

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Biologie

Studijní obor: Antropologie a genetika člověka



Bc. Zuzana Valíková

**Sledování vztahu mezi asymetrií skeletu a měkkých tkání obličeje na základě
výpočetní tomografie**

Monitoring of the relationship between the asymmetry of facial skeleton and the soft
tissues based on computed tomography

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jana Velemínská, Ph.D.

Praha, 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 9. 8. 2021

Zuzana Valíková

Poděkování

Ráda bych poděkovala především své školitelce doc. RNDr. Janě Velemínské, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, za cenné rady, ochotu, vstřícnost a trpělivý přístup. Dále bych ráda poděkovala Mgr. Jáně Dupejovi, Ph.D. za odbornou pomoc s analýzou dat a celému kolektivu Laboratoře 3D zobrazovacích a analytických metod za jejich rady. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat svému partnerovi a rodině za podporu, kterou mi během celého studia poskytovali.

Abstrakt

Obličej člověka není dokonale symetrický, lehké asymetrie se běžně vyskytují u každého jedince napříč všemi populacemi. Cílem práce bylo sledování asymetrie na celém povrchu měkkých a tvrdých tkání hlav jedinců s ohledem na věk a pohlavní dimorfismus. Navazujícím cílem bylo poté zhodnotit rozdíl asymetrie mezi tkáněmi. Materiálem pro práci byl transversální soubor CT snímků dospělé české populace ve věkovém rozmezí 21–84 let. Jedinci byli rozděleni podle pohlaví na 50 mužů a 48 žen a podle věku do skupin do 39 let, 40–59 let a 60 a více let. K analýze dat bylo využito metod geometrické morfometrie (CPD – DCA, analýza asymetrie, per vertex T-test, metody superprojekce). Výsledky byly vizualizovány pomocí barevných map a map signifikance, které zobrazují stranovou nesouměrnost a statistickou významnost. Variabilita souboru byla analyzována pomocí analýzy hlavních komponent.

Výsledky hodnocení tvrdých tkání ukázaly pravostrannou protruzi na anteriorním a laterálním povrchu lebky, a to u mužů i žen ve všech věkových intervalech. Tato asymetrie byla statisticky velmi významná, na rozdíl od posteriorní oblasti, která byla vyhodnocena protruzivní na levé straně a měla p-hodnotu nižší. Na povrchu měkkých tkání byla také zjištěna asymetrie, co se umístění týče, stejná u mužů i u žen. Oproti lebkám byla protruze pravé strany nalezena pouze na nose a čele posteriorně přecházejícím v temeno. Zbytek povrchu měkkých tkání byl protruzivní na levé straně. Pohlavní dimorfismus byl velmi nízký a statisticky nevýznamný, pouze malé lokální oblasti u měkkých tkání byly shledány na mapách signifikance jako významné. Se stoupajícím věkem, byla asymetrie vyhodnocena jako ubývající, ale tento výsledek je diskutabilní vzhledem k transversální povaze práce. Ze srovnání výsledků obou typů tkání bylo možné vidět, že v oblastech s menší hloubkou měkkých tkání, je asymetrie obou povrchů v souladu a lateralita si zde vzájemně odpovídá. Nicméně v oblastech s větší hloubkou měkkých tkání je asymetrie obou povrchů v rozporu. Ze získaných výsledků bylo možné přijmout možnou existenci kompenzačního mechanismu, kdy se jeden typ tkání snaží vyrovnat asymetrii toho druhého tím, že má danou oblast méně či více prominující.

Klíčová slova: Asymetrie, měkké tkáně, tvrdé tkáně, geometrická morfometrie, výpočetní tomografie

Abstract

The human face is not perfectly symmetrical, slight asymmetries commonly occur in every individual across all populations. The aim of the work was to monitor the asymmetry on the entire surface of the soft and hard tissues of the heads of individuals with respect to age and sexual dimorphism. The follow-up goal was then to evaluate the difference in asymmetry between the tissues. The material for the work was a transverse set of CT images of the adult Czech population in the age range of 21–84 years. Individuals were divided according to gender into 50 men and 48 women and according to age into groups up to 39 years, 40–59 years and over 60 years. Geometric morphometry methods (CPD – DCA, asymmetry analysis, per vertex T-test, superprojection methods) were used for data analysis. The results were visualized using color maps and significance maps that show asymmetry and statistical significance. The variability of the file was analyzed by principal component analysis.

The results of the evaluation of hard tissues showed a right protrusion on the anterior and lateral surfaces of the skull, in both men and women at all age intervals. This asymmetry was statistically very significant, in contrast to the posterior region, which was evaluated protrusion on the left side and had lower p-value. On the soft tissues surfaces, the asymmetry was also found in terms of location, the same in men and women. In contrast to the skulls, the protrusion of the right side was found only on the nose and forehead posterior to the top. The rest of the soft tissue surface was protrusive on the left side. Sexual dimorphism was very low and statistically insignificant; only small local areas in soft tissues were found to be significant on significance maps. With increasing age, the asymmetry was evaluated as decreasing, but this result is debatable due to the transversal nature of the work. From a comparison of the results of both types of tissues, it was possible to see that in areas with a smaller depth of soft tissues, the asymmetry of both surfaces is consistent, and the laterality corresponds to each other. However, in areas with greater depth of soft tissues, the asymmetry of both surfaces is inconsistent. From the obtained results it was possible to accept the possible existence of a compensatory mechanism, where one type of tissue tries to balance the asymmetry of the other by having the area more or less prominent.

Keywords: Asymmetry, soft tissues, hard tissues, geometric morphometry, computed tomography

Obsah

1. ÚVOD	9
2. TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1 DEFINICE SYMETRIE	10
2.1.1 Typy symetrie.....	10
2.2 DEFINICE ASYMETRIE.....	11
2.2.1 Fluktuální asymetrie	12
2.2.2 Direkcionální asymetrie.....	12
2.2.3 Antisymetrie	13
2.3 LIDSKÝ OBLIČEJ A MOZKOVÁ ČÁST	13
2.3.1 Bilaterální symetrie	13
2.3.1.1 Prenatální vývoj	14
2.3.1.2 Postnatální vývoj.....	17
2.3.1.3 Faktory ovlivňující vznik asymetrie.....	17
2.3.2 Rovina symetrie.....	18
2.3.3 Měkké tkáně	20
2.3.4 Lebka.....	20
2.3.5 Vztah měkkých tkání a lebky	21
2.3.6 Pohlavní dimorfismus.....	22
2.4 SLEDOVÁNÍ ASYMETRIE	22
2.4.1 Fotografie	23
2.4.2 RTG.....	23
2.4.3 3D metody	24
2.5 VYUŽITÍ STUDIA ASYMETRIE	26
3. HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE	27
4. MATERIÁL	28
5. METODY	29
5.1 VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE	29
5.2 ÚPRAVA DAT	29
5.3 ANALÝZA DAT.....	34
5.3.1 Coherent point drift – Dense correspondence analýza	34
5.3.2 Analýza asymetrie	35
5.3.3 Metody superprojekce	35
5.3.4 Per vertex T-test	36
5.3.5 Analýza hlavních komponent	37
6. VÝSLEDKY	38

6.1	HODNOCENÍ ASYMETRIE TVRDÝCH TKÁNÍ U ŽEN	39
6.1.1	Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u žen ve věku do 39 let	40
6.1.2	Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u žen ve věku 40–59 let	41
6.1.3	Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u žen ve věku 60 a více let	42
6.2	HODNOCENÍ ASYMETRIE TVRDÝCH TKÁNÍ U MUŽŮ	43
6.2.1	Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u mužů ve věku do 39 let	44
6.2.2	Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u mužů ve věku 40–59 let	45
6.2.3	Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u mužů ve věku 60 a více let	46
6.3	HODNOCENÍ POHLAVNÍHO DIMORFISMU U ASYMETRIE TVRDÝCH TKÁNÍ.....	47
6.3.1	Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie tvrdých tkání ve věku do 39 let	48
6.3.2	Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie tvrdých tkání ve věku 40–59 let	49
6.3.3	Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie tvrdých tkání ve věku 60 a více let	50
6.4	HODNOCENÍ ASYMETRIE MĚKKÝCH TKÁNÍ U ŽEN.....	51
6.4.1	Hodnocení asymetrie měkkých tkání u žen ve věku do 39 let	52
6.4.2	Hodnocení asymetrie měkkých tkání u žen ve věku 40–59 let	53
6.4.3	Hodnocení asymetrie měkkých tkání u žen ve věku 60 a více let	54
6.5	HODNOCENÍ ASYMETRIE MĚKKÝCH TKÁNÍ U MUŽŮ	55
6.5.1	Hodnocení asymetrie měkkých tkání u mužů ve věku do 39 let	56
6.5.2	Hodnocení asymetrie měkkých tkání u mužů ve věku 40–59 let	57
6.5.3	Hodnocení asymetrie měkkých tkání u mužů ve věku 60 a více let	58
6.6	HODNOCENÍ POHLAVNÍHO DIMORFISMU U ASYMETRIE MĚKKÝCH TKÁNÍ.....	59
6.6.1	Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie měkkých tkání ve věku do 39 let	60
6.6.2	Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie měkkých tkání ve věku 40–59 let	61
6.6.3	Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie měkkých tkání ve věku 60 a více let ..	62
6.7	SROVNÁNÍ ASYMETRIE MĚKKÝCH A TVRDÝCH TKÁNÍ.....	63
6.8	VARIABILITA TVRDÝCH A MĚKKÝCH TKÁNÍ	66
6.8.1	Hodnocení variability tvaru tvrdých tkání.....	66
6.8.2	Hodnocení variability asymetrie tvrdých tkání.....	69
6.8.3	Hodnocení variability tvaru měkkých tkání	71
6.8.4	Hodnocení variability asymetrie měkkých tkání	74
7.	DISKUZE	77
8.	ZÁVĚR	81
9.	SEZNAM LITERATURY	83

Seznam zkratek

3D	Trojrozměrný
RTG	Rentgen
FA	Flukтуаční asymetrie
DA	Direkcionální asymetrie
CT	Výpočetní tomografie
CPD – DCA	Coherent point drift – Dense correspondence analýza
TPS	Metoda interpolace dat (Thin-plate spline)
PCA	Analýza hlavních komponent
PC	Hlavní komponenta

1. Úvod

Lidský obličej je částí těla, která je velmi důležitá při komunikaci, zároveň se významně podílí na celkovém vzhledu jedince a tvoří ho osobitým a jedinečným (Bishara et al., 1994). Obličejová asymetrie je zcela běžná, každý obličej je více či méně nesouměrný a přirozeně perfektně symetrický obličej bychom tak hledali velmi těžko. Literatura uvádí, že jedinec s dokonale souměrným obličejem neexistuje (Bishara et al., 1994; Graham et al., 2010). Právě odchylky od perfektní symetrie nás dělají jedinečnými a odlišnými od ostatních. Symetrie může působit jako marker fenotypové a genetické kvality (Perrett et al., 1999) a i když je považována za více atraktivní než asymetrie (Enquist and Arak, 1994; Hume and Montgomerie, 2001), lidé s méně výraznou asymetrií v obličejí mají vyšší šanci při výběru partnera. Zcela symetrický obličej je totiž vnímán negativně, jelikož působí nepřirozeně a lehké asymetrie jsou z toho důvodu dokonce žádoucí (Zaidel and Deblieck, 2007; Lu and Bartlett, 2014; Choi, 2015).

Odlišení asymetrie, která je běžná, a považuje se za normální, a té výrazné, není jednoduché a často je to pojeno s klinickým významem (Bishara et al., 1994). Z toho důvodu nachází využití studia asymetrie obličeje v ortodoncii, plastické chirurgii i dalších medicínských oborech (Choi, 2015). Nicméně hranice mezi patologií a normou není jasně stanovena. Je obtížné stanovit pomyslnou dělicí čáru normy, protože hodnoty asymetrie jsou populačně specifické a rozdílné pro měkké a tvrdé tkáně (Huang et al., 2013). Pokud se asymetrie vyskytuje na lebce, nutně to neznamená, že bude viditelná i na měkkých tkáních (Masuoka et al., 2005). Zároveň to platí i obráceně, kdy je asymetrie patrná na měkkých tkáních a na lebce nikoli (Nur et al., 2016). Jedná se o takzvaný kompenzační mechanismus, kdy jsme naprogramováni k symetrii a tělo se k tomu snaží co nejvíce přiblížit (Shah and Joshi, 1978; Gateño et al., 2018).

Diplomová práce se zaměřuje na hodnocení asymetrie měkkých a tvrdých tkání dospělé české populace. Pro práci byly využity CT snímky hlav jedinců, které byly analyzovány pomocí geometrické morfometrie. Metody, které byly použity, umožňují zkoumání tvaru povrchu tkání a je díky nim možné vyhodnotit morfologické variace s ohledem na anatomické souvislosti s jednotlivými strukturami (Bookstein, 1996). U obou typů tkání byl vyhodnocen rozdíl mezi pravou a levou stranou s ohledem na věk a pohlavní dimorfismus. Následně byl hodnocen rozdíl mezi výsledky měkkých a tvrdých tkání.

2. Teoretická část

2.1 Definice symetrie

Symetrie je definována jako invariance k jedné nebo více geometrickým transformacím, které mohou být použity na určitý objekt a nechají jej beze změny. Takové transformace se nazývají symetrické a společně charakterizují symetrii objektu. U bilaterálně symetrických objektů je symetrickou transformací, která nechá celý objekt neměnný, zrcadlení kolem osy nebo roviny (Savriama and Klingenberg, 2006).

Symetrie je často adaptivní. Již zmiňovaná bilaterální symetrie se obvykle vyskytuje u aktivně se pohybujících zvířat (Grabowsky, 1994). Oproti tomu radiální, dihedrální a rotační symetrie se vyskytuje u organismů usedlých (Beklemishev, 1969). Energeticky účinnou cestou, jak vyplnit prostor a rozšířit výživu po vícebuněčném organismu je symetrie fraktální (Weibel, 1991).

Objekty symetrie jsou různé a lze je rozdělit do 3 kategorií – konzistentní, částečně konzistentní a nekonzistentní – podle jejich typologie. Konzistentně symetrické objekty mají konzistentní typologii specifických landmarků (referenčních bodů) vykazujících určitou formu symetrie. I když se pozice landmarků a vzdálenosti mezi nimi mohou lišit, jejich počet se nemění. Pro měření těchto objektů jsou vhodné metody geometrické morfometrie. Částečně konzistentní objekty mají sice konzistentní typologii, ale počet landmarků se mezi jednotlivými druhy liší. Poslední kategorií jsou objekty nekonzistentní, které nemají konzistentní topologii, ani homologní landmarky, někdy ani shodné body. Měření asymetrie těchto objektů je komplikované (Graham et al., 2010).

