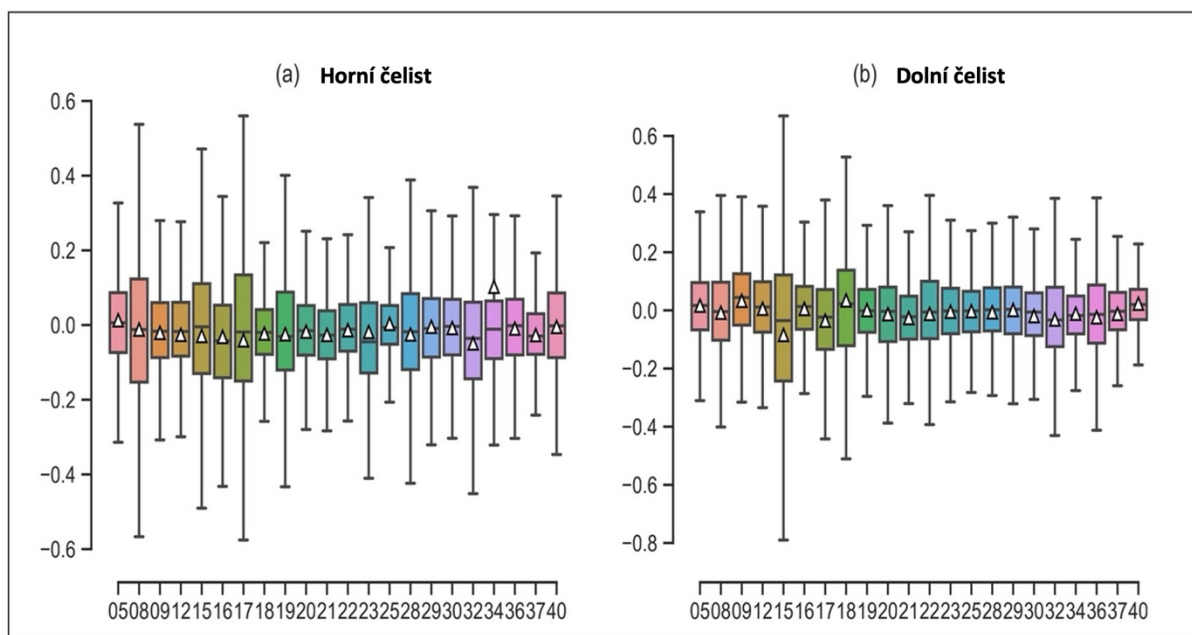
3.2.5. Zkoumání teploty zubů

Před experimenty s bělením zubů byla provedena řada měření za účelem určení výstupního výkonu laseru, kterým by se v zubu vytvořilo bezpečné množství tepla. Cílem bylo zajistit, aby se teplota kořene nezvýšila nad 5,5 °C v průběhu ozařování, které bylo nastaveno na 100 s. Na základě předchozích výzkumů lze hodnotu 5,5 °C považovat za prahovou teplotu, při jejímž překročení by mohlo dojít k trvalému poškození kořene nebo zubní dřeni (Mondelli et al., 2016). Pro tento účel byla k dispozici pomocná sada zubů, která měla z boku, nebo ze spodní strany vyvrtaný otvor (o průměru 1–2 mm) a která byla vyplněná tepelně kontaktní pastou. Zuby byly následně ozařovány po dobu 100 s a teplota uvnitř zubu byla měřena sondou termočláňkového teploměru GMH 3210 vloženého do otvoru. Intenzita laseru byla upravována mezi každým ozářením, dokud naměřená změna teploty ΔT pro různé testované zuby nebyla konzistentně pod 5,5 °C. Protože zuby byly během experimentu chlazeny pouze vzduchem, zvýšení teploty in vivo by bylo pravděpodobně ještě nižší. Pro danou experimentální konfiguraci bylo nastavení výkonu laseru, které trvale vedlo k zahřátí pod 5,5 °C (během 100 s ozařování) 250 mW pro laserová dioda I ($\lambda = 0,44 \mu\text{m}$) a 320 mW pro laserovou diodu II ($\lambda = 1,7 \mu\text{m}$).

4. VÝSLEDKY

4.1. Třiletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace

Vyhodnocení srovnání sádrového odlitku a virtuálních povrchů bylo provedeno na základě počtu datových bodů. Při každém experimentu bylo získáno v průměru 231 178 bodů pro každou dvojici datových sad. Výsledky pro horní a dolní čelist 22 jedinců jsou znázorněny na obrázku 2, kde je uveden medián a 25. a 75. percentil.

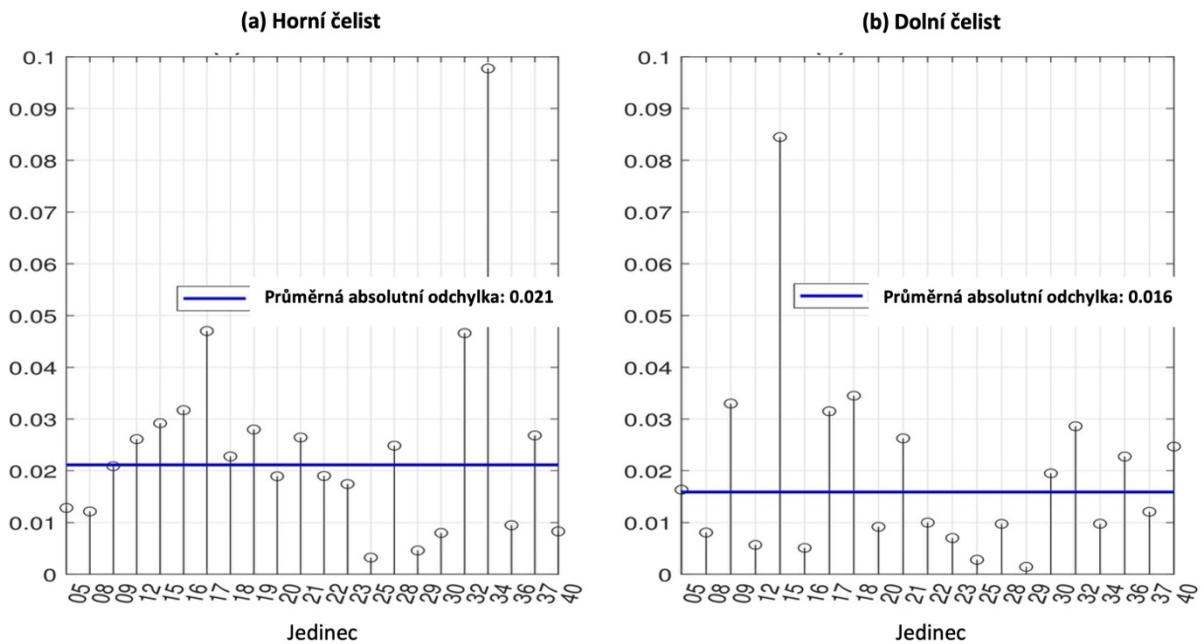


Obr. 2 Medián a 25 a 75 percentily (a) horní a (b) dolní čelist 22 zkoumaných jedinců

4.1.1. Hodnocení přesnosti klasického a 3D modelu

V tabulce 2 je uvedeno podrobné srovnání povrchů sádrového odlitku a virtuálního modelu pro 22 osob. Obsahuje počet datových bodů, absolutní

hodnoty průměrných rozdílů a směrodatné odchylky pro horní a dolní čelist. Výsledky tohoto srovnání jsou po odstranění hrubých chyb znázorněny na obrázku 3. Analýza byla provedena na základě průměru 231 178 datových bodů.



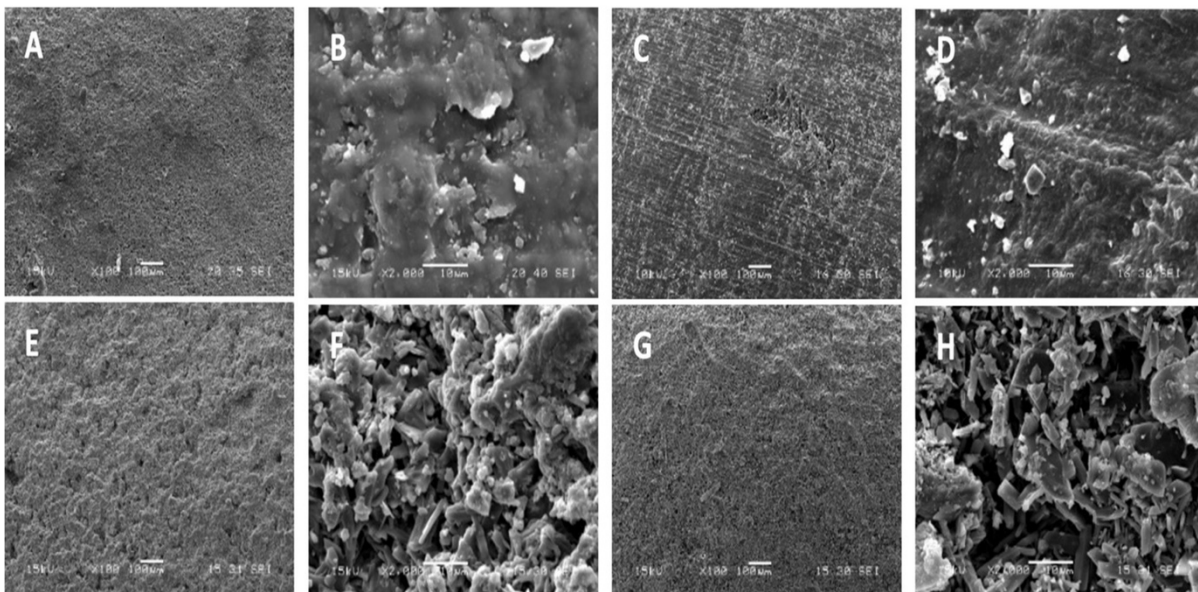
Obr. 3 Porovnání absolutní odchylky mezi sádrovými a virtuálními modely (a) horní a (b) dolní čelist 22 jedinců

Zjištění ukazují na vyšší míru shody u dolní čelisti s průměrným rozdílem 0,0152 mm ve srovnání s horní čelistí, kde byl průměrný rozdíl 0,0211 mm. Směrodatné odchylky s průměrnou hodnotou 0,17 mm jsou podobné pro horní i dolní čelist.

4.1.2 Charakteristika profilu a struktury povrchu: Analýza zubních modelů

Skenovací elektronová mikroskopie odhalila u sádrových modelů zrnitou strukturu povrchu s ostrými hranami ortorulových krystalů (obr. 4). Nedokonalý povrch je jasně patrný, přičemž nejvýraznější změny byly pozorovány při větším zvětšení. Po třech letech skladování sádrové modely vykazovaly částečnou

destrukci povrchu, což ztěžovalo jejich opětovné použití pro výrobu nových retenčních dlah. Mezi hlavní nedostatky patří tvorba bublin, povrchová kavitace a průběžná depolymerizace plastového povrchu. Mezi modely horní a dolní čelisti nebyly zjištěny žádné významné rozdíly.



Obr. 4 Degradace povrchu po 3 letech skladování pro dlouhodobou kontrolu ortodontické terapie. A: horní tištěný model (zvětšení 100×); B: horní tištěný model (zvětšení 2000×); C: spodní tištěný model (zvětšení 100×); D: spodní tištěný model (zvětšení 2000×); E: horní sádrový odlitek (zvětšení 100×); F: horní sádrový odlitek (zvětšení 2000×); G: spodní sádrový odlitek (zvětšení 100×); H: spodní sádrový odlitek (zvětšení 2000×)

Na druhou stranu se povrch SLA jevil homogennější a hladší a viditelné byly pouze zbytky vrstveného polymeru. Model jsme mohli opakovaně použít pro výrobu retainerů.

4.2. Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů

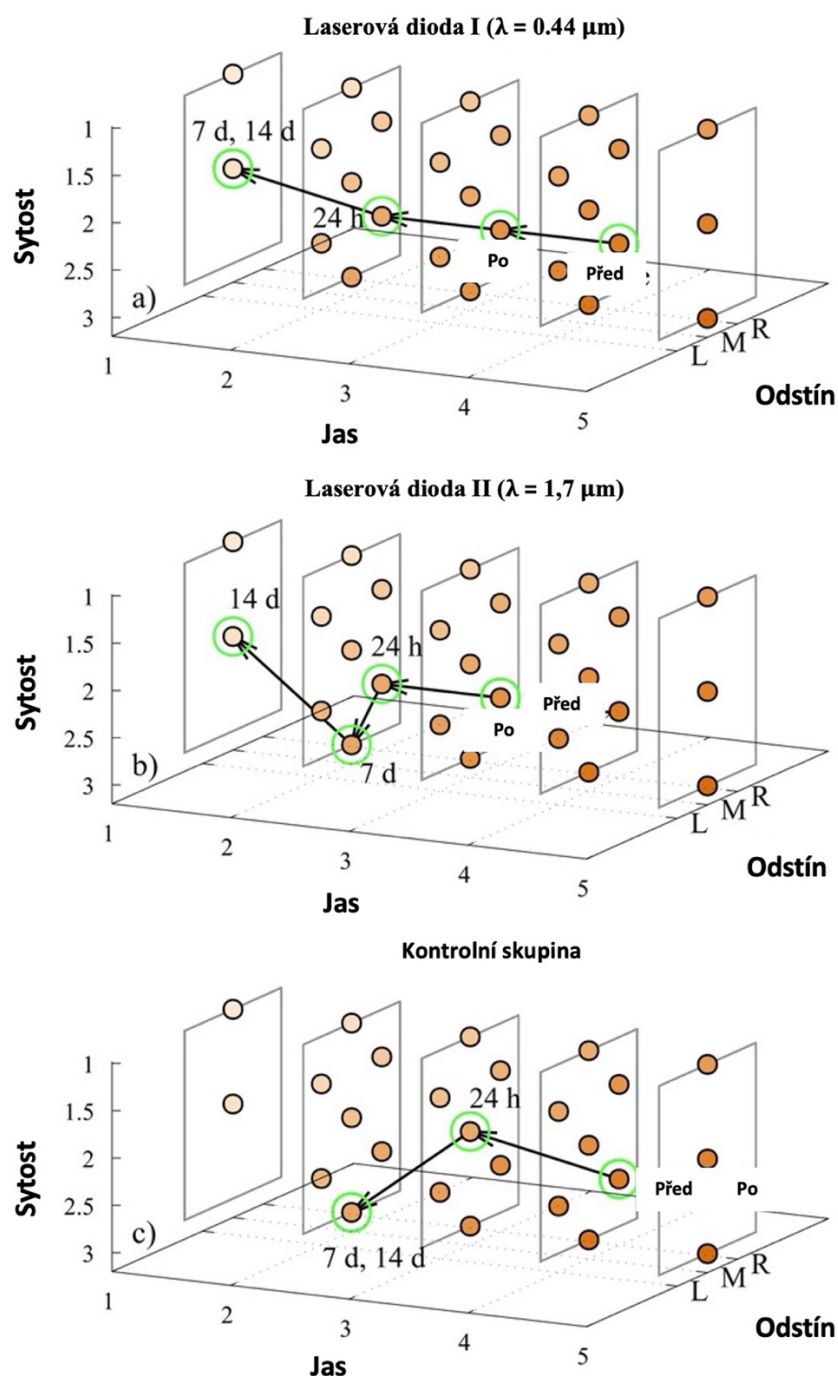
Světlost, barva a odstín jsou charakteristiky, které se používají pro definici barvy v rozsahu přirozených odstínů zubů, které tvoří malou část žlutočervené barevné škály. Bylo prokázáno, že barvy lze jednoznačně kvantitativně popsat určením číselných hodnot pro tři vzájemně nezávislé prvky: jas (Value), sytost (Chroma) a odstín (Hue) (Hampé-Kautz et al., 2020). Tato práce používá systém odstínů VITA 3D-MASTER (Hassel et al., 2013), podle kterého je odstín zubu určen následujícími diskrétními kombinacemi hodnot světlosti, barevnosti a odstínu. Hodnota jasu popisuje, jak intenzivní je světlá nebo tmavá barva. Stupnice jasu dosahuje pěti diskrétních bodů od 1 (světlý) do 5 (tmavý). Tento rozměr barvy může existovat sám o sobě. Odstín popisuje barvu zubu od červené po žlutou, bílou atd. Ve vzorkovnici VITA Toothguide se hodnoty pohybují v rozmezí od L (žlutá) přes M (střední) až po R (načervenalá). Barva zubu může být např. více nažloutlá ve srovnání s jiným vybraným vzorkem odstínu. Chroma (sytost) definuje sílu nebo dominanci odstínu. Ve vzorkovnici VITA Toothguide se chroma se pohybuje od 1 (nízké nasycení) do 3 (vysoké nasycení) na pětistupňové škále.

V naší studii byly hodnoceny tři následující skupiny vzorků:

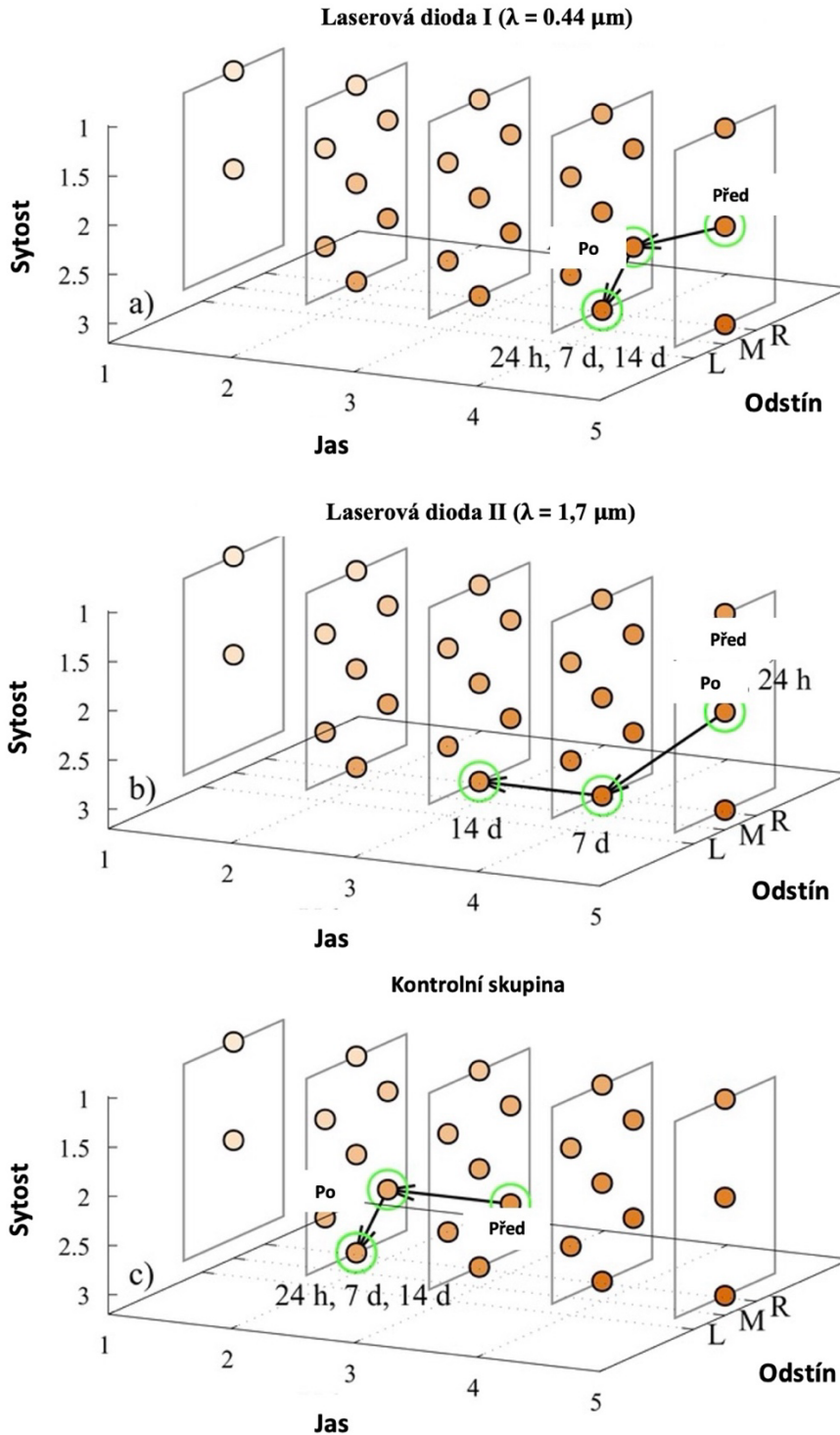
- Gel-16% karbamidperoxid + laserová dioda I generující záření v modré části viditelného spektra - vlnová délka $\lambda = 0,44 \mu\text{m}$;
- Gel-16% karbamidperoxid + laserová dioda II generující záření v blízké infračervené části spektra - vlnová délka $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$;
- Kontrolní skupina - pouze gel-16% karbamidperoxid;