2.1.1 Typy symetrie

Bilaterální symetrie není jediným typem symetrie v biologii, ale je tou nejvíce zjevnou u žijících organismů (Savriama and Klingenberg, 2006). Dále je možné u organismů nalézt symetrii rotační, typicky u květin, dihedrální u ostnokožců, helikální (spirálovitou) u plžů, kulovou u bičíkovců nebo translační symetrii u řas (Savriama and Klingenberg, 2006; Graham et al., 2010). Některé kolonie bakterií a hub vykazují více typů symetrie, včetně fraktální (Graham et al., 2010).

Rotační symetrie zahrnuje rotaci kolem jedné nebo více os. Pokud lze nalézt i osu zrcadlení, jedná se o symetrii dihedrální, jako u mořské hvězdice (Zabrodsky et al., 1995). V případě symetrie kruhové se jedná o nekonečně mnoho os pro rotaci i zrcadlení, ale pouze ve dvou dimenzích. Tento typ lze nalézt u klobouků hub. Helikální symetrie obsahuje rotaci a posun (translaci). Kolem osy probíhá rotace s podélnou translací. Dochází tak k šroubovitému (helikálnímu) vzhledu. Typický příklad lze nalézt u šneků, bakterií nebo virů. Sférická, také kulová, symetrie se vyskytuje u objektů, které využívají nejmenší plochy vůči objemu. Nemají předozadní ani pravolevou osu symetrie, největší symetrii vykazují ve třech dimenzích. Mezi takové patří například oocyty, blastuly a kolonie řas (*Volvox globator*). Translační symetrie zahrnuje posun objektu v jednom směru. Stejná struktura se tak v rámci organismu organizovaně opakuje. Najdeme ji například u sinic, kde se opakují jednotlivé buňky, také u kroužkovců nebo rostlin. Fraktální symetrie je symetrií měřítka. Fraktál označuje geometrický tvar, jehož každá část má stejný statistický charakter jako celek. V biologii můžeme nalézt příklad u větvičích se korálů nebo švů lebky (Graham et al., 2010).

Všechny tyto symetrie jsou jen přibližné. U průměru vzniklého z velkého vzorku se můžeme k perfektní symetrii přiblížit (Bishara et al., 1994; Graham et al., 2010).

2.2 Definice asymetrie

I když jsou naše geny naprogramované k tomu, aby výsledkem jejich produkce byla symetrie (Gateño et al., 2018), perfektní symetrie je pouze teoretický koncept, který se v přírodě zřídka kdy vyskytuje a v lidském těle se nevyskytuje vůbec (Bishara et al., 1994; Ko et al., 2009; Graham et al., 2010). Strukturální asymetrie je v lidském těle přirozený jev. Stačí si uvědomit asymetrii vnitřních orgánů jako srdce, játra, slezina, ale i uložení velkých cév (Cohen, 1995).

Během fyziologického vývoje organismu dochází k porušení symetrie zdánlivě symetrických částí těla, jako je obličej, a vznikají asymetrie (Parsons, 1992). Odchyly od perfektní symetrie je možné rozdělit do tří kategorií – flukтуаční asymetrie, direkcionální asymetrie a antisymetrie. Každý z těchto tří typů asymetrie je charakterizován odlišnou kombinací průměru a rozptylu distribuce rozdílů pravé a levé strany (Valen, 1962).

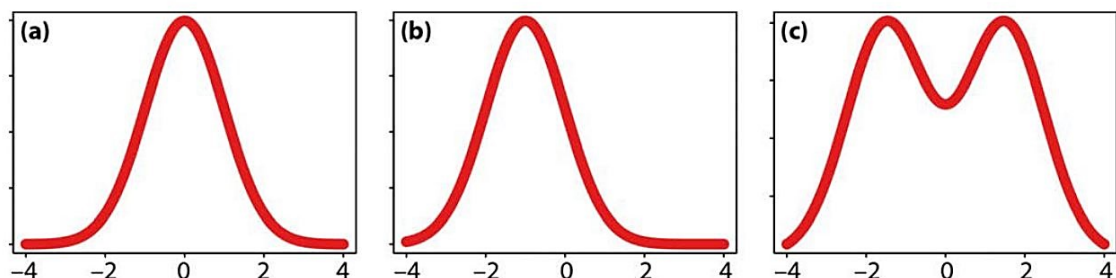
2.2.1 Fluktuální asymetrie

Fluktuální asymetrie (FA) je rozsah hodnot jemných a náhodných odlišností od perfektní symetrie (Klingenberg, 2003). FA je všudypřítomná a je výsledkem neschopnosti organismu vyvíjet se v přesně determinovaných drahách (Valen, 1962), je proto mírou vývojové stability (Palmer and Strobeck, 1992). Pro jednotlivce se odchylky znaku od cílového fenotypu, které se vyskytují na obou stranách těla, obvykle liší a způsobují určitý stupeň asymetrie (Klingenberg and Graham, 2015). Běžně tak lze u populace pozorovat určité hodnoty FA (Choi, 2015).

FA nevykazuje změny při zvýšení environmentálního nebo genetického stresu (Palmer et al., 1986). Při grafickém znázornění dochází k normálnímu rozložení signifikantních rozdílů na obou stranách od nuly, a průměrnému vývoji každé ze stran (Palmer et al., 1986).

2.2.2 Direkcionální asymetrie

Direkcionální asymetrie (DA) nastává, když je na jedné straně roviny symetrie větší vývoj znaku než na druhé. DA může být zjištěna průměrnými hodnotami znaku, který se systematicky liší mezi pravou a levou stranou (Valen, 1962). Přítomnost znaku na jedné straně převažuje v rámci populace, například uložení vnitřních orgánů (Valen, 1962; Klingenberg and Graham, 2015). Rozdíly mezi stranami mohou být různě velké, ale vždy jsou rozdílné od nuly a při grafickém znázornění je střed posunut více k jedné ze stran (Klingenberg and Graham, 2015).



Obrázek 1: Znázornění rozložení hodnot v grafu u různých typů asymetrie. Fluktuální asymetrie (a), direkcionální asymetrie (b), antisymetrie (c) (Klingenberg and Graham, 2015)

2.2.3 Antisymetrie

Antisymetrie je vzor asymetrie vyskytující se u většiny jedinců z populace. Co se týče strany výskytu znaku, odchylky jsou zcela náhodné. Daný znak se vyskytuje na pravé i na levé straně v rámci populace přibližně stejně často (Valen, 1962). Vzniká tak směs jedinců majících preferenci v pravé nebo naopak v levé straně (Klingenberg and Graham, 2015). Příkladem antisymetrie u člověka je pravorukost a levorukost.

2.3 Lidský obličej a mozková část

2.3.1 Bilaterální symetrie

Lidský obličej vykazuje bilaterální symetrii. Lze tedy říci, že pravá strana je obrazem levé a naopak. Asymetrie je charakterizována jako rozdíl ve vztahu pravé a levé strany. Tyto rozdíly se mohou vyskytovat ve velmi odlišné míře, od téměř nezaznamenané asymetrie až po naprosto zřejmou (Bishara et al., 1994; Codari et al., 2017). Asymetrie v obličeji není věkově specifická, vyskytuje se napříč všemi věkovými kategoriemi a u obou pohlaví (Rossi et al., 2003). Odlišení „normální“ asymetrie od „abnormální“ je poměrně složité a často je spojováno s klinickým významem (Bishara et al., 1994). Názory autorů, co je již považováno za asymetrii a co ještě ne, se značně liší. Někteří za ni považují jakýkoliv statistický rozdíl mezi stranami (Shah and Joshi, 1978), jiní vyhodnotí nesouměrnost jako asymetrii až od rozdílu 2 mm (Farkas and Cheung, 1981). Je těžké asymetrii definovat a záleží to na mnoha proměnných (Bishara et al., 1994).

Porovnáním pravé a levé strany obličeje lze odhalit asymetrie, které nejsou na první pohled patrné. Stačí, když obličej vertikálně rozdělíme na poloviny a poté překlopíme každou ze stran tak, aby vznikly zrcadlové obrazy. Vzniknou tři obličeje, první je spojením dvou pravých stran, druhý spojením levých stran a poslední je ten původní. Nezřídka jsou tyto obličeje velmi rozdílné, i když náleží jednomu jedinci (Burke, 1971).

2.3.1.1 Prenatální vývoj

Základ obličeje se začíná tvořit koncem 5. týdne intrauterinního vývoje. *Stomodeum*, primitivní ústní jamka, je ohraničeno pěti mezenchymovými výběžky – valy (Enlow and Hans, 1996). Kaudální část tvoří dva mandibulární výběžky, laterálně jsou dva maxilární výběžky a kraniální část tvoří frontonasální výběžek (Malínský et al., 2005).

Na laterálních stranách frontonasálního výběžku ztluštěním ektodermu vznikají dvě čichové plakody, které představují základ čichového epitelu. Postupně se zanořují a dají vzniknout nosním jamkám. Tím se z frontonasálního výběžku oddělí dva menší nosní valy – *processus nasalis lateralis* a *processus nasalis medialis*. Mediální nosní výběžky rostou kaudálně a zvětšujícími se maxilárními výběžky jsou tlačeny k sobě až srůstají. Tak vzniká intermaxilární segment, který poté po stranách srůstá s maxilárními výběžky a dává základ pro horní ret a horní čelist (Malínský et al., 2005). Maxilární a laterální nosní výběžky nejdříve nesrůstají, zůstává mezi nimi nasolakrimální rýha, ze které později vzniká *ductus nasolacimalis* a *saccus lacimalis*. Základ pro dolní ret a dolní čelist vzniká spojením mandibulárních výběžků v mediální rovině (Enlow and Hans, 1996).

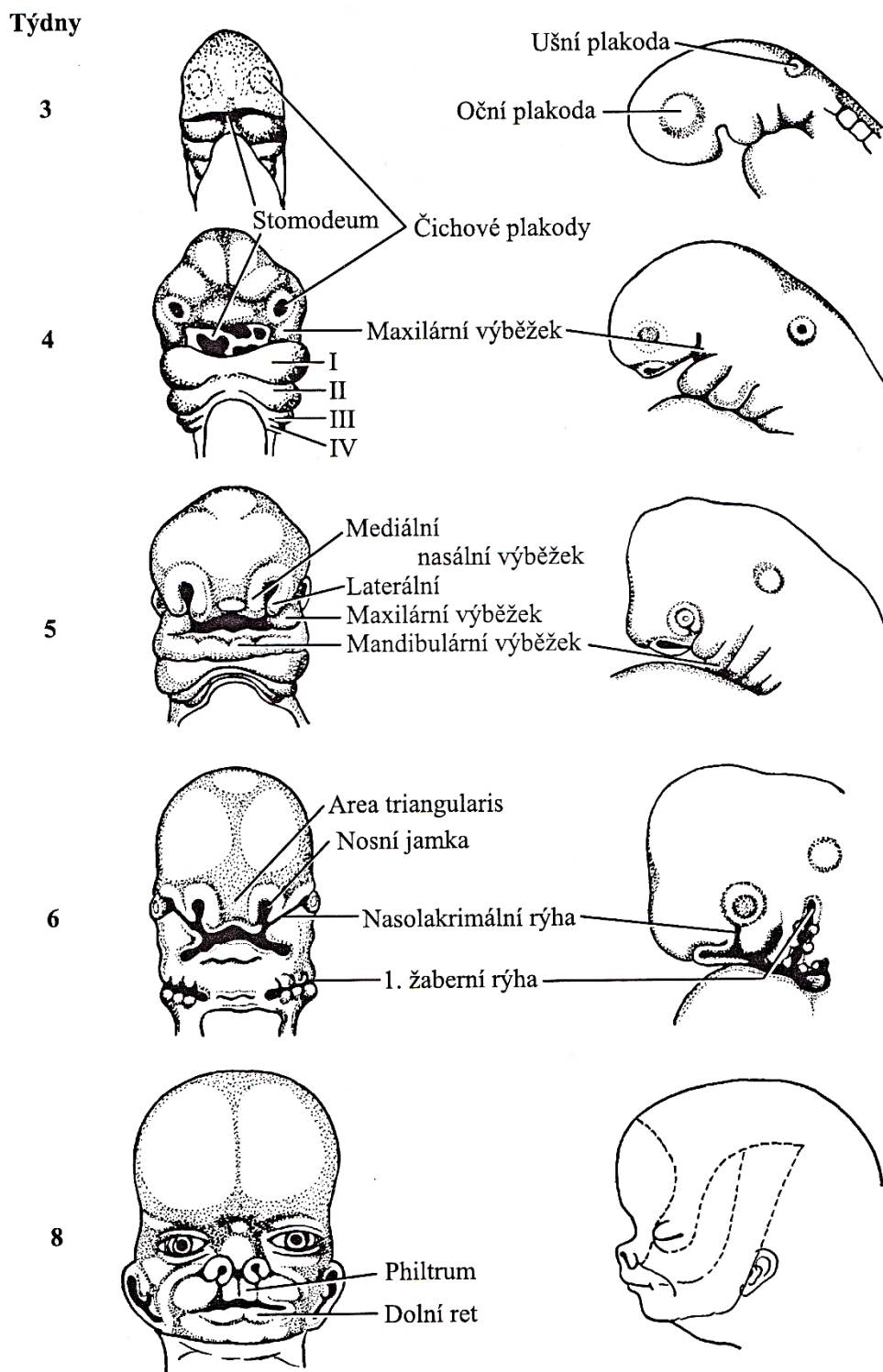
Srůstem nosních výběžků a prohloubením nosních jamek vzniká nos. Oči jsou nejprve uloženy laterálně, ale s růstem a postupným vývojem obličeje a mozku se přesouvají ventrálně. Růstem, a postupným srůstem, maxilárních výběžků vzniká horní čelist a tváře (Malínský et al., 2005).

Mezi prvním a druhým žaberním obloukem je ektodermální vkleslina, která se prohlubuje a vzniká z ní vnější zvukovod. Podél této vklesliny vznikají hrbolky na žaberních obloucích, ze kterých poté vzniká ušní boltec. Základ ucha je zprvu uložen kaudálně, až s dalším vývojem se přesouvá kraniálně (Enlow and Hans, 1996). Základní tvar obličeje je tak vytvořen na konci embryonálního vývoje, nepodobá se však konečnému stavu v dospělosti. Obličejová část je menší, nos nízký a plochý, dolní čelist úzká. Velikost hlavy u embrya odpovídá polovině jeho těla (Malínský et al., 2005).

V následujícím fetálním období dochází k dalšímu růstu a vývoji. Osifikací kostí lebky a růstem mozku postupně vzniká konečný prenatální tvar hlavy. Osifikace jsou dvojího typu, desmogenní – z vazivového základu a chondrogenní – z chrupavčitého základu. Desmogenně osifikuje většina kostí obličejové části (*splanchnocranium*) a klenby lební (*neurocranium*), chodrogenně osifikuje baze lební. Osifikace probíhá z osifikačních center. Mohou být umístěna uvnitř vaziva, pak je to osifikace endesmální, uvnitř

chrupavky – osifikace enchondrální, také se tato centra mohou nacházet na povrchu chrupavčitého základu, pak se jedná o osifikaci perichondrální (Čihák, 2011). Jakmile kost tvoří mineralizovaná buněčná hmota, buňky se nemohou dále dělit. Kosti proto rostou jen v určitých oblastech, kde je kostní tkáň nahrazena vrstvou vaziva nebo chrupavky. Taková místa se nazývají růstové zóny (Šmahel, 2001). Najdeme je u spojení kostí lebky, např. synchondrosy lební baze, švy na klenbě lebeční a další spojení na lebce.