Výsledky procesu bělení jsou znázorněny na 3D grafech (obrázky 5 a 6). Možné kombinace sytosti, světlosti a odstínu tvoří diskrétní trojrozměrný prostor, v němž

jsou naměřené hodnoty přiřazeny danému zubu v časech před ošetřením a bezprostředně po něm, 24 h, 7 dní a 14 dní po ošetření. Body na barevném prostoru odpovídají odstínům ve vzorkovníku VITA Toothguide 3D-MASTER. Obrázek 5 (a) ukazuje bezprostřední účinek modré laserové diody I ($\lambda = 0,44 \mu\text{m}$) na proces bělení v průběhu prvních 7 dnů a dokládá, že tento proces je stabilní i po 14 dnech a odstín zubu se dále zesvětluje s celkovou změnou z 4R2,5 na 1M1. Celkově se hodnota světlosti zlepšila ze 4 na 1. Odstín se změnil z červené na střední a jeho sytost se snížila z 2,5 na 1,5. Obrázek 5 (b) ukazuje, že záření laserové diody II ($\lambda = 1,7 \mu\text{m}$) mělo nízký bezprostřední vliv na proces bělení (před a po), ale v pozdějším období došlo k významnému bělicímu účinku, a to až do 14 dnů. Byl pozorován pokles hodnoty (zvýšení světlosti) až na 1. Změna odstínu byla podobná jako v případě (a). Obrázek 5 (c) ukazuje výsledky pro vzorek kontrolní skupiny, kde bylo bělení prováděno pouze aplikací gelu na zubní sklovinu. Účinek bělení byl méně výrazný: hodnota byla světlejší (ze 4 na 2), sytost se po 24 hodinách mírně snížila z 2,5 na 2 a odstín se změnil z R na M. Obrázek 6 ukazuje dlouhodobý účinek laserové diody ozařování 14 dní po procesu bělení. Výsledky naznačují, že dochází k dlouhodobému bělicímu účinku (po 7 nebo dokonce 14 dnech), který je možná patrnější v případě blízkého infračerveného záření LD II (obrázek 6 (b), na rozdíl od modrého LD I a případy neaktivovaného bělení (obrázky 6 (a) a (c)). Bylo pozorováno, že použití pouze 16% peroxidu karbamidu bylo účinné hlavně krátkodobě po ošetření a výsledný odstín byl pak stabilní.



Obr. 5 Grafické znázornění výsledků stanovení barvy zubů. U daného zubu byl odstín měřen pětkrát: před a bezprostředně po ošetření a poté 24 hodin, 7 dní a 14 dní po ošetření. Zobrazeny jsou: (a) vzorek 7 ozářený laserovou diodou I ($\lambda = 0,44 \mu\text{m}$), (b) vzorek 11 ozářený laserovou diodou II ($\lambda = 1,7 \mu\text{m}$) a (c) vzorek 4 z kontrolní skupiny. Graf ukazuje typické úspěšné výsledky bělicí procedury.



Obr. 6 Grafické znázornění výsledků stanovení barvy zubů. Zobrazeny jsou: (a) vzorek 15 ozářený laserovou diodou I ($\lambda = 0,44 \mu\text{m}$), (b) vzorek 3 ozářený laserovou diodou II ($\lambda = 1,7 \mu\text{m}$) a (c) vzorek 6 z kontrolní skupiny. Graf ukazuje typické pozorované dlouhodobé účinky každého léčebného přístupu.

5. DISKUZE

5.1. Třiletá prospektivní studie srovnávající modely vytištěné stereolitografií s klasicky otiskovanými a sádrovými modely v ortodontické terapii: 3D objektivizace

Cílem této studie bylo posoudit účinnost modelů vytištěných stereolitografií ve srovnání s tradičními sádrovými odlitky v zubní praxi. Využití výpočetní inteligence, rozšířené reality a technik 3D tisku si získalo oblibu v ortodoncii, protetice a maxilofaciální chirurgii.

K vyhodnocení rozdílů mezi zubními modely byl použit laboratorní skener k získání odlitků, které byly následně upraveny a předrovnány pomocí příslušného softwaru. Konečná jemná registrace byla provedena pomocí iterativního algoritmu nejbližšího bodu, který usnadňuje vyhodnocení vzdáleností mezi mrakem a sítí tištěného modelu. Bylo zjištěno, že SLA výtisky vykazují ve srovnání se sádrovými odlitky hladší povrch, ačkoli při vyšším rozlišení se projevíly tloušťky vrstev (Dostálová et al., 2018). Tento jev lze přičíst nehomogenní povaze sádrových odlitků, které se vyznačují zrnitou strukturou povrchu s ostrými hranami ortorulových (Dostálová et al., 2022). Zjištění jsou v souladu s (Tahayeri et al., 2018), která uvádí, že intenzita laserové tiskárny je ovlivněna barvou (šedá a bílá pryskyřice) a tloušťkou vrstvy (optimální je přibližně 100 μm). V naší studii se potvrdilo, že po třech letech se povrch sádrového odlitku stal hladším, s odlomenými krystaly a zjevnými známkami dlouhodobého otěru. Na druhou stranu stereolitografie vytvořila odlišný povrch modelu, který se vyznačoval hladkým depolymerizováním plastického povrchu. Tento model bylo navíc možné použít vícekrát bez ztráty přesnosti. Výsledky 22 experimentálních sad prokázaly těsnou shodu mezi sádrovým odlitkem a virtuálním povrchem s průměrným absolutním rozdílem 0,018 mm a směrodatnou

odchylkou 0,17 mm. Tato měření vycházela z průměru 231 178 datových bodů pro každé srovnání. Model dolní čelisti vykazoval větší přesnost, což bylo způsobeno použitím méně složité skenovací technologie a jednodušší anatomické struktury. Průměrný absolutní rozdíl mezi modely dolní čelisti byl 0,016 mm, zatímco modely horní čelisti vykazovaly mírně vyšší rozdíl 0,021 mm. Tato zjištění zdůrazňují pozoruhodnou účinnost modelů vytištěných stereolitografií ve srovnání s tradičními sádrovými odlitky.

5.2. Modrý (0,44 μm) a červený (1,7 μm) diodový laser aktivovaný bělením – stanovení změny odstínu zubů

Práce zkoumá laserem aktivované bělení zubů. Přestože se jedná o kosmetický zákrok, jeho náročnost roste. Kromě účinnosti při změně odstínu je kladen důraz na rychlost zákroku a jeho bezpečnost a zdraví zubů. Z těchto důvodů může být laserová aktivace standardních bělicích činidel prospěšná pro svůj potenciál urychlit proces, zpracovat a omezit dobu expozice tkáně bělicímu činidlu. Kombinace prostředku pro bělení zubů s ozařováním laserovým světlem zlepšila účinnost léčby. Tato metoda nejen zesiluje bělicí účinek, ale také umožňuje menší ovlivnění struktury skloviny (Son et al., 2012). Tento systém může také snížit vedlejší účinky peroxidu vodíku a karbamidperoxidu, tedy citlivost zubů (Giachetti et al., 2010) v důsledku potenciálního tepelného poškození zubní dřevě (Panhóca et al., 2016). Obě laserové diody, modrá a blízká infračervené, byly prakticky užitečné během procesu bělení. Obecně bylo zjištěno, že laserem aktivované bělení zlepšuje naměřenou hodnotu světla a posouvá měřený odstín z načervenalého na střední. Konečná světlost vzorku dosáhla až hodnoty 1. Modrá laserová dioda se jevila pro proces bělení efektivněji, pravděpodobně díky vyšší fotonové energii odpovídající kratší vlnové délce laserového světla. Bylo by přínosné porovnat vliv jiných vlnových délek laseru v budoucích experimentech. Přestože laserové ozařování ohřívá zub, bylo zjištěno, že výstupní výkon laseru je

nastavitelný, takže se tento postup jeví jako účinný, aniž by byla překročena teplota prahu poškození kořene zubu (viz část 3.2.5.). V tomto experimentu byla tato teplota nastavena na 5,5 °C podle (Mondelli et al., 2016) a tento práh nebyl překročen.

6. ZÁVĚR

Digitální technologie se staly nedílnou součástí stomatologie. Například aditivní výroba zaznamenala od konce 20. století významný pokrok. Trojrozměrný tisk nabízí řadu výhod, pokud jde o zjednodušení výroby, snížení účasti personálu a zvýšení efektivity pracovních postupů. V oblasti medicíny způsobil 3D tisk revoluci ve výrobě lékařských modelů, umístování implantátů, protetice a ortodoncii. Dále laserové bělení zubů je inovativní kosmetický postup v oblasti zubního lékařství. Tato metoda využívá laserového záření k aktivaci bělicích činidel na zubech. Díky přesnému řízení intenzity a směřování laseru může být proces bělení efektivnější a bezpečnější. Laserové bělení také často nabízí rychlejší výsledky a snižuje možnost citlivosti zubů po ošetření. S využitím výpočetní inteligence a technologií 3D tisku s laserovým tvrzením modelů první práce zkoumala 22 ortodontických pacientů a zjistila, že SLA výtisky nabízejí hladší povrch ve srovnání se sádrovými odlitky. Toto pozorování bylo podpořeno porovnáním povrchů po třech letech, kde se ukázalo, že sádrové odlitky vykazují známky otěru a depolymerizace, zatímco SLA modely si udržují preciznost i po opakovaném použití. Výsledky měření prokázaly těsnou shodu mezi sádrovými odlitky a virtuálním povrchem. Celkově lze konstatovat, že SLA technologie přináší v oblasti ortodoncie, protetiky a maxilofaciální chirurgie pozoruhodnou účinnost a přesnost ve srovnání s tradičními metodami. Integrací výpočetní inteligence, rozšířené reality a technik 3D tisku do stomatologické praxe mohou lékaři dosáhnout vyšší přesnosti, kratších výrobních časů a lepších zkušeností pacientů. Tato zjištění jsou v souladu s rostoucím trendem zavádění pokročilých

technologií k optimalizaci plánování léčby a výsledků v ortodoncii, protetice a čelistní chirurgii. Další práce vyhodnotila, že laserem aktivované bělení zubů představuje pokročilý kosmetický postup s mnoha výhodami. Vedle zdůraznění změny se zaměřuje na klíčové aspekty, jako je rychlost provedení, bezpečnost a zachování zdraví zubů. Laserová aktivace standardních bělicích činidel se ukázala jako prospěšná při zrychlení procesu a minimalizaci expozice tkáně bělicímu činidlu. Precizní nasměrování laserového záření a možnost regulace intenzity přináší další vrstvu kontroly nad postupem. Kombinace bělicích prostředků s laserovým ozařováním nejen zvyšuje účinnost léčby, ale také minimalizuje vedlejší účinky spojené s citlivostí zubů. Výsledky experimentu ukázaly, že modrá laserová dioda může být efektivnější díky vyšší fotonové energii. Celkově lze tuto metodu považovat za účinný a bezpečný způsob bělení zubů s možností další optimalizace pomocí experimentů s jinými vlnovými délkami laseru.

3D analýza dentálních a skeletálních změn ve stomatologické a ortodontické terapii je klíčovým nástrojem pro posouzení efektivity léčby, vyšší přesnosti diagnostiky, lepšího plánování léčby a dosažení optimálních výsledků u pacientů. Závěrem lze konstatovat, že spojením výpočetní inteligence a technologií 3D tisku s laserovým tvrzením modelů a pokročilým laserem aktivovaným bělením zubů je možné dosáhnout revolučních inovací v oblasti stomatologie. Integrace těchto technologií do stomatologické praxe slibuje zvýšení přesnosti, snížení výrobních časů a zlepšení zkušeností pacientů. Budoucí výzkum a implementace těchto metod mají potenciál posunout hranice zubní péče ještě dál, přinášejíc nové možnosti pro lékaře i pacienty.

7. SOUHRN

V současné koncepci zubní a ortodontické péče o pacienty je důležitý komfort a kvalita ošetření. 3D analýza a 3D technologie přináší významný krok ke splnění obou požadavků. Důraz také kladou pacienti na estetický výstup a jeden z nejčastějších požadavků v zubní a ortodontické ordinaci je bílý a zářivý úsměv pomocí dentálního bělení. Tato práce předkládá komplexní přehled tříleté prospektivní studie, která používá přístup 3D objektivizace k porovnání modelů vytištěných stereolitografií a vytvrzených laserem a sádrovými modely v ortodontické terapii. Důležitá výhoda těchto nových metod spočívá v možnosti využití pokročilé technologie skenování a matematického modelování také pro plánování léčby, měření v průběhu terapie a její hodnocení. Snižuje se také problém skladování plastového a polymerního odpadu. Tato studie prokazuje výjimečnou přesnost a efektivitu modelů vytištěných technologií SLA ve srovnání s klasickými sádrovými odlitky. Další část práce zkoumá laserem aktivované bělení zubů, přičemž zdůrazňuje rostoucí náročnost tohoto kosmetického postupu. Vedle efektivity změny odstínu klade důraz na rychlost zákroku, bezpečnost a zachování zdraví zubů. Laserová aktivace bělicích činidel se jeví jako prospěšná možnost díky schopnosti urychlit proces a omezit dobu expozice tkáně bělicímu činidlu. Tuto metodu podporuje možnost přesného řízení laserového záření a regulace intenzity ohřevu zařízením. Kombinace bělicích prostředků s laserovým ozařováním nejen zvyšuje účinnost léčby, ale také minimalizuje ovlivnění struktury skloviny. Použití obou laserových diod, modré a blízké infračervené, během procesu bělení bylo prakticky úspěšné, což vedlo ke zlepšení naměřených hodnot světla a posunu odstínu od načervenalého k střednímu. Tato inovativní metoda navíc snižuje vedlejší účinky peroxidu vodíku a karbamidperoxidu, včetně citlivosti zubů, díky minimalizaci potenciálního tepelného poškození zubní dřeně.

8. SUMMARY

In the current concept of dental and orthodontic patient care, comfort and quality of treatment are important. 3D analysis and 3D technology brings a significant step towards meeting both requirements. Patients also place emphasis on the aesthetic outcome, and one of the most common requests in dental and orthodontic offices is a white and bright smile through dental whitening. This paper presents a comprehensive review of a three-year prospective study that uses a 3D objectification approach to compare stereolithography-printed models hardened by laser with plaster models in orthodontic therapy. An important advantage of these new methods is the ability to use advanced scanning technology and mathematical modelling for treatment planning, measurement during therapy and evaluation. The problem of storage of plastic and polymer waste is also reduced. This study demonstrates the exceptional accuracy and efficiency of SLA-printed models compared to conventional plaster casts. The next part of the thesis examines laser-activated teeth whitening, highlighting the increasing complexity of this cosmetic procedure. In addition to the effectiveness of shade change, it emphasizes the speed of the procedure, safety and preservation of dental health. Laser activation of bleaching agents appears to be a beneficial option due to its ability to speed up the process and limit the time of tissue exposure to the bleaching agent. This method is supported by the ability to precisely control the laser radiation and regulate the heating intensity of the device. The combination of bleaching agents with laser irradiation not only increases the effectiveness of the treatment, but also minimizes the impact on the enamel structure. The use of both laser diodes, blue and near-infrared, during the bleaching process was virtually successful, resulting in an improvement in the measured light values and a shift in shade from reddish to medium. In addition, this innovative method reduces the side effects of hydrogen peroxide and carbamide peroxide, including tooth sensitivity, by minimizing potential thermal damage to the dental pulp.

9. LITERATURA

1. *3D Anatomic Modeling Laboratories - Overview - Mayo Clinic*. Získáno 16. prosinec 2023, z <https://www.mayoclinic.org/departments-centers/anatomic-modeling-laboratories/overview/ovc-20473121>
2. Abad-Coronel, C., Valdiviezo, P., & Naranjo, O. B. (2019). Intraoral Scanning Devices Applied in Fixed Prosthodontics. *ACTA SCIENTIFIC DENTAL SCIENCES*, 3, 2581–4893. <https://doi.org/10.31080/ASDS.2019.03.0568>
3. Ahlholm, P., Sipilä, K., Vallittu, P., Jakonen, M., & Kotiranta, U. (2018). Digital Versus Conventional Impressions in Fixed Prosthodontics: A Review. *Journal of prosthodontics : official journal of the American College of Prosthodontists*, 27(1), 35–41. <https://doi.org/10.1111/JOPR.12527>
4. Ahmad, I., & Al-Harbi, F. (2019). Intra-oral Digital Acquisition. *3D Printing in Dentistry 2019/2020*, 21–46.
5. Al-Jubouri, O. M., & Azari, A. (2015). *An introduction to dental digitizers in dentistry ; systematic review*.
6. Al-Nadawi, M., Kravitz, N. D., Hansa, I., Makki, L., Ferguson, D. J., & Vaid, N. R. (2021). Effect of clear aligner wear protocol on the efficacy of tooth movement:: A randomized clinical trial. *The Angle Orthodontist*, 91(2), 157. <https://doi.org/10.2319/071520-630.1>
7. Amornvit, P., Rokaya, D., & Sanohkan, S. (2021). Comparison of Accuracy of Current Ten Intraoral Scanners. *BioMed research international*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2673040>
8. Arjmand, B., Khodadost, M., Sherafat, S. J., Tavirani, M. R., Ahmadi, N., Moghadam, M. H., Okhovatian, F., Tavirani, S. R., & Rostami-Nejad, M. (2021). Low-Level Laser Therapy: Potential and Complications. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 12, 1–4. <https://doi.org/10.34172/JLMS.2021.42>
9. Aswani, K., Wankhade, S., Khalikar, A., & Deogade, S. (2020). Accuracy of an intraoral digital impression: A review. *Journal of Indian Prosthodontic Society*, 20(1), 27–37. https://doi.org/10.4103/JIPS.JIPS_327_19
10. Baldassarre, F., & Ricciardi, F. (2017). The Additive Manufacturing in the Industry 4.0 Era: The Case of an Italian FabLab. *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, 1(1), 105–115. www.etimm.ase.ro