Obličej je na konci prenatalního období stále relativně malý, čelisti nejsou dovyvinuté, chybí prořezané zuby a díky tomu je nízký skus. Také vedlejší nosní dutiny jsou malé, jejich vývoj se dokončuje až později postnatálně (Malínský et al., 2005).



Obrázek 2: Prenatální vývoj obličeje (Malinský et al., 2005)

2.3.1.2 Postnatální vývoj

Hlava novorozence tvoří již čtvrtinu jeho těla, tvar ale není definitivní. Obličej novorozence není pouhou zmenšeninou dospělého, proporce i tvar jednotlivých kostí se liší. Změna proporcí a tvaru se nazývá anatomická remodelace. Jejím základem je aposice a resorbce, které probíhají na endostálním (vnitřním) a periostálním (vnějším) povrchu kosti. Aposice, přibývání kostní hmoty, probíhá na jedné straně, a na straně protilehlé probíhá resorbce, odbourávání. Dle intenzity a rozložení obou procesů dochází ke změně tvaru kosti a přesunu komponent do jiné polohy (Šmahel, 2001).

Co se dynamiky týče, máme na lebce dva typy růstu. U obličeje je to růst faciální a u mozkové části růst kraniální. V prvních letech života intenzivněji roste mozkovna, která v 6-ti letech dosahuje více než 90 % své velikosti. Zatímco obličej roste později a nejintenzivnější období je 6–18 let (Enlow and Hans, 1996; Šmahel, 2001). Zhruba do věku 11-ti let nejsou mezi chlapci a dívkami růstové rozdíly. Ve věku 11–12 let se u dívek projevuje pubertální růstový spurt a obličej se formuje do dospělého. Tento růst poté rychle klesá a ve věku 14–15 let je růst obličeje dokončen. U chlapců začíná růstový spurt později a končí až ve věku 16–17 let (Ferrario et al., 1998). V pubertě se také dotváří vedlejší nosní dutiny, které ovlivňují výsledný tvar obličeje (Malínský et al., 2005).

Ve věku 7–18 let dochází také ke značnému vývoji měkkých tkání (Nanda et al., 1990). Měkké tkáně jsou spojeny s kostěným podkladem, tudíž i jejich vývoj je spjat s vývojem lebky.

2.3.1.3 Faktory ovlivňující vznik asymetrie

Během života nás ovlivňuje mnoho faktorů, ať vnitřních nebo vnějších. Na vznik asymetrie působí řada faktorů již během prenatálního vývoje. Znečištěné prostředí, stres matky, toxiny jako tabákové výrobky, drogy a další, to vše způsobuje vyšší hodnoty asymetrie (Gawlikowska et al., 2007). Postnatálně environmentální faktory významně ovlivňují výsledný tvar obličeje – hormony, výživa, nemoci, úrazy, operace, životní styl, aj. (Proffit et al., 2013). Část vnějších faktorů lze ovlivnit, jako je správné a střídavé polohování hlavičky novorozence (Lennartsson et al., 2016). Funkční faktory nebo růstový potenciál dolní čelisti také ovlivňují asymetrii lebky během růstového období (Kwon et al., 2006). Asymetrie později souvisí i s preferovanou stranou mastikace. Pokud jedinci

preferují pravou stranu před levou, větší asymetrie se objevuje na pravé straně obličeje. Mastikace působí tlakem na zuby, zuby působí na kosti lebky a tím ovlivní asymetrii obličeje (Shah and Joshi, 1978). S tím souvisí i složení potravy a socioekonomický status jedince (Bigoni et al., 2013).

Vnější faktory nejvíce ovlivňují horizontální asymetrii obličeje a výšku ramene dolní čelisti. Vliv mají i genetické faktory, které ovlivňují až 70 % fenotypových změn, hlavně nos, prominenci rtů, vzdálenost mezi očima a celkovou velikost obličeje. Cílem studia těchto faktorů je lepší porozumění fenotypovým změnám ve tvaru obličeje napříč různými populacemi (Djordjevic et al., 2016). Environmentální faktory mohou mít vliv na epigenetické mechanismy – dědičné funkce genů, ke kterým dochází bez změny v sekvenci DNA (Hartsfield et al., 2012).

2.3.2 Rovina symetrie

Pro hodnocení bilaterální asymetrie je třeba určit rovinu symetrie, která nám objekt rozdělí na dvě poloviny. Existuje mnoho způsobů určení této roviny. Který způsob si autor výzkumu pro svou studii vybere, záleží zcela na něm.

Mezi nejjednodušší způsoby patří zvolení roviny, která prochází jedním nebo několika body nebo je kolmicí na jinou rovinu. U fotografií lze použít rovinu, kterou získáme kolmicí vedenou středním bodem spojnice čoček (Dahan, 2002). V případě zvolení anatomických landmarků lze použít rovinu procházející bodem *crista galli*, který je obecně přijímán jako střed lebky (Enlow and Hans, 1996), a zároveň kolmou na horizontální rovinu protínající body *latero-orbitale* (Kim et al., 2011). V maxilo-mandibulární oblasti lze ještě k bodu *crista galli* přidat body *spina nasalis anterior* a *menton* (Masuoka et al., 2005). Takto zvolená rovina symetrie je poměrně velkým odhadem, dnes se již tento způsob téměř nevyužívá.

Naopak velmi využívaným způsobem je metoda superimpozice. Zvolí se několik landmarků, např. *basion*, *sella*, *nasion* (Zheng et al., 2018), *glabella* nebo *subnasale* (Choi, 2015), originální obraz zafixuje a překryje svým zrcadlovým obrazem tak, aby mezi nimi vznikl co nejmenší rozdíl. Vznikne průměr originálu a zrcadlového obrazu a tím i výsledná rovina symetrie (Besl and McKay, 1992). Pro rovinu založenou na landmarcích lze poté použít landmarky, které jsou nejbližší rovině vzniklé překrytím (Shin et al., 2016). Aby se

mohl hodnotit 3D objekt (např. CT snímek), lze vložit Frankfurtskou horizontálu kolmou na získanou midsagitální rovinu. Lze ještě přidat frontální rovinu, která je kolmá na rovinu Frankfurtskou (Zhang et al., 2018).

Metoda superimpozice funguje při menších asymetriích poměrně dobře, ale při větších rozdílech mezi stranami může docházet ke zkreslení superimpozice asymetrickými oblastmi. Při odhadu roviny symetrie může vzniknout více rovin a těžko se odhaduje, která je správná. Gateño et al. (2016) proto vytvořil vlastní algoritmus, pomocí kterého se snažil najít perfektní rovinu symetrie pro jakéhokoliv jedince. Zastává názor, že nejlepší rovina je ta, která by byla přítomna u daného jedince, pokud by nebyl vystaven během vývoje stresovým faktorům a měl by obličej symetrický. Tuto rovinu nazval „původní referenční rovina“. K analýze využil prokrustovské analýzy a hodnotil tvar, tzn. odstranil faktor velikosti. Pomocí algoritmu zhodnotil skóre asymetrie jednotlivých landmarků, ty asymetrické vyřadil a pomocí zbývajících spočítal původní rovinu (Gateño et al., 2016).

Mimo odstranění asymetrických landmarků lze použít metodu, kde se přiřadí hodnoceným oblastem různá váha důležitosti. Např. asymetrickým oblastem se přiřadí menší váha a těm více symetrickým větší. Je možné tím snížit nepříznivý vliv na superimpozici (Gateño et al., 2018).

Kromě toho, že rovinu symetrie ovlivňuje výběr landmarků (Kim et al., 2011), také ho v případě 3D zobrazení, ovlivňuje výběr a pořadí rovin, ve kterém se sestaví. Jelikož pro 3D zobrazení potřebujeme soustavu souřadnic, jsou nutné 3 osy. Typicky to bývá midsagitální, horizontální a transverzální. První zvolená rovina bývá určující pro další dvě – jsou na ni kolmé. Pokud sestavíme první midsagitální rovinu a zbylé podle ní, dostaneme jiné výsledky než když jako první sestavíme horizontální rovinu (Yoon et al., 2014). Stejně tak ovlivňuje výslednou asymetrii i výběr landmarků, pomocí kterých sestavíme první rovinu (Kim et al., 2011).

Rovina symetrie lebky a měkkých tkání nemusí být nutně shodná. Pro chirurgické odstranění asymetrie na měkkých tkáních by se nemělo využívat roviny symetrie na lebce, mohly by tak vzniknout jen další asymetrie. Je třeba využít rovinu měkkých tkání (Kim et al., 2011). Jelikož lidský obličej není nikdy perfektně symetrický, neexistuje jednoduchá a jedinečná rovina symetrie (De Momi et al., 2006).

2.3.3 Měkké tkáně

I když se zbytkem populace sdílíme podobné obličejové rysy, je zde mnoho odlišností, které nás dělají jedinečnými. Ať už se jedná o velikost, tvar nebo strukturu měkkých tkání. K ještě větší individualitě přispívá asymetrie. Subjektivní hodnocení a vnímání asymetrie obličeje záleží právě na měkkých tkáních (Lee et al., 2010).

Důležité je posuzovat obličej relativně. Estetika obličeje je založena na subjektivním vnímání (Choi, 2015) a takové posouzení obličejové asymetrie není příliš přesné. Poměrně dobře lze odhadnout výraznou asymetrii vyžadující léčbu nebo lékařský zákrok, ale v případě lehké asymetrie se ji často nepodaří pouhým pohledem odhalit (Edler et al., 2001; Masuoka et al., 2005). Poměrně spolehlivě lze odhalit asymetrii až větší jak 2 mm (Economou et al., 2018).

Asymetrie se objevuje v různých částech obličeje s různou mírou signifikance (Berlin et al., 2014). Na tvářích je vyšší vrstva měkkých tkání oproti např. bradě, tudíž je zde možný silný vliv měkkých tkání. Měkké tkáně, zvláště sval žvýkací (*musculus masseter*), mohou kompenzovat asymetrii lebky. Lze tak vysvětlit jedince, kteří mají asymetrii nalezenou na lebce, ale na měkkých tkáních nebyla asymetrie odhalena nebo naopak (Masuoka et al., 2005). Tloušťka měkkých tkání v oblasti tváří je velmi variabilní, a to více u mužů než u žen. S věkem přímo nesouvisí, zatímco BMI má výrazný vliv (De Greef et al., 2006).

2.3.4 Lebka

Lebka tvoří tvrdý podklad pro měkké tkáně a udává základní tvar hlavy člověka. Anatomicky lze lebku rozdělit na dvě části – obličejovou část, *splanchnocranium*, a mozkovou část, *neurocranium*. Obličejová část je velmi zatížena pohlavním výběrem, symetrie zde odráží kvalitu genetické výbavy, je indikátorem zdraví a tím i potenciálně vhodného partnera (Perrett et al., 1999). Asymetrii v obličejí ovlivňuje i typ mastikace. U jedinců využívajících unilaterální typ mastikace, kdy většina preferuje pravou stranu (Diernberger et al., 2008), lze nalézt větší výskyt asymetrie v obličejí právě na straně preferované ke žvýkání (Vig and Hewitt, 1975). V dané polovině obličeje se nachází asymetrie hlavně v oblastech velkých svalů podílejících se na mastikaci (Chebib and Chamma, 1981). Podle studie Thiesen (2016) ztráta posteriorních zubů jako taková

neovlivňuje vznik asymetrie na dolní čelisti (Thiesen et al., 2016). Je zde ale možný vliv na volbu typu mastikace a nepřímo tím asymetrii může ovlivnit.

Stupeň asymetrie obličejové části lebky není dominantně ovlivněn mírou asymetrie mozkové části. Děje se tak díky kompenzačnímu růstu mandibulofaciálních struktur, kdy dolní čelist může kompenzovat vliv asymetrie mozkové části na obličejovou oblast během růstového období (Kwon et al., 2006).

Asymetrie mozkové části lebky souvisí s vývojem mozku. Nesouměrný vývoj mozkových hemisfér svým tvarem ovlivňuje vznik asymetrie na lebce (Vannucci et al., 2019). I ve velikosti mozku jako celku můžeme pozorovat rozdíly, hlavně mezipohlavní. Muži mají v průměru o 8–10 % větší mozek než ženy (Filipek et al., 1994) a tím i lebku. Výskyt asymetrie na mozkové části také souvisí s dominancí jedné horní končetiny pro unilaterální činnosti (LeMay, 1977), kdy většina jedinců preferuje pravou ruku (Hellige, 2001).

Výsledky studií jsou různé, někteří autoři uvádí větší výskyt asymetrie na pravé polovině lebky (De Moraes et al., 2011), někteří na levé straně (Chebib and Chamma, 1981). Interpretace výsledků závisí na použité metodě, jelikož mezi výsledky může být díky rozdílné metodě značný rozdíl (De Moraes et al., 2011). Rozdílné výsledky může způsobit i volba populace, jelikož během evoluce došlo k řadě specifických změn v morfologii lebky člověka díky adaptaci na různé události. Gawlikowska a kolektiv (2007) zjistili u středověké populace větší výskyt asymetrie na klenbě lební a u moderní populace byla větší asymetrie na bazi lební (Gawlikowska et al., 2007).

2.3.5 Vztah měkkých tkání a lebky

Měkké tkáně kopírují tvar lebky a vztah mezi nimi vytváří výsledný vzhled člověka. Někteří lidé mohou mít na první pohled symetrický obličej, ale pokud se udělá RTG nebo CT, mohou se objevit výrazné asymetrie na lebce (Masuoka et al., 2005). Měkké tkáně kompenzují asymetrii lebky, aby byl výsledek co nejsymetričtější (Shah and Joshi, 1978). Závažnost lebeční asymetrie tudíž neurčuje závažnost asymetrie obličejové (Kwon et al., 2006). Kompenzace však není omezena jen na měkké tkáně, může se vyskytovat i na úrovni tvrdých tkání (Nur et al., 2016).

V místech, kde je poměr tvrdých a měkkých tkání vyrovnaný, jako v bodě *menton*, není moc prostoru pro kompenzaci. Naopak v místech, kde se nachází širší vrstva měkkých tkání, možnost potenciální kompenzace asymetrie narůstá (Nur et al., 2016). Nejnížší korelace mezi měkkými a tvrdými tkáněmi byla nalezena v bodě *cheilion*, tento bod není neovlivněn ani nakloněním okluzální roviny, je zde proto velký prostor pro kompenzaci. Naopak asymetrie v bodě *gonion* velmi koreluje s asymetrií lebky (Economou et al., 2018). Objem nebo funkce přilehlého svalu může měnit jednotlivé součásti craniofaciálního komplexu. Např. *musculus masseter* ovlivňuje zmiňovaný bod *gonion*, také šířku *arcus zygomaticus* a *fossa temporalis* (Kitai et al., 2002).