11. Beaman, J. J., Barlow, J. W., Bourell, D. L., Crawford, R. H., Marcus, H. L., & McAlea, K. P. (1997). Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing. *Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6327-3>
12. Beckman, A. O., Gallaway, W. S., Kaye, W., & Ulrich, W. F. (1977). History of Spectrophotometry at Beckman Instruments, Inc. *Analytical Chemistry*, 49(3). https://doi.org/10.1021/AC50011A001/ASSET/AC50011A001.FP.PNG_V03
13. Bentley, C., Leonard, R. H., Nelson, C. F., & Bentley, S. A. (1999). Quantitation of vital bleaching by computer analysis of photographic images. *Journal of the American Dental Association* (1939), 130(6), 809–816. <https://doi.org/10.14219/JADA.ARCHIVE.1999.0304>
14. Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93–103. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.04.054>
15. Campos, S. F. F., César, I. C. R., Munin, E., Liporoni, P. C. S., & Do Rego, M. A. (2007). Analysis of photoreflectance and microhardness of the enamel in primary teeth submitted to different bleaching agents. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 32(1), 9–12. <https://doi.org/10.17796/JCPD.32.1.N427315267X36261>
16. Carl Deckard Selected for AMUG Innovators Award - Additive Manufacturing (AM). Získáno 20. září 2023, z <https://additivemanufacturing.com/2016/11/03/carl-deckard-selected-for-amug-innovators-award/>
17. Carneiro, A. M. P., Barros, A. P. O., de Oliveira, R. P., de Paula, B. L. F., Silva, A. M., de Melo Alencar, C., & Silva, C. M. (2022). The effect of photobiomodulation using low-level laser therapy on tooth sensitivity after dental bleaching: a systematic review. *Lasers in Medical Science*, 37(7), 2791–2804. <https://doi.org/10.1007/S10103-022-03578-0/METRICS>
18. Cartagena, A. F., Parreiras, S. O., Loguercio, A. D., Reis, A., & Campanha, N. H. (2015). In-office bleaching effects on the pulp flow and tooth sensitivity - case series. *Brazilian oral research*, 29(1), 1–6. <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2015.VOL29.0026>
19. Cassetta, M., Altieri, F., Di Giorgio, R., & Barbato, E. (2018). Palatal orthodontic miniscrew insertion using a CAD-CAM surgical guide: description of a technique.

- International journal of oral and maxillofacial surgery*, 47(9), 1195–1198.
<https://doi.org/10.1016/J.IJOM.2018.03.018>
20. Cesar, I. C. R., Soares, L. E. S., Alves, L. P., Martin, A. A., Munin, E., & Liporoni, P. C. S. (2009). Fourier transform-Raman and reflectance studies on dental enamel bleached with hydrogen peroxide activated using a light-emitting diode-laser system. *Photomedicine and laser surgery*, 27(6), 913–919.
<https://doi.org/10.1089/PHO.2008.2409>
 21. Convissar, R. A. (2022). *Principles and practice of laser dentistry*.
 22. Czajkowska, M., Walejewska, E., Zadrozny, Ł., Wieczorek, M., Świeszkowski, W., Wagner, L., Mijiritsky, E., & Markowski, J. (2020). Comparison of dental stone models and their 3D printed acrylic replicas for the accuracy and mechanical properties. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/MA13184066>
 23. Dahl, J. E., & Pallesen, U. (2003). Tooth bleaching--a critical review of the biological aspects. *Critical reviews in oral biology and medicine : an official publication of the American Association of Oral Biologists*, 14(4), 292–304.
<https://doi.org/10.1177/154411130301400406>
 24. D'arienzo, L. F., D'arienzo, A., & Borracchini, A. (2018). *Comparison of the suitability of intra-oral scanning with conventional impression of edentulous maxilla in vivo. A preliminary study*. 10(4). <https://doi.org/10.23805/JO.2018.10.04.02>
 25. Dawood, A., Marti, B. M., Sauret-Jackson, V., & Darwood, A. (2015). 3D printing in dentistry. *British dental journal*, 219(11), 521–529.
<https://doi.org/10.1038/SJ.BDJ.2015.914>
 26. De Moor, R. J. G., Verheyen, J., Verheyen, P., Diachuk, A., Meire, M. A., De Coster, P. J., De Bruyne, M., & Keulemans, F. (2015). Laser Teeth Bleaching: Evaluation of Eventual Side Effects on Enamel and the Pulp and the Efficiency In Vitro and In Vivo. *The Scientific World Journal*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/835405>
 27. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2017.10.001>
 28. Denbesten, P., & Li, W. (2011). Chronic Fluoride Toxicity: Dental Fluorosis. *Monographs in oral science*, 22, 81. <https://doi.org/10.1159/000327028>
 29. Dimopoulou, M., Antoniadou, M., Amargianitakis, M., Gortzi, O., Androutsos, O., & Varzakas, T. (2023). Nutritional Factors Associated with Dental Caries across the

- Lifespan: A Review. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 13254, 13(24), 13254. <https://doi.org/10.3390/APP132413254>
30. Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2017.12.002>
 31. Domínguez, A., García, J. A., Costela, Á., & Gómez, C. (2011). Influence of the light source and bleaching gel on the efficacy of the tooth whitening process. *Photomedicine and laser surgery*, 29(1), 53–59. <https://doi.org/10.1089/PHO.2009.2751>
 32. Dostálová, T., Jelínková, H., Kratochvíl, J., Říha, A., Šulc, J., Němec, M., Nocar, A., Bradna, P., & Pečenka, J. (2020). Diode activated home bleaching techniques with stereolithographic models and trays. *I1217*, 8–15. <https://doi.org/10.1117/12.2543704>
 33. Dostálová, T., Kašparová, M., Chleborád, K., Jelínek, M., Bradna, P., & Mendrický, R. (2019). Intraoral scanner and stereographic 3D print in orthodontics. <https://doi.org/10.1117/12.2507233>, 10857, 14–21.
 34. Dostálová, T., Kašparová, M., Kříž, P., Halamová, S., Jelínek, M., Bradna, P., & Mendrický, J. (2018). Intraoral scanner and stereographic 3D print in dentistry—quality and accuracy of model—new laser application in clinical practice. *Laser Physics*, 28(12), 125602. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/AAE067>
 35. Dostálová, T., Procházka, A., Urbanová, P., & Eliášová, H. (2022). 3D stereolithography print (SLA) in clinical orthodontic and dental applications. <https://doi.org/10.1117/12.2608661>, 11942, 34–40.
 36. Eliášová, H., Dostálová, T., Jelínek, M., Remsa, J., Bradna, P., Procházka, A., & Kloubcová, M. (2020). Surface Morphology of Three-Dimensionally Printed Replicas of Upper Dental Arches. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 5708, 10(16), 5708. <https://doi.org/10.3390/APP10165708>
 37. Eliášová, H., Dostálová, T., Procházka, A., Šedivá, E., Horáček, M., Urbanová, P., & Hlíňáková, P. (2021). Comparison of 2D OPG image versus orthopantomogram from 3D CBCT from the forensic point of view. *Legal Medicine*, 48. <https://doi.org/10.1016/J.LEGALMED.2020.101802>
 38. Enax, J., Ganss, B., Amaechi, B. T., Schulze zur Wiesche, E., & Meyer, F. (2023). The composition of the dental pellicle: an updated literature review. *Frontiers in Oral Health*, 4. <https://doi.org/10.3389/FROH.2023.1260442>

39. Ender, A., Attin, T., & Mehl, A. (2016). In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 115(3), 313–320. <https://doi.org/10.1016/J.PROSDENT.2015.09.011>
40. Eul, W., Moeller, A., & Steiner, N. (2001). Hydrogen Peroxide. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0825041808051919.A01.PUB2>
41. Fachhochschule, B. L., Wien, T., Detsch, R., Boccaccini, A. R., Stampfl, J., Gmeiner, R., Deisinger, U., Schönherr, J., Lechner, B., Detsch, R., Boccaccini, A. R., & Stampfl, J. (2015). Additive Manufacturing of Bioactive Glasses and Silicate Bioceramics. *Article in Journal of Ceramic Science and Technology*, 6–8. <https://doi.org/10.4416/JCST2015-00001>
42. Farooq, I., & Bugshan, A. (2020). The role of salivary contents and modern technologies in the remineralization of dental enamel: a narrative review. *F1000Research*, 9, 1–14. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.22499.3>
43. Galeotti, A., D'Antò, V., Gentile, T., Galanakis, A., Giancristoforo, S., Uomo, R., & Romeo, U. (2014). Er:YAG Laser Dental Treatment of Patients Affected by Epidermolysis Bullosa. *Case Reports in Dentistry*, 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/421783>
44. Garwin, Laura., & Lincoln, Tim. (2003). *A century of nature : twenty-one discoveries that changed science and the world*. 360.
45. Giachetti, L., Bertini, F., Bambi, C., Nieri, M., & Russo, D. S. (2010). A Randomized Clinical Trial Comparing At-Home and In-Office Tooth Whitening Techniques: A nine-month follow-up. *The Journal of the American Dental Association*, 141(11), 1357–1364. <https://doi.org/10.14219/JADA.ARCHIVE.2010.0081>
46. Gökay, O., Mújdeci, A., & Algin, E. (2005). In vitro peroxide penetration into the pulp chamber from newer bleaching products. *International endodontic journal*, 38(8), 516–520. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2591.2005.00979.X>
47. Goldman, L., Goldman, B., & Lieu, N. Van. (1987). Current laser dentistry. *Lasers in surgery and medicine*, 6(6), 559–562. <https://doi.org/10.1002/LSM.1900060616>
48. Goracci, C., Franchi, L., Vichi, A., & Ferrari, M. (2016). Accuracy, reliability, and efficiency of intraoral scanners for full-arch impressions: A systematic review of the clinical evidence. *European Journal of Orthodontics*, 38(4), 422–428. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjv077>