Asymetrie měkkých tkání klesá blíže k neurokranium (Economou et al., 2018) a nejméně se vyskytuje na horní třetině obličeje a roste směrem dolů (Severt and Proffit, 1997). Souvisí to nejspíše i s asymetrií dolní čelisti, která je pohyblivá a má delší periodu růstu než horní čelist (Kwon et al., 2006).

2.3.6 Pohlavní dimorfismus

Pohlavní dimorfismus představuje rozdíly v anatomii, morfologii a fyziologii mezi jedinci téhož druhu, přičemž nejvýraznějším rozdílem je zpravidla velikost těla nebo daného znaku (Ferrario et al., 1995b; Samal et al., 2007). U všech jedinců je pohlavní dimorfismus zřejmý a zodpovídá za podstatnou část variability obličeje (Enlow and Hans, 1996; Velemínská et al., 2012; Drgáčová et al., 2016), přičemž pohlavní znaky vyjadřující tvar jsou zřetelné hlavně u žen, u mužů je pohlavní dimorfismus spojován především s velikostí (Velemínská et al., 2012). Tvaru obličeje přispívá také tloušťka měkkých tkání, která je větší u mužů než u žen. Vlivem morfologických změn během stárnutí, které jsou pro každé pohlaví odlišné, dochází k postupnému snižování pohlavního dimorfismu (Drgáčová et al., 2016).

2.4 Sledování asymetrie

Většinu studií sledujících asymetrii obličeje lze rozdělit na dvě části. Ty starší sledují asymetrii pomocí fotografií a RTG snímků, ty novější pomocí výpočetní tomografie (Gateño et al., 2018). Nejsou to však jediné metody sledování.

2.4.1 Fotografie

Jeden ze způsobů, jak hodnotit asymetrii měkkých tkání, je fotografie. Nejedná se o nevhodnější metodu, ale výhodou takového zkoumání je dostupnost a neinvazivnost (Edler et al., 2003). Aby došlo k co nejmenšímu zkreslení při pořizování fotografií, je třeba dodržet standardizovaný postup jako pozice objektivu, vzdálenost jedince, pozice hlavy, úhel a vzdálenost osvětlení, aj. (Claman et al., 1990; Edler et al., 2003).

Stejně jako u jiných typů zobrazení obličeje, je možné měřit vzdálenosti landmarků od roviny symetrie nebo jiné zvolené roviny, či úhly. Například úhel průsečíku dvou landmarků k vybrané rovině (Hwang et al., 2007). Asymetrii lze měřit i na určitých křivkách či obrysech obličeje přeložením jedné strany přes druhou a porovnáním rozdílu (Coghlan et al., 1993; Dahan, 2002). Pro rovinu symetrie lze použít bod *glabella* a *subnasale* (Choi, 2015). Záleží na správném určení roviny symetrie, špatné určení této roviny může ovlivnit výsledky (Edler et al., 2001).

2.4.2 RTG

Pro studium asymetrie z RTG snímků se používá cefalometrické analýzy. Využívá se cefalostatu, přístroje, pomocí kterého se standardizuje postavení hlavy jedince během pořizování snímku. Do vnějšího zvukovodu pravé i levé strany se vsune polohovací špička, která zajistí stejnou vertikální i horizontální polohu zvukovodů (Gateño et al., 2018). Opěrkou nosu se poté dotvoří Frankfurtská horizontála. RTG snímky musí být pořízeny za standardizovaných podmínek, aby nedocházelo ke zkreslení rotací či jinou polohu hlavy (Dahan, 2002). Změna postavení může vnést chybu do hodnocení asymetrie (Lee et al., 2007). Umělé vytvoření postavení hlavy ale není nevhodnější, jelikož se tím mohou některé asymetrie skrýt, typicky v oblasti uší (Gateño et al., 2018).

Nejčastěji se při hodnocení asymetrie na RTG snímcích využívá lineárního měření, které je založeno na měření vzdálenosti homologních landmarků od roviny symetrie (Russett, 2007; Choi, 2015). Po změření vzdálenosti lze měřit i úhly, např. úhel mezi průsečíkem landmarků k vybrané rovině (Masuoka et al., 2005; Hwang et al., 2007). Kombinací lineárního měření a měření úhlů lze asymetrii prezentovat pomocí indexů (Chebib and Chamma, 1981).

Dalším způsobem hodnocení je použití anatomických landmarků, které se spojují v trojúhelníky. Délky stran trojúhelníků se poté změří, spočítá se obsah a tyto obsahy se porovnají mezi stranami (Vig and Hewitt, 1975). Mezi velmi využívané landmarky při hodnocení asymetrie patří *lateroorbitale*, *menton*, *jugale*, *mastoidale* (Edler et al., 2003; Choi, 2015). Jako landmarky podléhající minimální identifikační chybě, a tím i velmi vhodné, byly zjištěny *mastoidale*, *lateroorbitale* a *antegonion* (Athanasίου et al., 1999). *Menton* se ukázal jako relevantní bod pro posouzení asymetrie dolní čelisti (Masuoka et al., 2005).

Většina vědců používá AP (*anteroposterior*) RTG, ale u dat, kde není AP snímek zcela vyhovující, se dá k doplnění použít ještě SMV (*submentovertex*) RTG (Edler et al., 2001). SMV spolu s AP snímky se dají využít k vytvoření 3D obrazu a hodnotit tak charakter asymetrie (Grayson et al., 1983), ale tato metoda není příliš využívaná. AP nebo laterální RTG snímky byly tradičně primární metody pro kraniofaciální analýzu. U těchto snímků je velmi těžké a občas nemožné hodnotit asymetrii ve 3D, protože anatomické struktury se překrývají (Katsumata et al., 2005).

Další možností analýzy je superimpozicí promítnout RTG snímek do fotografie a porovnat tak asymetrii tvrdých a měkkých tkání (Dahan, 2002).

2.4.3 3D metody

3D metody využívají k hodnocení asymetrie tři na sebe vzájemně kolmé přímky, tzv. Kartézskou soustavu souřadnic, kde každá přímka obsahuje jednotky, pomocí kterých se určuje poloha landmarků nebo se měří různé vzdálenosti. Může to být midsagitální, koronální a axiální rovina (Katsumata et al., 2005). Aby bylo hodnocení asymetrie co nejpřesnější, je třeba znát skutečnou rovinu symetrie. Bohužel se často setkáváme s tím, že autor pro odhad této roviny použije jen několik málo landmarků. Pokud by vybral landmarky jiné, mohou se výsledná data značně lišit (Fang et al., 2016; Gateño et al., 2016, 2018).

Měření asymetrie je přesnější pokud použijeme metodu založenou na povrchu, nikoli metodu založenou pouze na landmarcích a měření vzdáleností mezi nimi (Verhoeven et al., 2016). Lze použít i kombinace těchto dvou metod. Landmarky ohraničí plochu, která autora zajímá a PC program plochu už sám automaticky vybere (Codari et al., 2017). Je

možné takto obličej rozdělit na více částí. Vybranou plochu lze označit i manuálně, vybarvením dané plochy. Rovina symetrie je poté vypočítána pomocí algoritmu, vzhledem k označeným oblastem (De Momi et al., 2006).

Nejpoužívanější metodou zobrazení ve 3D je výpočetní tomografie (CT). CT snímky zobrazují struktury mnohem více realisticky, lépe se zobrazuje asymetrie i celková morfologie (Nur et al., 2016). Mohou se zde prohlížet různé struktury z různých úhlů pohledu díky rychlému a interaktivnímu přemístění 3D obrázků. Může to být velmi užitečné při hodnocení diagnózy a plánování chirurgické léčby. Na rozdíl od RTG snímků zde není problém s překrýváním struktur a landmarky mohou být zadány přesně (Bajaj et al., 2011). Pokud srovnáme v detailu umístění landmarku na RTG a CT, např. na hraně struktury, nemusí být landmark v obou případech umístěn přesně na to stejné místo (Katsumata et al., 2005). Můžeme zde díky tomu vidět i značné rozdíly ve výsledcích měření asymetrie (De Moraes et al., 2011). U 3D CT je možné přesné měření skutečných rozměrů, ať už vzdáleností nebo úhlů, bez deformace, která vzniká u RTG snímků (Kwon et al., 2006; Choi, 2015).

Pro hodnocení asymetrie lebky je CT snímek velmi vhodný, ale hodnocení asymetrie měkkých tkání naráží na problém, že CT snímky se běžně snímají v leže. To ovlivňuje výsledek měření asymetrie, kde se polohou v leže mohou některé asymetrie gravitací skrýt (De Greef et al., 2005). Dá se samozřejmě použít i snímání pacientů v sedě, s hlavou v přirozené pozici, na to je ale třeba specializovaného vybavení (Nur et al., 2016).

Do budoucnosti je cílem vystavit jedince co nejmenší dávce záření a zároveň zachovat kvalitu obrazu (Katsumata et al., 2005). U měkkých tkání lze k tomu využít 3D fotogrammetrie nebo optického skenování. Nevystavuje jedince radiačnímu záření, umožňuje rychlé antropometrické výpočty, anatomické zhodnocení i 3D transformace (Choi, 2015). Je ale nutné mít k dispozici příslušné technické vybavení, které je pro běžný výzkum finančně náročné a je tak dostupné spíše pro specializovaná pracoviště (Edler et al., 2003).

Další metodou je využití ultrazvuku. Je levný, přístupný, neinvazivní a je možné studovat jedince v přirozeně vzpřímené pozici. Jediným omezením je nutnost v obličejí zvolit neutrální výraz s povolenými svaly. Tato metoda není příliš využívána, i když se jeví jako velmi vhodná, možná nejvhodnější, pro studium asymetrie lidského obličejí (De Greef et al., 2006). Pro analýzu měkkých tkání je vždy lepší využít živé jedince,

post-mortem měření asymetrie není ideální. I přes zchovalost ostatků, tělo podléhá dehydrataci a postupnému rozkladu tkání (De Greef et al., 2006).

2.5 Využití studia asymetrie

Využití znalosti asymetrie nalzáme kromě antropologie a bioarcheologie v mnoha vědeckých oborech. Nejvíce v dentofaciální chirurgii a ortodoncii, kde je znalost asymetrie důležitá pro plánování operace (Choi, 2015). Stanovení asymetrie je důležité i pro léčbu a terapii morfologických deformací, kde se použije „zdravá“ polovina obličeje pro plán léčby (De Momi et al., 2006). Využití studia asymetrie se nalzá i v klinické genetice, kdy lze pomocí jednotlivých indikátorů rozeznat různé syndromy (Hammond et al., 2004). Také ve forenzních vědách se využívá znalosti asymetrie, a to k hodnocení morfologie obličeje, identifikaci osob nebo rekonstrukci obličeje (Evison, 1996).

3. Hypotézy a cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je sledovat asymetrii celého povrchu tvrdých a měkkých tkání hlavy v transversální studii. Od všech jedinců byl k dispozici CT snímek, ze kterého se získal povrch obou typů tkání. Bylo tak možné porovnat poté i jejich vzájemnou asymetrii. Byly stanoveny následující cíle:

1. Sledování asymetrie tvrdých tkání na CT snímcích metodami geometrické morfometrie.
2. Sledování asymetrie měkkých tkání na CT snímcích metodami geometrické morfometrie.
3. Sledovat vliv věku a pohlaví jedince na asymetrii.
4. Porovnat asymetrii měkkých a tvrdých tkání.

V návaznosti na literaturu a uvedené cíle práce byly stanoveny následující hypotézy:

1. Asymetrie se vyskytuje ve prospěch pravé strany.
2. Větší výskyt asymetrie je v obličejové části.
3. Asymetrie tvrdých a měkkých tkání je podobná.

4. Materiál

V této diplomové práci byl využit soubor 189 CT snímků dospělých jedinců současné české populace. Jedná se o snímky pacientů pražské Nemocnice Na Homolce, kteří dali souhlas s využitím jejich CT snímku ve výzkumu Laboratoře 3D zobrazovacích a analytických metod na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Všechny CT snímky byly anonymizovány, k dispozici zůstal znám pouze věk a pohlaví jedince. Pacienti byli snímáni v leže, bez zubních náhrad a se zavřenýma očima. Jelikož bylo pro tuto práci nutné mít celý povrch měkkých i tvrdých tkání, bylo mnoho jedinců vyřazeno např. kvůli chybějící špičce nosu na CT snímku. Další vyřazující kritéria byly morfologické deformace, zjevné operace a zlomeniny na lebce, absence zubů, otevřená ústa apod. Díky kritériím, která by mohla ovlivnit výsledek analýz, bylo použito 98 jedinců, z toho 50 mužů a 48 žen.

Věkové rozmezí jedinců je 21–84 let, ze kterého byly vytvořeny tři věkové intervaly pro sledování vlivu věku na asymetrii. Zastoupení a věkové rozmezí pro danou skupinu zobrazuje tabulka 1.

Tabulka 1: Věkové intervaly v souboru jedinců, počty jedinců a zastoupení mužů a žen

Věkový interval (roky)	Muži (počet)	Ženy (počet)
do 39,9	19	13
40,0–59,9	20	24
60,0 a více	11	11
Celkem	50	48

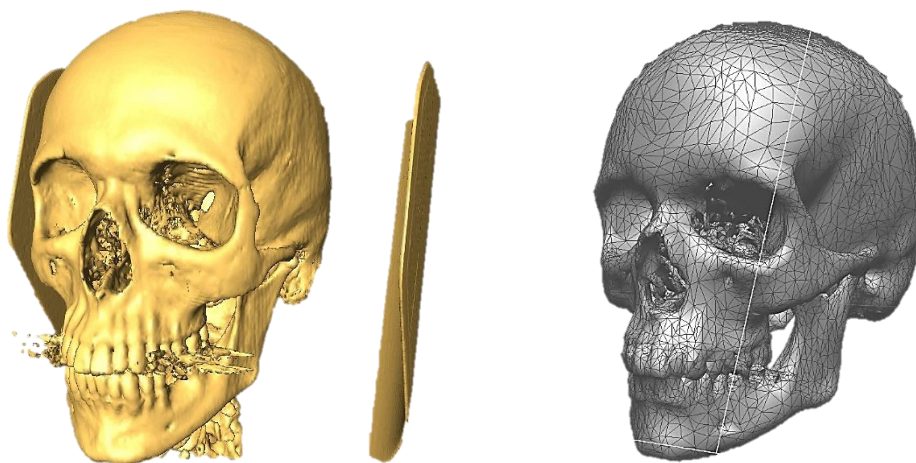
5. Metody

5.1 Výpočetní tomografie

Výpočetní tomografie (*computed tomography*, CT) je radiodiagnostická metoda využívající rentgenové paprsky k zobrazení částí těla v tenkých řezech. Pacient je zasunut do přístroje, kde ho po kruhové dráze obíhá rentgenka s detektorovou soustavou. Reálný řez je algoritmem rekonstruován na monitoru přístroje jako množina voxelů. Záření prochází různými tkáněmi různě, což se projevuje jako rozdílné stupně šedi a umožňuje tak rozlišit jednotlivé tkáně (Zuna and Poušek, 2000). Snímky, které jsou v práci využity, byly pořízeny přístrojem Somatom Definition Flash 2x128 od společnosti Siemens.

5.2 Úprava dat

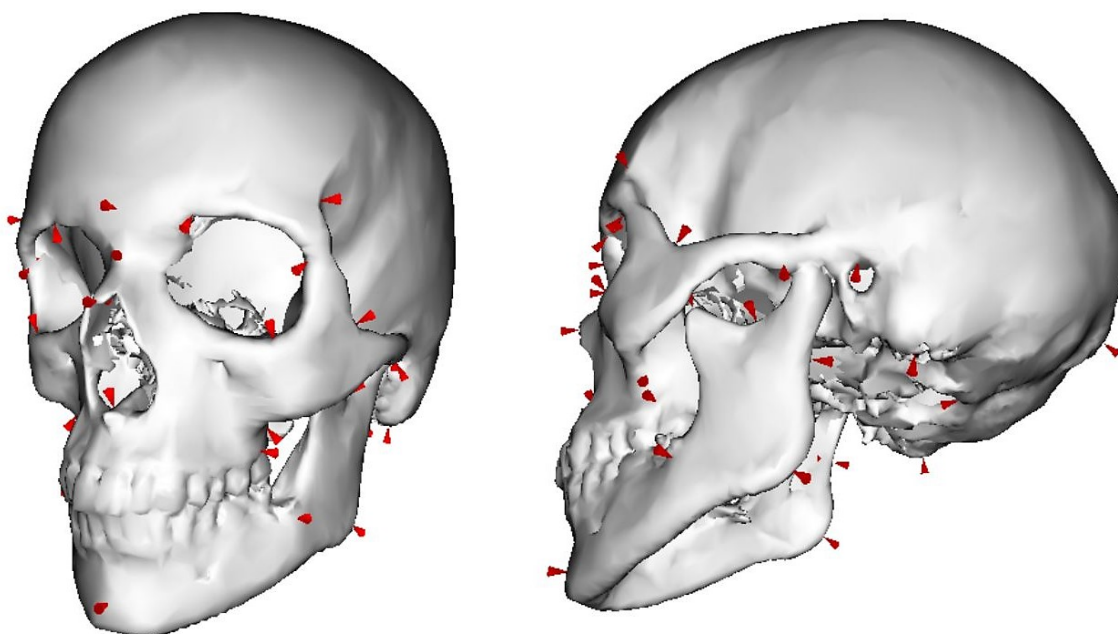
Pro analýzu dat bylo nutné z CT snímků oddělit měkké a tvrdé tkáně každého jedince. K tomu byl použit program Amira (Thermo Fisher Scientific, Zuse Institute Berlin), kde se dají tkáně díky automatické funkci *thresholdingu* oddělit a data uložit do jednotlivých souborů. Vznikl tak soubor pro tvrdé tkáně a soubor pro měkké tkáně od každého jedince.



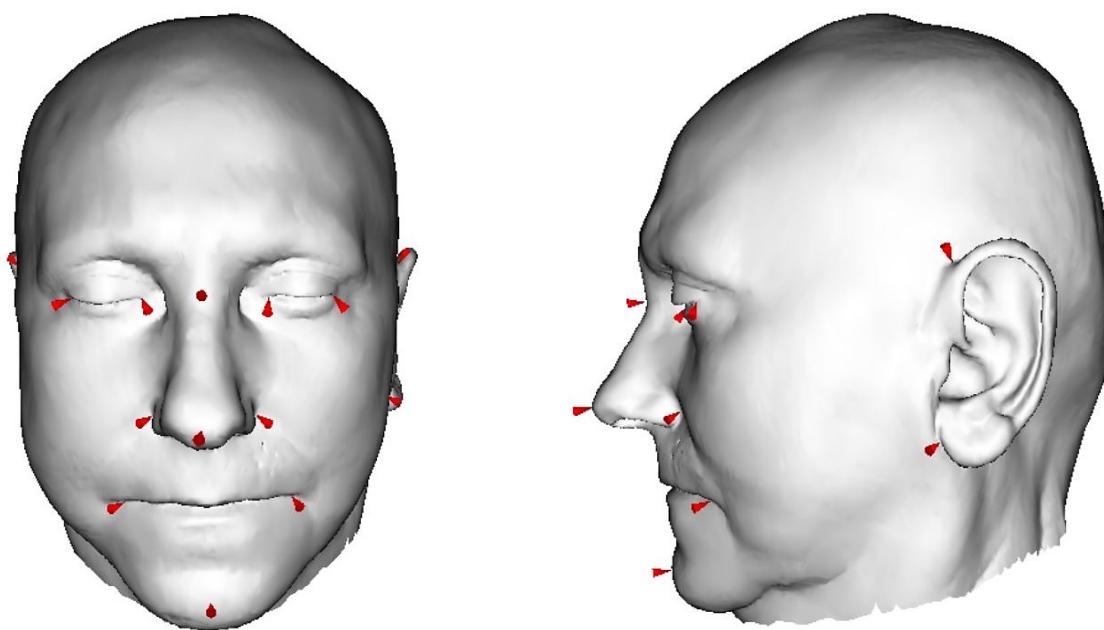
Obrázek 3: Původní CT snímek v programu Amira (vlevo), upravený snímek převedený na trojúhelníkovou síť v programu RapidForm (vpravo)

Exportovaný povrch byl nahrán do programu RapidForm XOS 2006 (INUS Technology Inc., Soul, Jižní Korea), který převedl daný povrch na trojúhelníkovou síť (obrázek 3). Z trojúhelníkové sítě byly následně ořezány nepotřebné části jako krk, krční páteř, paprsky od amalganových plomb u zubů, desky CT vedle hlavy, aj. Nakonec byl zredukován počet trojúhelníků v síti, tzv. decimování. Provádí se to z důvodu, aby měly všechny povrchy stejný počet trojúhelníků a byly vzájemně srovnatelné.

Na upravené povrchy byly v programu Morphome3cs II (Skupina počítačové grafiky, Katedra softwaru a výuky informatiky, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy v Praze a Laboratoř 3D zobrazovacích a analytických metod, Katedra antropologie a genetiky člověka, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze) manuálně nanášeny referenční body (landmarky). Landmarky jsou souřadnice bodů nacházejících se na anatomické struktuře, v místě zakřivení nebo jsou definovány jinými landmarky (Bookstein, 1997). Landmarky se musely nanášet na každý povrch zvlášť a v přesném pořadí, které bylo pro všechny jedince stejné. Na lebky bylo použito celkem 37 landmarků, na měkké tkáni 15 landmarků (obr. 4 a 5). Kvůli složitější morfologii lebky byl nutný vyšší počet landmarků než na povrchu měkkých tkání. Seznam použitých bodů a jejich popis je vypsán v tabulkách 2 a 3.



Obrázek 4: Umístění landmarků na povrchu lebek



Obrázek 5: Umístění landmarků na povrchu měkkých tkání

Tabulka 2: Použité landmarky na lebkách (podle Torok, 1890; Martin and Saller, 1959; Jung et al., 2020)

Název	Popis landmarku
Glabella	Nejvíce dopředu vystupující bod na čelní kosti, v mediální rovině mezi nadočnicovými oblouky.
Frontomalare orbitale	Párový. Bod na laterálním okraji očníce, kde ho protíná <i>sutura zygomaticofrontalis</i> .
Nasospinale	Bod na průsečíku mediální roviny se spojnicí nejnižších bodů na dolním okraji <i>apertura piriformis</i> .
Pogonion	Nejvíce anteriorně vystupující bod předního reliéfu dolní čelisti.
Gonion	Párový. Bod na <i>angulus mandibularis</i> vystupující nejvíce laterálně, dozadu a dolu.
Mastoidale	Párový. Bod na vrcholu <i>processus mastoideus</i> .

Opisthion	Bod na průsečíku mediální roviny se zadním okrajem týlního otvoru.
Inion	Bod ležící v mediální rovině na bazi zevního týlního hrbolu.
Porion	Párový. Bod na horním okraji vchodu zevního zvukovodu, protíná svislou přímkou jdoucí středem ušního otvoru.
Tuber articulare	Párový. Bod ležící nejvíce laterálně a dole na <i>tuberculum articulare</i> na <i>arcus zygomaticus</i> .
Jugale	Párový. Bod položený na okraji lícní kosti v úhlu, který tvoří zadní okraj <i>processus frontalis</i> a horní okraj <i>processus temporalis</i> .
Koronion	Párový. Nejvyšší bod na <i>processus coronoideus</i> .
Incisuralis	Párový. Bod ležící nejhluběji v <i>incisura mandibularis</i> vzhledem k linii spojující nejvyšší body na <i>processus condylaris</i> a <i>processus coronoideus</i> .
Crista zygomaticoalveolaris	Párový. Bod položený na okraji horní čelisti v úhlu, který svírá <i>processus alveolaris</i> a <i>processus zygomaticus</i> .
Ektomorale	Párový. Bod nejvíce laterálně položený na alveolárním výběžku horní čelisti.
Orbitale	Párový. Nejnižší položený bod na dolním okraji očnice.
Nasion	Bod průsečíku mediální roviny a <i>sutura frontonasalis</i> .
Rhinion	Nejnižší položený bod na <i>sutura internasalis</i> v mediální rovině.
Prominentia lateralis	Párový. Nejvíce laterálně položený bod na vnější straně těla dolní čelisti před předním okrajem jejího ramene.
Supraorbitale	Párový. Bod v nejvyšším místě okraji očnice.
Frontotemporale	Párový. Bod na <i>linea temporalis</i> nejbliže k mediální rovině.
Minimum ramus breadth posterior	Párový. Bod na zadním okraji ramene dolní čelisti v místě měření nejmenší šířky.

Tabulka 3: Použité landmarky na měkkých tkáních (podle Farkas, 1994; Kolar and Salter, 1997)

Název	Popis landmarku
Exocanthion	Párový. Bod na vnějším koutku oční štěrbině v místě styku obou očních víček.
Endocanthion	Párový. Bod na vnitřním koutku oční štěrbině v místě styku obou očních víček.
Nasion	Bod průsečíku mediální roviny a místa <i>sutura frontonasalis</i> .
Pronasale	Nejvíce anteriorně směřující bod na hrotu nosu.
Chelion	Párový. Bod na vnějším koutku úst v místě styku hranice červeně horního a dolního rtu.
Pogonion	Nejvíce anteriorně vystupující bod předního reliéfu dolní čelisti.
Otobasion superius	Párový. Bod na horním okraji místa upevnění ušního boltce ke spánkové oblasti.
Otobasion inferius	Párový. Bod na dolním okraji místa upevnění ušního lalůčku k oblasti dolní čelisti.
Nasal alar crest	Párový. Nejvíce laterální bod v zakřivení základny nosního křídla.

5.3 Analýza dat

Data byla analyzována v programu Morphome3cs II, který slouží pro výzkum především v oblasti antropologie a příbuzných oborů. Software je založen na metodách geometrické morfometrie (Bookstein, 1997; Slice, 2005), která se soustřeďuje na geometrický popis tvaru a formy vycházející z předem definovaných landmarků. Program obsahuje algoritmy pro vkládání landmarků u fotografií, 3D skenů i objemových dat. Data dále statisticky vyhodnocuje a výsledky prezentuje formou vizualizace. Analýzy se uskutečňují pomocí Coherent point drift – Dense correspondence analýzy (CPD – DCA), párové analýzy a analýzy asymetrie (Krajíček et al., 2012).

5.3.1 Coherent point drift – Dense correspondence analýza

Základní metodou analýzy dat je Coherent point drift – Dense correspondence analýza (CPD – DCA), která slouží k nerigidní registraci dat. Provádí se z důvodu nalezení shodných landmarků a sjednocení povrchů a vrcholů trojúhelníkových sítí (mesh) všech 3D modelů (Dupej et al., 2014). Jedná se o upravenou metodu Dense correspondence analýzy (DCA) navrženou Huttonem (Hutton et al., 2001), přičemž Coherent point drift algoritmus umožňuje urychlení výpočtů při zpracování velkého množství dat (Dupej et al., 2014).

Nejprve bylo třeba provést generalizovanou prokrustovskou analýzu (GPA), díky níž se podle shodných homologních landmarků všechny 3D modely zarovnají tak, aby mezi souhlasnými landmarky modelů vznikla co nejmenší vzdálenost. Trojúhelníkové sítě se zarovnají pomocí posunu, škálování a rotace (Gateño et al., 2018). Ze všech modelů je vybrán vzorový model (base mesh) pro ostatní modely (floating meshes). Výběr vzorového modelu může mít vliv na výsledné hodnocení asymetrie, tudíž by se mělo jednat o model, který se od ostatních příliš neliší a leží ve středu skupiny. Následně dochází k deformaci pomocí metody Thin-plate spline (TPS), kdy se modely zarovnají nalezením nejbližšího bodu vzorového modelu ke každému vrcholu daného modelu tak, aby byly co nejbližší u sebe. Nakonec je vytvořen nový model (corresponding mesh), který má stejnou typologii jako vzorový model, ale zachoval si svůj původní tvar (Krajíček et al., 2012).

5.3.2 Analýza asymetrie

V geometrické morfometrii je asymetrie hodnocena na spárovaných prvcích, párových landmarcích a vzdálenostech. Tato metoda pracuje s připravenými novými modely (corresponding meshes), které jsou výsledkem předchozí CPD – DCA. Ke každému modelu je negací vytvořen zrcadlově převrácený model, kterému je vnucena typologie nepřevráceného modelu za současného zachování jeho tvaru. K zrcadlovému převrácení dojde i u párových landmarků, těch je poté využito k zarovnání převráceného modelu na původní. Nepárové landmarky v midsagitální rovině zrcadlení neovlivní (Krajíček et al., 2012).

Individuální asymetrii lze vypočítat odečtením vzdáleností vrcholů původního a převráceného modelu každého jedince. Pokud by byly výsledné vektory nulové, jednalo by se o perfektně symetrické tvary (Hajeer et al., 2004). Průměrem všech vektorů individuální asymetrie je směrová asymetrie souboru (Krajíček et al., 2012).