49. Gráfová, L., Kašparová, M., Kakawand, S., Procházka, A., & Dostálová, T. (2013). Study of edge detection task in dental panoramic radiographs. *Dentomaxillofacial Radiology*, 42(7). <https://doi.org/10.1259/DMFR.20120391>
50. Grøn, P., van Campen, G. J., & Lindstrom, I. (1967). Human dental calculus. Inorganic chemical and crystallographic composition. *Archives of oral biology*, 12(7), 829–837. [https://doi.org/10.1016/0003-9969\(67\)90105-7](https://doi.org/10.1016/0003-9969(67)90105-7)
51. Habibah, T. U., Amlani, D. V., & Brizuela, M. (2022). Hydroxyapatite Dental Material. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513314/>
52. Hampé-Kautz, V., Salehi, A., Senger, B., & Etienne, O. (2020). A comparative in vivo study of new shade matching procedures. *International Journal of Computerized Dentistry*, 23(4), 317–323.
53. Hao, W., Liu, Y., Zhou, H., Chen, H., & Fang, D. (2018). Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites. *Polymer Testing*, 65, 29–34. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2017.11.004>
54. Hassel, A. J., Zenthöfer, A., Corcodel, N., Hildenbrandt, A., Reinelt, G., & Wiesberg, S. (2013). Determination of VITA Classical shades with the 3D-Master shade guide. *Acta odontologica Scandinavica*, 71(3–4), 721–726. <https://doi.org/10.3109/00016357.2012.715197>
55. HEWLETT PACKARD. (2012). *Analytical Chemistry*, 51(12), 1188A-1189A. <https://doi.org/10.1021/AC50048A728>
56. Hitzler, L., Alifui-Segbaya, F., Williams, P., Heine, B., Heitzmann, M., Hall, W., Merkel, M., & Öchsner, A. (2018). Additive manufacturing of cobalt-based dental alloys: Analysis of microstructure and physicochemical properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8213023>
57. Horst, D. J., Duvoisin, C. A., & Vieira, R. D. A. (2018). Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review. *International Journal of Engineering*.
58. *How to calculate 3D printing costs? - Original Prusa 3D Printers*. Ziskáno 16. prosince 2023, z https://blog.prusa3d.com/how-to-calculate-printing-costs_38650/
59. Hull, C. W., & Arcadia, C. (1984). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*.
60. Chalmers, E. V., McIntyre, G. T., Wang, W., Gillgrass, T., Martin, C. B., & Mossey, P. A. (2016). Intraoral 3D Scanning or Dental Impressions for the Assessment of Dental Arch Relationships in Cleft Care: Which is Superior? *The Cleft palate-craniofacial*

- journal : official publication of the American Cleft Palate-Craniofacial Association, 53(5), 568–577. <https://doi.org/10.1597/15-036>*
61. Chiu, A., Chen, Y. W., Hayashi, J., & Sadr, A. (2020). Accuracy of CAD/CAM Digital Impressions with Different Intraoral Scanner Parameters. *Sensors 2020, Vol. 20, Page 1157, 20(4), 1157. <https://doi.org/10.3390/S20041157>*
 62. Ianko, T., Panov, S., Sushchyns, O., Pylypenko, M., & Dmytrenko, O. *ZIRCONIUM ALLOY POWDERS FOR MANUFACTURE OF 3D PRINTED ARTICLES USED IN NUCLEAR POWER INDUSTRY. 113, 148–153.*
 63. Irusa, K., Alrahaem, I. A., Ngoc, C. N., & Donovan, T. (2022). Tooth whitening procedures: A narrative review. *Dentistry Review, 2(3), 100055. <https://doi.org/10.1016/J.DENTRE.2022.100055>*
 64. Joda, T., Matthisson, L., & Zitzmann, N. U. (2020). Impact of aging on the accuracy of 3d-printed dental models: An in vitro investigation. *Journal of Clinical Medicine, 9(5). <https://doi.org/10.3390/JCM9051436>*
 65. Joiner, A. (2006). The bleaching of teeth: a review of the literature. *Journal of dentistry, 34(7), 412–419. <https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2006.02.002>*
 66. Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Irvani, P., Olliver, V., Palmer, C., & Bowyer, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica, 29(1), 177–191. <https://doi.org/10.1017/S026357471000069X>*
 67. Kalman, L. (2020). Development of a novel dental shade determination application. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects, 14(1), 73. <https://doi.org/10.34172/JODDD.2020.011>*
 68. Karanjkar, R. R., Preshaw, P. M., Ellis, J. S., & Holliday, R. (2023). Effect of tobacco and nicotine in causing staining of dental hard tissues and dental materials: A systematic review and meta-analysis. *Clinical and Experimental Dental Research, 9(1), 150. <https://doi.org/10.1002/CRE2.683>*
 69. Kašparová, M., Gráfová, L., Dvořák, P., Dostálová, T., Procházka, A., Eliášová, H., Průša, J., & Kakawand, S. (2013). Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models. *Biomedical engineering online, 12(1). <https://doi.org/10.1186/1475-925X-12-49>*
 70. Kašparová, M., Halamová, S., Dostálová, T., & Procházka, A. (2018). Intra-oral 3D scanning for the digital evaluation of dental arch parameters. *Applied Sciences (Switzerland), 8(10). <https://doi.org/10.3390/APP8101838>*

71. Kašparová, M., Procházka, A., Grajciarová, L., Yadollahi, M., Vyšata, O., & Dostálová, T. (2014). Evaluation of dental morphometrics during the orthodontic treatment. *BioMedical Engineering Online*, *13*(1). <https://doi.org/10.1186/1475-925X-13-68>
72. Khorsandi, D., Fahimipour, A., Abasian, P., Saber, S. S., Seyedi, M., Ghanavati, S., Ahmad, A., De Stephanis, A. A., Taghavinezhaddilami, F., Leonova, A., Mohammadinejad, R., Shabani, M., Mazzolai, B., Mattoli, V., Tay, F. R., & Makvandi, P. (2021). 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. *Acta biomaterialia*, *122*, 26–49. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2020.12.044>
73. Kim, D., Lim, J. Y., Shim, K. W., Han, J. W., Yi, S., Yoon, D. H., Kim, K. N., Ha, Y., Ji, G. Y., & Shin, D. A. (2017). Sacral Reconstruction with a 3D-Printed Implant after Hemisacrectomy in a Patient with Sacral Osteosarcoma: 1-Year Follow-Up Result. *Yonsei medical journal*, *58*(2), 453–457. <https://doi.org/10.3349/YMJ.2017.58.2.453>
74. Kodama, H., Kodama, & Hideo. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *RSci*, *52*(11), 1770–1773. <https://doi.org/10.1063/1.1136492>
75. Kwon, S. R., & Wertz, P. W. (2015). Review of the Mechanism of Tooth Whitening. *Journal of esthetic and restorative dentistry: official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [et al.]*, *27*(5), 240–257. <https://doi.org/10.1111/JERD.12152>
76. Leukers, B., Gülkan, H., Irsen, S. H., Milz, S., Tille, C., Schieker, M., & Seitz, H. (2005). Hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering made by 3D printing. *Journal of materials science. Materials in medicine*, *16*(12), 1121–1124. <https://doi.org/10.1007/S10856-005-4716-5>
77. Lima, D. A. N. L., Aguiar, F. H. B., Liporoni, P. C. S., Munin, E., Ambrosano, G. M. B., & Lovadino, J. R. (2009). In vitro evaluation of the effectiveness of bleaching agents activated by different light sources. *Journal of prosthodontics: official journal of the American College of Prosthodontists*, *18*(3), 249–254. <https://doi.org/10.1111/J.1532-849X.2008.00420.X>
78. Liu, Z., Zhang, L., Yu, E., Ying, Z., Zhang, Y., Liu, X., & Eli, W. *Modification of Glass Fiber Surface and Glass Fiber Reinforced Polymer Composites Challenges and Opportunities: From Organic Chemistry Perspective.*

79. Luk, K., Zhao, I. S., Gutknecht, N., & Chu, C. H. (2019). Use of carbon dioxide lasers in dentistry. *Lasers in Dental Science*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/S41547-018-0047-Y>
80. Luke, A. M., Mathew, S., Altawash, M. M., & Madan, B. M. (2019). Lasers: A Review With Their Applications in Oral Medicine. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 10(4), 324. <https://doi.org/10.15171/JLMS.2019.52>
81. Maran, B. M., Ziegelmann, P. K., Burey, A., de Paris Matos, T., Loguercio, A. D., & Reis, A. (2019). Different light-activation systems associated with dental bleaching: a systematic review and a network meta-analysis. *Clinical Oral Investigations* 2019 23:4, 23(4), 1499–1512. <https://doi.org/10.1007/S00784-019-02835-X>
82. Marcondes, M., Paranhos, M. P. G., Spohr, A. M., Mota, E. G., Da Silva, I. N. L., Souto, A. A., & Burnett, L. H. (2009). The influence of the Nd:YAG laser bleaching on physical and mechanical properties of the dental enamel. *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials*, 90(1), 388–395. <https://doi.org/10.1002/JBM.B.31297>
83. Martin, J. H., Yahata, B. D., Hundley, J. M., Mayer, J. A., Schaedler, T. A., & Pollock, T. M. (2017). 3D printing of high-strength aluminium alloys. *Nature* 2017 549:7672, 549(7672), 365–369. <https://doi.org/10.1038/nature23894>
84. *Mastering 3D Printing (Technology in Action): Horvath, Joan: 9781484200261: Amazon.com: Books*. Získáno 20. září 2023, z <https://www.amazon.com/Mastering-3D-Printing-Technology-Action/dp/1484200268>
85. Mazzoli, A. (2013). Selective laser sintering in biomedical engineering. *Medical & biological engineering & computing*, 51(3), 245–256. <https://doi.org/10.1007/S11517-012-1001-X>
86. McDaniel, D. H., Ash, K., Lord, J., Newman, J., & Zukowski, M. (1997). The erbium: YAG laser: A review and preliminary report on resurfacing of the face, neck, and hands. *Aesthetic Surgery Journal*, 17(3), 157–164. [https://doi.org/10.1016/S1090-820X\(97\)80036-2](https://doi.org/10.1016/S1090-820X(97)80036-2)
87. Micallef, J. (2015). Timeline of 3D Printing Design Milestones. *Beginning Design for 3D Printing*, 397–401. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0946-2_14
88. Moncada, G., Sepúlveda, D., Elphick, K., Contente, M., Estay, J., Bahamondes, V., Fernandez, E., Oliveira, O. B., & Martin, J. (2013). Effects of Light Activation, Agent Concentration, and Tooth Thickness on Dental Sensitivity After Bleaching. *Operative Dentistry*, 38(5), 467–476. <https://doi.org/10.2341/12-335-C>