5.3.3 Metody superprojekce

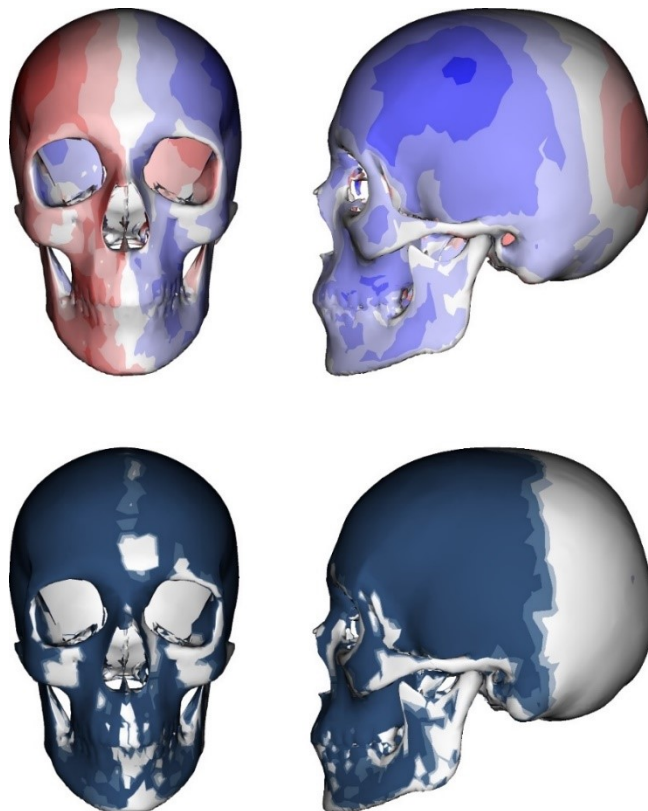
Výsledkem analýzy asymetrie v programu Morphome3cs II jsou barevné mapy zobrazující směrovou asymetrii (Krajíček et al., 2012) tvaru povrchu lebky a měkkých tkání. Pro vizualizaci výsledků byly použity červeno-modré mapy, které udávají rozdíly na vzorovém modelu (base mesh), přičemž barva udává vzdálenost mezi dvěma body trojúhelníkové sítě. U jednotlivců nebo v rámci skupiny červená barva značí, že převrácený model je před původním modelem (v protruzi) a má v daném místě vyšší hodnoty asymetrie. Modrá barva naopak značí, že je převrácený model za původním modelem (v retruzi) a hodnoty asymetrie jsou nižší než na druhé straně. Při hodnocení rozdílů asymetrie mezi pohlavími červená barva značí místa, kde mají výraznější asymetrii ženy a modrá barva značí místa, kde mají výraznější asymetrii muži.

Intenzita barvy v obou případech odpovídá hodnotám asymetrie, čím intenzivnější barva, tím je asymetrie výraznější. Bílá barva značí místa, kde převrácený model odpovídá původnímu a asymetrie se zde nevyskytl. Jelikož je asymetrie porovnávána s jejím zrcadlově převráceným protějškem, mělo by se umístění a intenzita červených míst na jedné polovině téměř shodovat s odpovídající intenzitou a umístění modré barvy na polovině druhé (Moslerová et al., 2018).

5.3.4 Per vertex T-test

Pro statistické vyhodnocení skupinového trendu direkcionální asymetrie, a zároveň k odfiltrování náhodných odchylek, využívá software per vertex T-test. Metoda je založena na dvouvýběrovém T-testu a je upravena tak, aby vyhodnotila rozdíly mezi všemi homologními vrcholy (vertexy) 3D modelu (Dadáková et al., 2016). Pracuje s vektory asymetrie, které byly naměřeny srovnáním modelu s jeho zrcadlovým obrazem.

Výsledkem vizualizace je barevná mapa signifikance (Krajíček et al., 2012). Statisticky významné p-hodnoty (p-value) jsou zobrazeny v odstínech modré barvy. Čím tmavší odstín modré, tím statisticky významnější rozdíl v oblasti je. Nejtmavší odstín modré barvy představuje p-hodnoty menší než 0,001. Střední odstín odpovídá p-hodnotám mezi 0,001 a 0,01. Nejsvětlejší odstín modré barvy odpovídá p-hodnotám mezi 0,01 a 0,05. Oblasti s bílou barvou pak odpovídají p-hodnotám vyšším než 0,05 a nevykazují statistickou významnost.



Obrázek 6: Příklad vizualizace barevných map. Červeno-modrá mapa znázorňující protruzi a retruzi (nahore) a mapa signifikance znázorňující statisticky významné oblasti (dole)

5.3.5 Analýza hlavních komponent

Analýza hlavních komponent (Principal component analysis – PCA) je metoda vícerozměrné statistiky, jejíž cílem je transformace dat z původních proměnných do menšího počtu latentních proměnných (hlavních komponent), které mají vhodnější vlastnosti a vystihují téměř celou variabilitu původních proměnných. Hlavní komponenty jsou nekorelované a jsou lineárními kombinacemi původních proměnných. První hlavní komponenta popisuje největší část variability (rozptylu) původních dat, druhá hlavní komponenta popisuje zase největší část rozptylu, která není obsažená v první komponentě atd. Platí, že součet rozptylů všech hlavních komponent je roven součtu rozptylů původních proměnných. Můžeme tak z podílu rozptylu dané komponenty usuzovat, jakou část variability vysvětluje. Pro dostatečné vysvětlení variability tak stačí brát v úvahu prvních pár hlavních komponent, většinou první dvě (Meloun and Militký, 2002).

Při rozhodování, které komponenty určit jako užitečné, se využívá indexového grafu úpatí vlastních čísel neboli sutinového grafu (scree plot). Graf zobrazuje jednotlivé komponenty a jejich podíl na celkové variabilitě. Součástí grafu je i dělicí čára (broken stick), která prochází zlomovým bodem označujícím největší změnu a odděluje užitečné komponenty (Meloun and Militký, 2002). Nad čarou lze pak vidět komponenty, které se na variabilitě podílí největší měrou.

Výsledkem PCA je rozptylový diagram komponentního skóre, graf PC skóre (scatter plot), který zobrazuje hodnoty prvních dvou komponent u všech jedinců. V grafu lze snadno nalézt shluk vzájemně si podobných jedinců a identifikovat jedince odlišné (Meloun and Militký, 2002). Pro zobrazení variability tvaru tvrdých i měkkých tkání byly využity grafy s 95% konfidenčními elipsami. Každý bod v grafu znázorňuje jednoho jedince a jeho pozici v rámci hlavních komponent. V uvedených grafech jsou znázorněny soubory dat pro tvrdé a měkké tkáně u obou pohlaví.

6. Výsledky

V této kapitole jsou výsledky pro lepší přehlednost řazeny do několika podkapitol. Při hodnocení asymetrie byl řešen tvar měkkých a tvrdých tkání na celém povrchu hlavy (lebky), faktor velikosti byl vynechán.

V prvních podkapitolách byly hodnoceny tvrdé tkáně, v dalších pak měkké tkáně. Nejprve byly hodnoceny zvlášť všechny ženy a všichni muži bez ohledu na věk. Poté byli jedinci postupně hodnoceni ve věkových intervalech, do kterých byli rozděleni. V prvním věkovém intervalu byli jedinci do 39,9 let, ve druhém od 40,0 do 59,9 let a ve třetím ve věku 60,0 a více let. Výsledky hodnocení asymetrie byly prezentovány pomocí barevných červeno-modrých map, které byly výstupem analýz asymetrie z programu Morphome3cs II. Kde červená barva značila protruzi v daném místě a modrá barva naopak retruzi. Bílá barva značila oblasti bez vzájemného rozdílu. I když byla na barevných mapách zobrazena asymetrie mezi stranami, nebyly nutně všechny tyto hodnoty statisticky významné, jak bylo patrné na mapách signifikance. Pomocí těchto map byly znázorněny statisticky významné oblasti.

Po zhodnocení asymetrie u žen a mužů zvlášť, byl hodnocen rozdíl mezi nimi. Podobně jako v předchozích kapitolách, byl pohlavní dimorfismus nejprve hodnocen u všech jedinců bez ohledu na věk, poté byli jedinci rozděleni do jednotlivých věkových intervalů. Na barevných mapách byla červeně znázorněna místa, kde byly nalezeny vyšší hodnoty asymetrie u žen, respektive byly v protruzi proti mužům. Modrou barvou byla znázorněna protruze mužů oproti ženám. Statisticky významné rozdíly byly znázorněny na mapách signifikance.

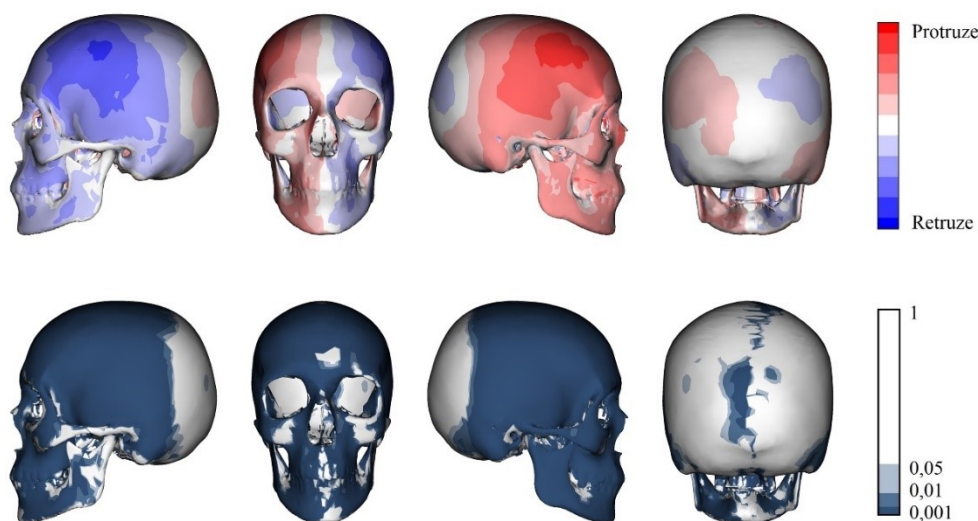
Další část práce se věnovala srovnání asymetrie měkkých a tvrdých tkání pomocí barevných map. Srovnání asymetrie jednotlivých typů tkání bylo hodnoceno pro muže a ženy zvlášť ve všech věkových intervalech.

Nakonec byla pomocí PCA hodnocena variabilita souboru a výsledky byly prezentovány v grafech. U vybraných hlavních komponent byl vizualizován jejich vliv na povrch tvrdých i měkkých tkání. Variabilita souboru byla hodnocena pro všechny jedince dohromady, bez rozlišení mužů a žen, byly znázorněny pouze dané věkové intervaly. Kromě hlavních komponent nejvíce se podílejících na variabilitě tvaru tkání byla hodnocena i variabilita asymetrie a vybraná komponenta, která ji zobrazila nejlépe.

6.1 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u žen

Nejprve byly hodnoceny všechny ženy ze souboru jako celek, bez rozlišení věku. Na většině povrchu tvrdých tkání byla zjištěna protruze pravé strany, levá strana pak naopak v retruzi. V obličejové části byla vyhodnocena protruze vpravo na celé ploše čelní kosti, inferiorně pokračující přes ocnice laterálně na kost lícni a mediálně na kost nosní. Odkud inferiorním směrem plynule přecházela kolem *apertura piriformis* na horní a dolní čelist. Mediální oblast lícni kosti byla vyhodnocena bez rozdílů mezi stranami. Na mozkové části lebky, stejně jako u obličeje byla zjištěna protruze vpravo na většině povrchu. Od čelní kosti posteriorně pokračovala protruze vpravo na temenní kost, kde zasáhla celou anteriorní a mediální část, odkud inferiorně pokračovala na spánkovou kost, která byla vyhodnocena jako protruzivní na pravé straně na celém povrchu. Posteriorně pokračující týlní kost vykazala protruzi naopak na levé straně, v mnohem menší míře a pouze v superiolaterální oblasti přecházející v posteriorní část temenní kosti. Zbylé oblasti týlní kosti nevykázaly rozdíly mezi stranami.

Statisticky velmi významné oblasti, s p-hodnotou menší než 0,001, byly nalezeny na většině výše zmíněných oblastech obličejové části lebky, jak bylo patrné z map signifikance. Čelní kost inferiorně přecházející přes ocnice na kost lícni a nosní, i dále navazující horní a dolní čelist vykazaly velmi významné rozdíly mezi stranami. Velmi významné rozdíly byly zjištěny i na mozkové části, a to na anteriorní a mediální části kosti temenní a celé kosti spánkové. Kost týlní byla vyhodnocena s menší mírou signifikance ($p = 0,05-0,001$) a pouze v mediální oblasti.

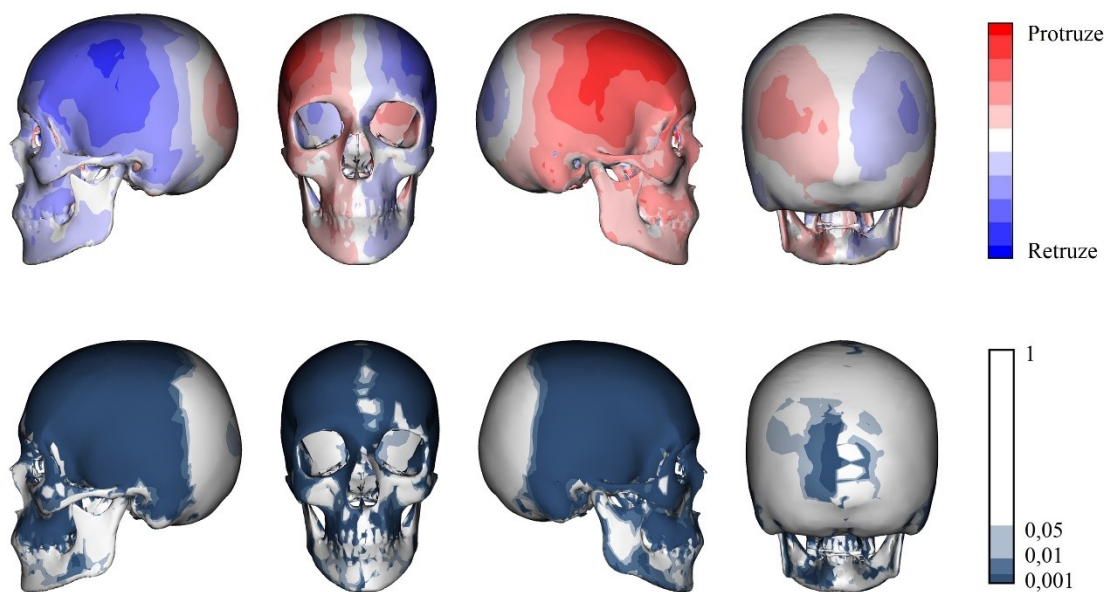


Obrázek 7: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u žen

6.1.1 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u žen ve věku do 39 let

U žen do 39 let byla na lebkách prokázána protruze obecně více na pravé straně. Rozdílné hodnoty mezi pravou a levou stranou byly v obličejové části nalezeny v oblasti čelní kosti. Při postupu inferiorně, se protruze vpravo nacházela v okolí očních, laterální část lící kosti s *arcus zygomaticus* a od kořenu nosu dolů až po laterální okraje *apertura piriformis*. Zde plynule navázala protruze pravé horní a poté i dolní čelisti, kde se nacházelo zbarvení téměř na celé ploše kosti. U mozkové části byla zjištěna protruze vpravo u anteriorní části kosti temenní, kde postupovala na kost spánkovou až k *processus mastoideus*. V posteriorní části temenní kosti a superiorní oblasti týlní kosti byla v menší míře také zjištěna asymetrie. Vyskytla se zde v obráceném umístění než na zbytku lebky, pravá strana se zde nacházela v retruzi. U ostatních oblastí (část temenní kosti a inferiorní část týlní kosti) nebyly zjištěny rozdíly mezi stranami.

Za statisticky velmi významné oblasti lze považovat oblast čelní kosti, která se dále protahovala na kost temenní a spánkovou, také okolí očních, laterální oblasti kosti lící a horní čelisti. Tyto oblasti byly zbarveny do nejtmaší modré, jejich p-hodnota byla nižší než 0,001. Oblasti střední a světlé modré barvy byly nalezeny v okolí *apertura piriformis*, na dolní čelisti a v oblasti nad *protuberantia occipitalis externa* týlní kosti. Ostatní oblasti nebyly statisticky významné.

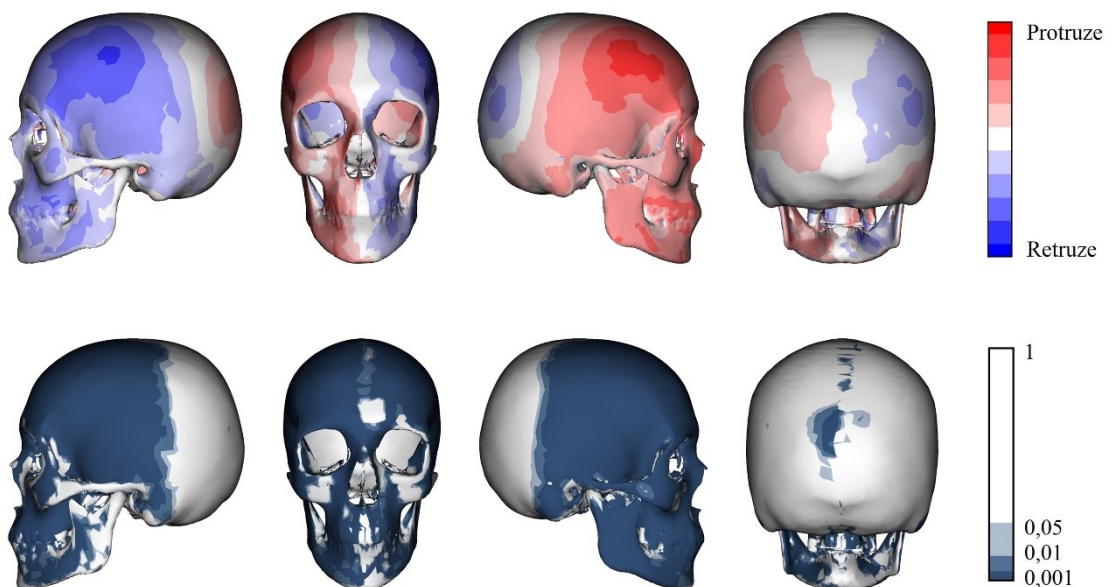


Obrázek 8: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u žen ve věku do 39 let

6.1.2 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u žen ve věku 40–59 let

U žen ve věkovém intervalu od 40 do 59 let podobně jako u předchozí podkapitoly byla nalezena protruze na většině povrchu pravé strany lebky. V obličejové části byla protruze pravé strany zjištěna na čelní kosti, přecházející na oblast v okolí očních, nosních kostech a kolem *apertura piriformis*. Směrem laterálním na kosti lící, inferiorně se pak vyskytla na horní a dolní čelisti v téměř celém povrchu kostí. Žádný významný rozdíl mezi pravou a levou stranou nebyl nalezen na mediální části lící kosti. Na mozkovně byla protruze pravé strany nalezena od čelní kosti směrem posteriorním k anteriorní části temenní kosti a inferiorně ke kosti spánkové. Část protruze vpravo přecházela za *processus mastoideus* na kost týlní. Posteriorní část kosti temenní a oblast kolem *protuberantia occipitalis externa* vykázala protruzi vlevo.

Za statisticky významné oblasti, s p-hodnotou menší než 0,001, lze podle map signifikance považovat čelní kost, oblast kolem očních, kořenu nosu a *apertura piriformis*, laterální část lící kosti. Inferiorně poté většinu plochy horní i dolní čelisti. Na mozkovně se v těchto hodnotách nacházela anteriorní část temenní kosti a kost spánková. Ve středních a světlých odstínech modré barvy se nacházela mediální část dolní čelisti a oblast okolo *protuberantia occipitalis externa*. Ostatní oblasti nebyly statisticky významné.

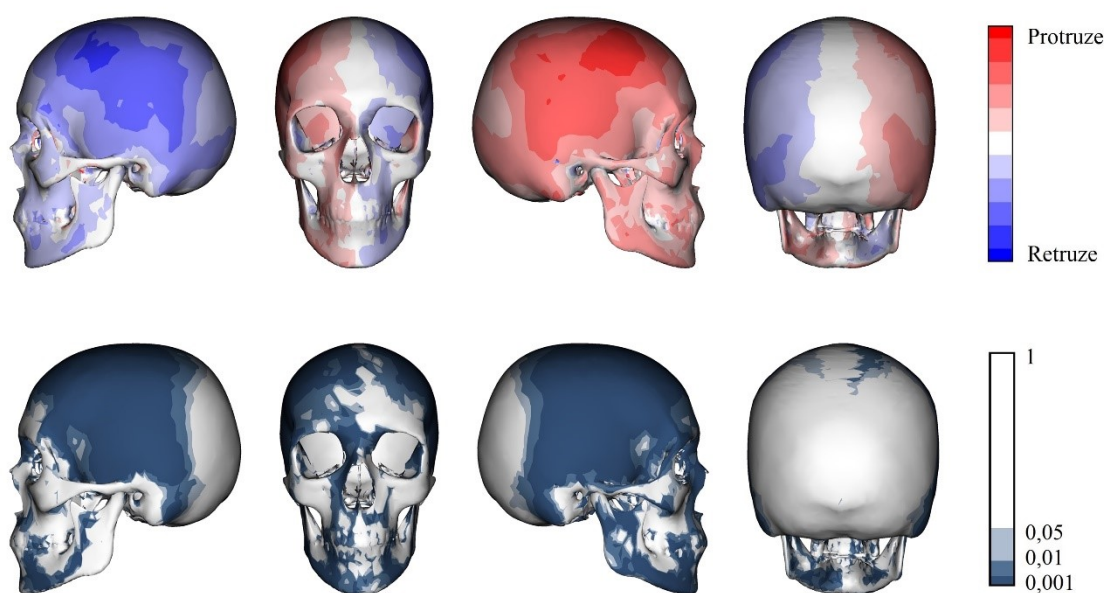


Obrázek 9: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u žen ve věku od 40 do 59 let

6.1.3 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u žen ve věku 60 a více let

Ve věkovém intervalu 60 a více let byla u žen nalezena protruze pouze pravé strany. Levá strana byla tudíž zjištěna pouze v retruzi. V obličejové části byl opět rozdíl mezi stranami patrný u čelní kosti, směrem inferiorním u kořene nosu, po vnějším okraji očnénice a okolo *apertura piriformis*. Rozdíly byly zjištěny i na laterální straně lící kosti a horní i dolní čelisti. V oblasti inferiorního okraje očnénice a anteriorní části lící kosti nebyl zjištěn rozdíl mezi stranami. Na mozkovně protruze pravé strany pokračovala posteriorně dál od čelní kosti ke kosti temenní a inferiorně ke kosti spánkové. U většiny jejich povrchu byla nalezena asymetrie. Trend protruze pravé strany byl zjištěn i u laterální oblasti kosti týlní. V oblasti midsagitální roviny, stejně jako u obličejové části, nebyl nalezen rozdíl mezi stranami.

Statisticky významné oblasti s p-hodnotou menší než 0,001 byly nalezeny převážně na mozkovně, a to superiorní oblast čelní kosti, anteriorní oblast temenní kosti a kost spánková bez *processus mastoideus*. Další významné oblasti byly zjištěny u kořene nosu a na rameni dolní čelisti. Odstíny střední a světlé modré se vyskytly na čelní kosti v oblasti *tubera frontalia* a u nadočnicových oblouků, také po okraji *apertura piriformis* a v mediální oblasti horní a dolní čelisti. Ostatní oblasti se neukázaly jako statisticky významné.

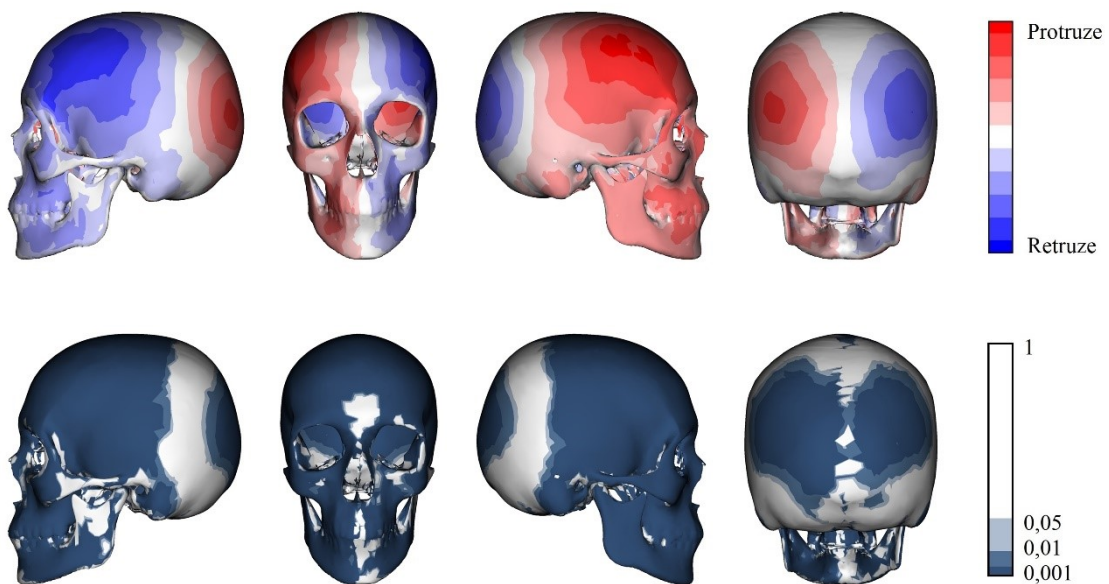


Obrázek 10: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u žen ve věku 60 a více let

6.2 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u mužů

Stejně jako u žen, i u mužů byli nejprve hodnoceni všichni muži ze souboru, bez věkového rozlišení. Na celém frontálním i laterálním povrchu lebky byla u mužů zjištěna protruze pravé strany. Obličejová část byla vyhodnocena jako protruzivní vpravo na celém povrchu, začínající na čelní kosti, inferiorně postupující kolem očníce, laterálně na kost lící a mediálně na kost nosní. Odtud inferiorně přecházela na horní a dolní čelist. Protruze pravé strany byla zjištěna i na mozkové části lebky. Od čelní kosti posteriorně postupovala protruze vpravo na anteriorní část kosti temenní a odtud inferiorně na kost spánkovou. Posteriorní část temenní kosti a superiolaterální část kosti týlní vykazala naopak pravou stranu v retruzi, protruzivní zde byla vyhodnocena levá strana. Zbylá část kosti týlní byla vyhodnocena jako bez rozdílu mezi stranami.

Na mapách signifikance byla nejtmaším odstínem modré barvy, s p-hodnotou menší než 0,001, vyhodnocena v obličejové části lebky kost čelní s výjimkou mediální plochy mezi nadočnicovými oblouky. Laterálně kost lící a mediálně kost nosní navazující na horní a dolní čelist byly také vyhodnoceny jako statisticky velmi významné. U mozkové části lebky byla v nejtmašších odstínech modré vyhodnocena anteriorní a posteriorní část kosti temenní, inferiorně přecházející v kost spánkovou a posteriorně v superiorní část kosti týlní. U zbylé části kosti týlní nebyl statisticky významný rozdíl.

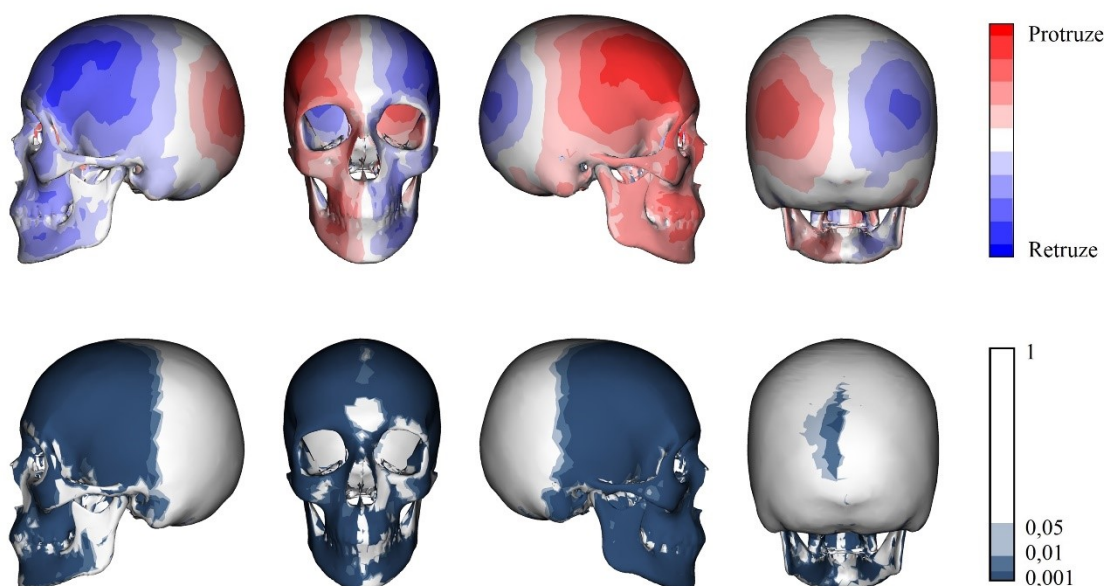


Obrázek 11: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u mužů

6.2.1 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u mužů ve věku do 39 let

U mužů ve věkovém intervalu do 39 let byla zjištěna protruze pravé strany na téměř celém povrchu obličejové části lebky. Od čelní kosti inferiorním směrem, pokračující přes okraje očníce mediálně na kořen nosu a laterálně na kost lící. Také kolem *apertura piriformis* a pokračující inferiorně na horní a dolní čelist byla zjištěna protruze na pravé straně. Na mozkovně byla zjištěna protruze na pravé straně u anteriorní části temenní kosti a kosti spánkové. U posteriorní části temenní kosti a superiorní části kosti týlní byla zjištěna protruze vlevo. Inferiorní část týlní kosti a midsagitální oblast byla vyhodnocena bez rozdílů mezi stranami.