89. Mondelli, R. F. L., Soares, A. F., Pangrazio, E. G. K., Wang, L., Ishikiriama, S. K., & Bombonatti, J. F. S. (2016). Evaluation of temperature increase during in-office bleaching. *Journal of Applied Oral Science*, 24(2), 136–141. <https://doi.org/10.1590/1678-775720150154>
90. Mörmann, W. H. (2006). The evolution of the CEREC system. *Journal of the American Dental Association*, 137(9 SUPPL.). <https://doi.org/10.14219/JADA.ARCHIVE.2006.0398>
91. Murr, L. E. (2016). Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(10), 987–995. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2016.08.011>
92. Nam, S. H., Choi, B. B. R., & Kim, G. C. (2021). The Whitening Effect and Histological Safety of Nonthermal Atmospheric Plasma Inducing Tooth Bleaching. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4714. <https://doi.org/10.3390/IJERPH18094714>
93. Nathoo, S. A. (1997). THE CHEMISTRY AND MECHANISMS OF EXTRINSIC AND INTRINSIC DISCOLORATION. *The Journal of the American Dental Association*, 128(4 SUPPL.), 6S-10S. <https://doi.org/10.14219/JADA.ARCHIVE.1997.0428>
94. Neel, E. A. A., Aljabo, A., Strange, A., Ibrahim, S., Coathup, M., Young, A. M., Bozec, L., & Mudera, V. (2016). Demineralization–remineralization dynamics in teeth and bone. *International Journal of Nanomedicine*, 11, 4743. <https://doi.org/10.2147/IJN.S107624>
95. Nematianaraki, S., Fekrazad, R., Naghibi, N., Kalhori, K. A. M., & Brugnera Junior, A. (2015). Effects of the bleaching procedures on enamel micro-hardness: Plasma Arc and diode laser comparison. *Laser Therapy*, 24(3), 173. <https://doi.org/10.5978/ISLSM.15-OR-10>
96. Nesic, D., Schaefer, B. M., Sun, Y., Saulacic, N., & Sailer, I. (2020). 3D Printing Approach in Dentistry: The Future for Personalized Oral Soft Tissue Regeneration. *Journal of Clinical Medicine*, 9(7), 1–21. <https://doi.org/10.3390/JCM9072238>
97. Nocar, A., Horáček, M., Dostálová, T., & Trojanová, J. (2022). DENTAL AND SKELETAL CHANGES OF THE MAXILLA AFTER RAPID MAXILLARY EXPANSION. *Česká stomatologie/Praktické zubní lékařství*, 122(3), 79–86. <https://doi.org/10.51479/CSPZL.2022.006>

98. Nogueira, M. S., Brugnera Junior, A., Bagnato, V. S., & Panhóca, V. H. (2021). Evaluation of the Whitening Effectiveness of Violet Illumination Alone or Combined with Hydrogen Peroxide Gel. *Photobiomodulation, photomedicine, and laser surgery*, 39(6), 395–402. <https://doi.org/10.1089/PHOTOB.2020.4846>
99. Nulty, A. B. (2021). A comparison of full arch trueness and precision of nine intra-oral digital scanners and four lab digital scanners. *Dentistry Journal*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/DJ9070075>
100. *Our Story | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa*. Získáno 21. února 2024, z https://www.prusa3d.com/en/page/our-story_875/
101. Owen, D., Hickey, J., Cusson, A., Ayeni, O. I., Rhoades, J., Deng, Y., Zhang, Y., Wu, L., Park, H. Y., Hawaldar, N., Raikar, P. P., Jung, Y. G., & Zhang, J. (2018). 3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer. *Progress in Additive Manufacturing*, 3(1–2), 3–9. <https://doi.org/10.1007/S40964-018-0037-3/METRICS>
102. Panhóca, V. H., Rastelli, A. N. de S., Zanin, F. A. A., Brugnera Junior, A., & Bagnato, V. S. (2016). A comparative in vitro study of heating intrapulpal applying blue and violet light in tooth whitening. *Journal of Japanese Society for Laser Dentistry*, 27, 106. <https://repositorio.usp.br/item/002837704>
103. Park, H. S., & Shah, C. (2015). Development of high speed and high accuracy 3D dental intra oral scanner. *Procedia Engineering*, 100(January), 1174–1181. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.01.481>
104. Park, M. E., & Shin, S. Y. (2018). Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 119(5), 861.e1-861.e7. <https://doi.org/10.1016/J.PROSDENT.2017.08.020>
105. Patil, U., & Dhama, L. (2008). Overview of lasers. *Indian Journal of Plastic Surgery: Official Publication of the Association of Plastic Surgeons of India*, 41(Suppl), S101. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1700481>
106. Persson, A. S. K., Odén, A., Andersson, M., & Sandborgh-Englund, G. (2009). Digitization of simulated clinical dental impressions: Virtual three-dimensional analysis of exactness. *Dental Materials*, 25(7), 929–936. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.01.100>
107. Piedra-Cascón, W., Methani, M. M., Quesada-Olmo, N., Jiménez-Martínez, M. J., & Revilla-León, M. (2021). Scanning accuracy of nondental structured light extraoral

- scanners compared with that of a dental-specific scanner. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 126(1), 110–114. <https://doi.org/10.1016/J.PROSDENT.2020.04.009>
108. Procházka, A., Dostálová, T., Kašparová, M., Vyšata, O., Charvátová, H., Sanei, S., & Mařík, V. (2019). Augmented reality implementations in stomatology. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(14). <https://doi.org/10.3390/APP9142929>
 109. Procházka, A., Kašparová, M., Yadollahi, M., Vyšata, O., & Grajciarová, L. (2015). Multi-camera systems use for dental arch shape measurement. *Visual Computer*, 31(11), 1501–1509. <https://doi.org/10.1007/S00371-014-1029-Z>
 110. Procházka, A., Vyšata, O., & Mařík, V. (2021). Integrating the Role of Computational Intelligence and Digital Signal Processing in Education: Emerging Technologies and Mathematical Tools. *IEEE Signal Processing Magazine*, 38(3), 154–162. <https://doi.org/10.1109/MSP.2021.3058634>
 111. Ragain, J. C. (2016). A Review of Color Science in Dentistry: Shade Matching in the Contemporary Dental Practice. *Journal of Dentistry, Oral Disorders & Therapy*, 4(2), 01–05. <https://doi.org/10.15226/JDODT.2016.00156>
 112. Reddy, M. S., Shetty, S. R., Shetty, R. M., Vannala, V., Shakeel, S. K., & Rajasekar, S. (2020). Focus on periodontal engineering by 3D printing technology a systematic review. *J. oral res. (Impresa)*, 9(6), 522–531. <https://doi.org/10.17126/JORALRES.2020.093>
 113. Richert, R., Goujat, A., Venet, L., Viguie, G., Viennot, S., Robinson, P., Farges, J. C., Fages, M., & Ducret, M. (2017). Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression. *Journal of healthcare engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8427595>
 114. Sabbah, A., Romanos, G., & Delgado-Ruiz, R. (2021). Impact of layer thickness and storage time on the properties of 3D-printed dental dies. *Materials*, 14(3), 1–10. <https://doi.org/10.3390/MA14030509>
 115. Sanda, M., Miyoshi, K., & Baba, K. (2021). Trueness and precision of digital implant impressions by intraoral scanners: a literature review. *International Journal of Implant Dentistry*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/S40729-021-00352-9>
 116. Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684414530790>, 33(13), 1258–1275.
 117. Savková, N., Harvan, E., Jusku, A., Saygili, S., Jezdinská, K., & Hulvert, J. (2021). SUMMARY OF KNOWLEDGE ABOUT 3D PRINTING AND ITS USE IN

- DENTISTRY. *Česká stomatologie/Praktické zubní lékařství*, 121(2), 55–64.
<https://doi.org/10.51479/CSPZL.2021.008>
118. Seelbach, P., Brueckel, C., & Wöstmann, B. (2013). Accuracy of digital and conventional impression techniques and workflow. *Clinical Oral Investigations*, 17(7), 1759–1764. <https://doi.org/10.1007/s00784-012-0864-4>
119. Son, J. H., An, J. H., Kim, B. K., Hwang, I. N., Park, Y. J., & Song, H. J. (2012). Effect of laser irradiation on crystalline structure of enamel surface during whitening treatment with hydrogen peroxide. *Journal of Dentistry*, 40(11), 941–948. <https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2012.07.015>
120. Son, K., Lee, W. S., & Lee, K. B. (2021). Effect of different software programs on the accuracy of dental scanner using three-dimensional analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16). <https://doi.org/10.3390/IJERPH18168449>
121. Sri, I., Meghana, S., Bhat, A. R., Bhandary, R., & Thomas, B. (2023). Potential of Lasers in the Realm of Aesthetic Dentistry: A Narrative Review. *J Health Allied Sci NU*, 13, 313–322. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1758031>
122. Stamm, J. W. (2007). Multi-function toothpastes for better oral health: a behavioural perspective. *International Dental Journal*, 57, 351–363.
123. Stamp, J. (1989). Medical lasers. *NATNews*, 26(12), 14–15. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092397-0.50008-X>
124. Stevens, D. R., Flores-Mir, C., Nebbe, B., Raboud, D. W., Heo, G., & Major, P. W. (2006). Validity, reliability, and reproducibility of plaster vs digital study models: comparison of peer assessment rating and Bolton analysis and their constituent measurements. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 129(6), 794–803. <https://doi.org/10.1016/J.AJODO.2004.08.023>
125. Sulieman, M. (2005). An overview of tooth discoloration: extrinsic, intrinsic and internalized stains. *Dental update*, 32(8). <https://doi.org/10.12968/DENU.2005.32.8.463>
126. Sun, G., & Tunér, J. (2004). Low-level laser therapy in dentistry. *Dental clinics of North America*, 48(4), 1061–1076. <https://doi.org/10.1016/J.CDEN.2004.05.004>
127. Sundfeld, R. H., Sundfeld-Neto, D., Machado, L. S., Franco, L. M., Fagundes, T. C., & Briso, A. L. F. (2014). Microabrasion in tooth enamel discoloration defects:

- three cases with long-term follow-ups. *Journal of Applied Oral Science*, 22(4), 347. <https://doi.org/10.1590/1678-775720130672>
128. Susic, I., Travar, M., & Susic, M. (2017). The application of CAD / CAM technology in Dentistry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 200(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/200/1/012020>
129. Šulc, J., & Jelínková, H. (2013). Solid-state lasers for medical applications. *Lasers for Medical Applications: Diagnostics, Therapy and Surgery*, 127–176. <https://doi.org/10.1533/9780857097545.2.127>
130. Tahayeri, A., Morgan, M. C., Fugolin, A. P., Bompolaki, D., Athirasala, A., Pfeifer, C. S., Ferracane, J. L., & Bertassoni, L. E. (2018). 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dental Materials*, 34(2), 192–200. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2017.10.003>
131. Tang, X., & Yu, Y. (2015). Electrospinning preparation and characterization of alumina nanofibers with high aspect ratio. *Ceramics International*, 41(8), 9232–9238. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2015.04.157>
132. Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22–37. <https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2017.07.001>
133. Trevisan, F., Calignano, F., Aversa, A., Marchese, G., Lombardi, M., Biamino, S., Ugues, D., & Manfredi, D. (2018). Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications. *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, 16(2), 57–67. https://doi.org/10.5301/JABFM.5000371/ASSET/IMAGES/LARGE/10.5301_JABFM.5000371-FIG3.JPEG
134. Turkyilmaz, I., & Wilkins, G. N. (2021). 3D printing in dentistry – Exploring the new horizons. *Journal of Dental Sciences*, 16(3), 1037–1038. <https://doi.org/10.1016/J.JDS.2021.04.004>
135. Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., & Borille, A. V. (2015). Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components. *Procedia CIRP*, 35, 55–60. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2015.08.061>
136. *US20040237822A1 - Ink-jet printing of viable cells - Google Patents*. Získáno 20. září 2023, z <https://patents.google.com/patent/US20040237822?oq=ininventor:%22Thomas+Bolan>

d%22+bioprinting%26hl%3den%26sa%3dX%26ved%3d0ahUKEwj7oW0s67UAhX
Kbz4KHUBZC1cQ6AEIMDAC

137. Úspěšné řešení IP projektu – Tisk anatomických modelů pomocí 3D tisku | 2. lékařská fakulta Univerzity Karlovy. Získáno 16. prosince 2023, z <https://www.lf2.cuni.cz/node/370183>
138. *UV-Vis spectrophotometer product guide Powerful spectroscopy for accurate analysis*. Získáno 16. prosinec 2023, z <https://assets.thermofisher.com>
139. Van der Meer, W. J., Andriessen, F. S., Wismeijer, D., & Ren, Y. (2012). Application of intra-oral dental scanners in the digital workflow of implantology. *PloS one*, 7(8). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0043312>
140. Vats, S., Sinha, D. J., Singh, S., Rathi, R., Jha, S., & Singh, I. (2023). Effect of remineralizing agent on laser and nonlaser bleached enamel surfaces subjected to erosion: An in vitro study. *Journal of conservative dentistry: JCD*, 26(4), 388. https://doi.org/10.4103/JCD.JCD_139_23
141. Verma, S. K., Maheshwari, S., Singh, R. K., & Chaudhari, P. K. (2012). Laser in dentistry: An innovative tool in modern dental practice. *National Journal of Maxillofacial Surgery*, 3(2), 124. <https://doi.org/10.4103/0975-5950.111342>
142. Walsh, L. J. (2000). Safety issues relating to the use of hydrogen peroxide in dentistry. *Australian dental journal*, 45(4), 257–269. <https://doi.org/10.1111/J.1834-7819.2000.TB00261.X>
143. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034>
144. Wohlers, T., & Gornet, T. (2015). *History of Additive Manufacturing*. Získáno 10. září 2023, z <https://wohlersassociates.com/wp-content/uploads/2022/08/history2015.pdf>
145. Yadollahi, M., Procházka, A., Kašparová, M., & Vyšata, O. (2015). The use of combined illumination in segmentation of orthodontic bodies. *Signal, Image and Video Processing*, 9(1), 243–250. <https://doi.org/10.1007/S11760-014-0653-4>
146. Yimenu, D. K., Adelo, E. S., Siraj, E. A., Kassie, T. A., Woldeeslassie Hammeso, W., Demeke, C. A., & Emiru, Y. K. (2020). Health Professionals Oral Health Knowledge and Practice: Unleashing the Hidden Challenges. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, 13, 459. <https://doi.org/10.2147/JMDH.S254964>

147. Yuzbasioglu, E., Kurt, H., Turunc, R., & Bilir, H. (2014). Comparison of digital and conventional impression techniques: Evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health*, *14*(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6831-14-10>
148. Zhang, C., Wang, X., Kinoshita, J. I., Zhao, B., Toko, T., Kimura, Y., & Matsumoto, K. (2007). Effects of KTP Laser Irradiation, Diode Laser, and LED on Tooth Bleaching: A Comparative Study. *https://home.liebertpub.com/pho*, *25*(2), 91–95. <https://doi.org/10.1089/PHO.2006.2025>
149. Zocca, A., Günster, J., Zocca, A., Lima, P., & Günster, J. (2017). LSD-based 3D printing of alumina ceramics. *J. Ceram. Sci. Tech*, 8–9. <https://doi.org/10.4416/JCST2016-00103>

10. SEZNAM PUBLIKACÍ

Původní vědecké práce in extenso, které jsou podkladem disertace.

1. **Nocar, A.**, Procházka, A., Kloubcová, M., Hyšpler, P., Schatz, M., & Dostálová, T. (2023). A Three-Year Prospective Study Comparing Stereolithography Printed Models to Classical Impression and Plaster Cast Models in Orthodontic Therapy: A 3D Objectification Approach. *Applied Sciences*, 13(13):7542. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app13137542>.

IF₂₀₂₂ = 2,7, **Kvartil₂₀₂₂ = Q2**

2. Dostálová, T., Kratochvíl, J., Jelínková, H., **Nocar, A.**, & Vavříčková, L. (2023). Blue (0.44 μm) and red (1.7 μm) diode laser activated bleaching—dental shade changes determination. *Laser Physics Letters*, 20(3), 035601. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ACB3C9>.

IF₂₀₂₂ = 1,7, **Kvartil₂₀₂₂ = Q3**

3. Dostálová, T., Jelínková, H., Kratochvíl, J., Říha, A., Šulc, J., Němec, M., **Nocar, A.**, Bradna, P., & Pečenka, J. (2020). Diode activated home bleaching techniques with stereolithographic models and trays. Proc. SPIE 11217, *Lasers in Dentistry*, XXVI, 1121704. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2543704>.

Původní vědecké práce in extenso bez vztahu k tématu disertace

1. **Nocar, A.**, Horáček, M., Dostálová, T., & Trojanová, J. (2022). Dentální a skeletální změny maxily po rychlé maxilární expanzi. *Česká stomatologie/Praktické zubní lékařství*, 122(3), s. 79–86. Dostupné z: <https://doi.org/10.51479/CSPZL.2022.006>.

2. Macháček, Š., **Nocar, A.**, Dušková, M., & Dostálová, T. Sanace fokusů v dutině ústní před náhradou srdeční chlopně. *Cor et Vasa*. 2020;62(1):56-59. Dostupné z: <https://doi: 10.33678/cor.2019.071>.

3. Trojanová, J., Dostálová, T., Horáček, M., & **Nocar, A.** Rychlá maxilární expanze a její působení na skelet maxily. *Ortodoncie*, 2022, vol. 31, s. 207-221. ISSN 1210-4272.

4. Jelínková, S., Dostálová, T., Dušková, M., **Nocar, A.**, & Hrdlička, M. Pacient s poruchou autistického spektra – přehled tří nejčastějších metod ošetření s praktickým návodem. *LKS: Časopis České stomatologické komory*, 2021, vol. 31, s. 104-110. ISSN 1210-3381.

Přednášky, plakátová sdělení na odborných setkáních

1. XXII. Kongres České ortodontické společnosti 8. 10. 2022 - Ortodontický pacient v křesle dentální hygienistky

2. Vědecká konference 2. LF UK 12. 10. 2022 - 3D CBCT analýza dentálních a skeletálních změn maxily po rychlé maxilární expanzi (RME)

3. VIII. Podzimní konference ADH ČR 13. 11. 2022 - Orto aparát Hyrax a konzervativní léčba onemocnění TMK

4. Mezioborové dny OSPDL ČLA JEP 26. 11. 2022 - Ortodontická terapie a jednotlivé druhy aparátů

5. Vědecká konference 2. LF UK 1. 11. 2023 - Tříletá prospektivní studie srovnávající 3D vytištěné modely s klasicky otisknutými a sádrovými modely v ortodontické terapii