Statisticky významné oblasti, s p-hodnotou menší než 0,001, byly lokalizovány v přední části lebky. Nejtmavší modrou barvou byla označena kost čelní, kromě oblasti mezi nadočnicovými oblouky. Inferiorně okraje očníce, mediálně kosti nosní a laterálně část kosti lící. Mezi statisticky významné oblasti byla také zařazena horní a dolní čelist. Z mozkové části byly významné oblasti zjištěny na anteriorní části kosti temenní a spánkové. Střední a světlé odstíny modré barvy se vyskytly v okolí *apertura piriformis*, na mediální části lící kosti a v oblasti *protuberantia occipitalis externa*. Všechny ostatní oblasti nebyly statisticky významné.

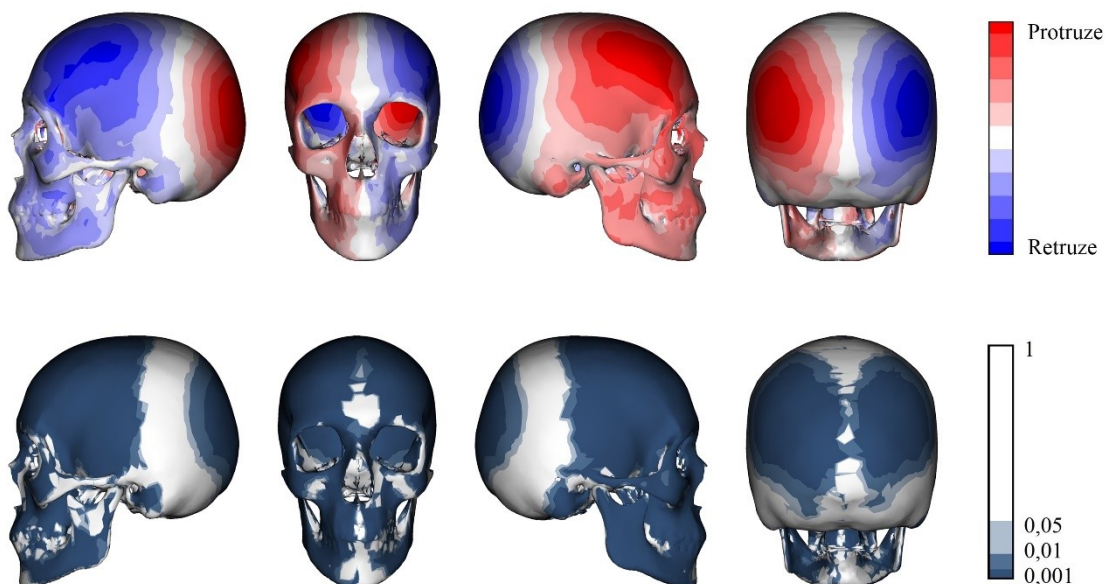


Obrázek 12: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u mužů ve věku do 39 let

6.2.2 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u mužů ve věku 40–59 let

U mužů ve věkovém intervalu od 40 do 59 let byla vyhodnocena protruze na pravé straně na téměř celé ploše obličejové části lebky. Protruze vpravo byla zjištěna na čelní kosti, směrem inferiorně pokračující přes ocnice, mediálně na nosní a laterálně na lícní kost. Poté dále do oblasti *apertura piriformis*, odkud dále pokračovala inferiorně na horní a dolní čelist. Na mozkovně byla zjištěna protruze na pravé i na levé straně. Na pravé straně protruzi vykazala anteriorní část temenní a spánkové kosti a *processus mastoideus*. Protruze na levé straně byla zjištěna na posteriorní části temenní kosti a superiorní kosti části týlní kosti.

Na mapách signifikance byla nejtmavší modrá barva, odpovídající p-hodnotě 0,001, nalezena na čelní kosti, postupující inferiorně přes hřbet nosu a ocnice, kolem *apertura piriformis* na horní a dolní čelist. Mezi významné oblasti bylo možné zařadit i střední část lícní kosti. Jako statisticky nevýznamná byla vyhodnocena oblast mezi nadočnicovými oblouky, mediální část lícní kosti a oblast midsagitální roviny. Z mozkovny byla mezi nejvýznamnější oblasti zařazena anteriorní část temenní a spánkové kosti včetně *processus mastoideus*. Dále pak část posteriorní oblasti kosti temenní a superiorní oblast kosti týlní. Zbýlé oblasti nebyly statisticky významné.

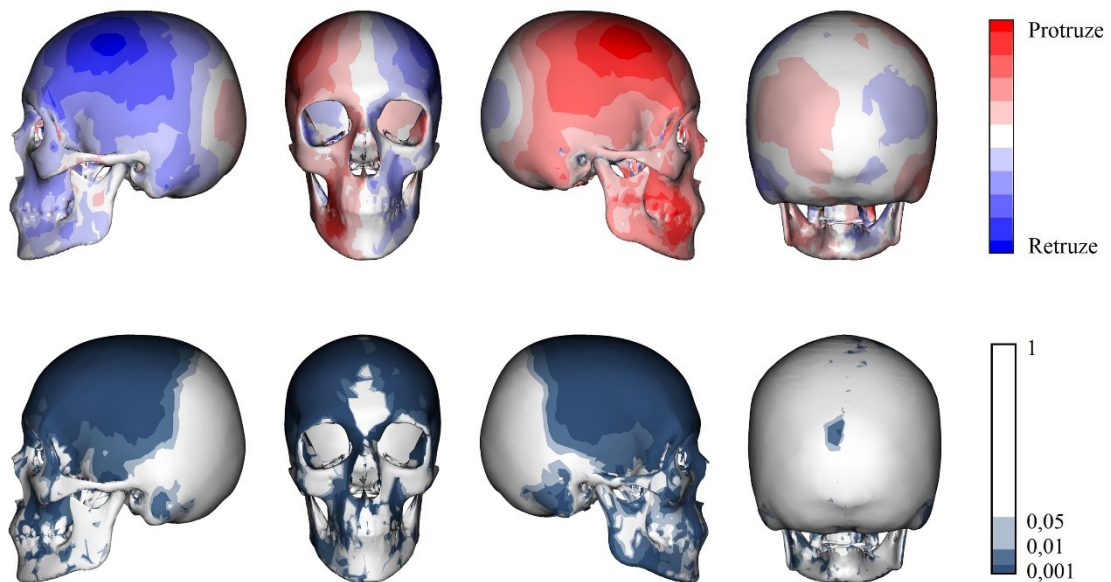


Obrázek 13: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u mužů ve věku od 40 do 59 let

6.2.3 Hodnocení asymetrie tvrdých tkání u mužů ve věku 60 a více let

Ve věkovém intervalu 60 a více let byla u mužů zjištěna protruze na pravé straně na celé ploše obličejové části lebky. Od čelní kosti postupovala protruze vpravo inferiorně kolem očnice mediálně na kost nosní a laterálně na kost lící. Dále byla protruze vyhodnocena postupně vedoucí kolem *apertura piriformis* na horní a dolní čelist. Na mozkovně pokračovala protruze na pravé straně od čelní kosti směrem posteriorně na kost temenní a inferiorně na kost spánkovou a *processus mastoideus*. Protruze na levé straně byla zjištěna nad a v oblasti *protuberantia occipitalis externa*.

Mezi statisticky významné oblasti s nejtmavším odstínem modré barvy na mapách signifikance byla zařazena hlavně čelní kost, kde významnost přecházela částečně do temenní kosti. Z obličejové části sem bylo možné zařadit ještě kořen nosu a oblast *fossa canina* na horní čelisti. Ve středních a světlých odstínech modré barvy byla vyhodnocena laterální oblast lící kosti, inferiorně horní čelist, místy i tělo dolní čelisti. Z mozkovny pak *processus mastoideus* a malá část oblasti nad *protuberantia occipitalis externa*.

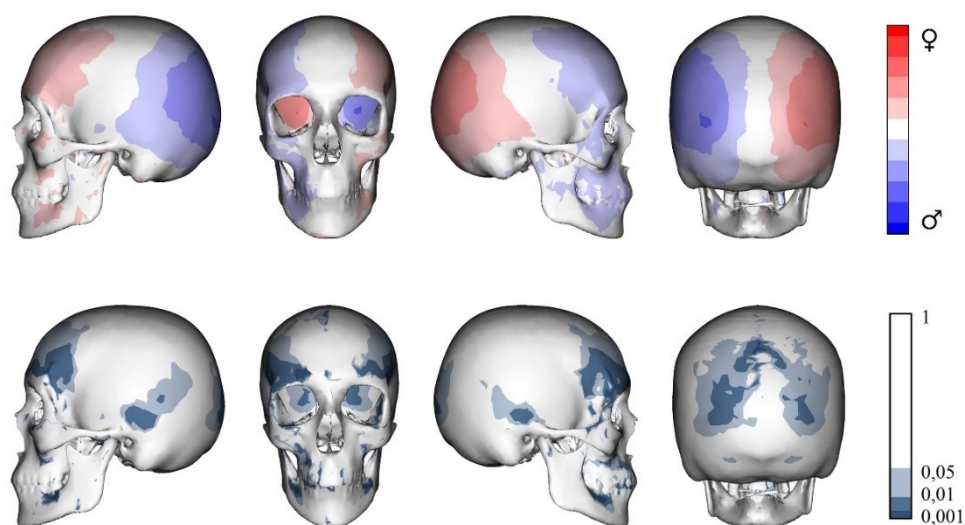


Obrázek 14: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii tvrdých tkání u mužů ve věku 60 a více let

6.3 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie tvrdých tkání

Při hodnocení pohlavního dimorfismu souboru jako celku, bez věkového rozdělení bylo zjištěno, že v obličejové části byly ženy protruzivní na levé straně a muži na pravé. Protruze se vyskytla laterálně na čelní kosti, kde přecházela na nadočnicové oblouky. Laterálně byla také nalezena na lící kosti odkud inferiorně pokračovala na laterální část *processus alveolaris* horní i dolní čelisti. Protruze byla vyhodnocena také na laterální části těla a částečně i ramene dolní čelisti. U mozkové části lebky byla zjištěna protruze opačná, ženy zde byly vyhodnoceny jako protruzivní vpravo a muži vlevo. Protruze zde byla nalezena na laterální části kosti temenní, inferiorně pokračující na superiorní část kosti spánkové, a posteriorně pokračující na laterální oblast kosti týlní. Pás táhnoucí se v okolí mediální roviny po celé ploše lebky byl vyhodnocen jako bez pohlavního dimorfismu, stejně jako anteriorní část kosti temenní.

Jak ukázaly mapy signifikance, statisticky velmi významné oblasti s p-hodnotou menší než 0,001 u pohlavního dimorfismu nebyly nalezeny. Mezi oblasti s menší mírou signifikance, v odstínech světle a středně modré barvy, byly zahrnuty laterální oblasti čelní kosti a nadočnicových oblouků, inferiorně velmi řídky na kosti lící pokračující na *processus alveolaris* horní a dolní čelisti. U mozkové části byla jako významná oblast s p-hodnotou 0,05–0,001 vyhodnocena část spánkové kosti superiorně od *porus acusticus externus* postupující v pásu posteriosuperiorně. V této hladině signifikance byla vyhodnocena i posteriorní část temenní kosti v místě přechodu na kost týlní. Ostatní oblasti byly statisticky nevýznamné.

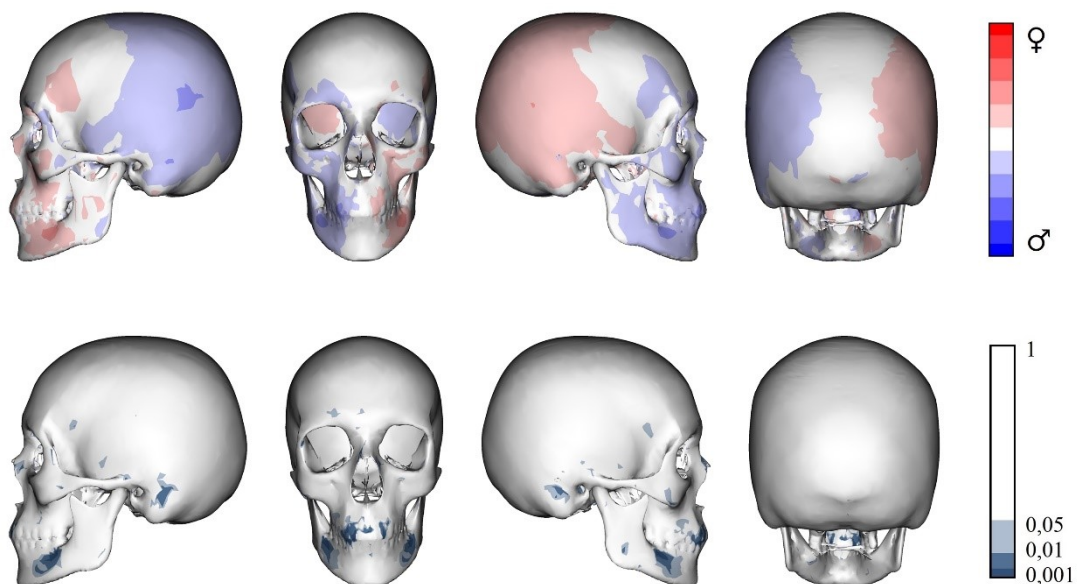


Obrázek 15: Rozdíl asymetrie tvrdých tkání mezi muži a ženami na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

6.3.1 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie tvrdých tkání ve věku do 39 let

Mezi muži a ženami v nejmladším věkovém intervalu nebylo v obličejové části zjištěno příliš rozdílů. Obličejová část byla rozdělena na poloviny. Na pravé straně byla nalezena protruze pouze u mužů a zrcadlově na levé u žen. Protruze byla zjištěna na laterální části čelní kosti, v menší míře i u nadočnicových oblouků, při postupu inferiorně u superiorní části okraje *apertura piriformis* a částečně na kosti lící. Protruzi vykázal i *processus alveolaris* horní čelisti a tělo i část ramene dolní čelisti. Na mozkovně byla zjištěna protruze v obráceném uspořádání, u žen vpravo a u mužů vlevo. Výjimku tvořila *protuberantia occipitalis externa*, která sledovala trend obličejové části. Protruze u žen vpravo byla nalezena na kosti temenní, spánkové a po okrajích kosti týlní, u mužů naopak. U zbylých oblastí nebyl zjištěn rozdíl mezi pohlavími.

Statisticky významných oblastí se v této podkapitole příliš nezjistilo. Figurují zde spíše střední a světlejší odstíny modré barvy s p-hodnotou 0,001 až 0,05. Tato významnost byla zjištěna v oblasti frontálních zubů horní čelisti, na těle dolní čelisti v místě *prominentia lateralis* a posteriorně od zevního kostěného zvukovodu. Ostatní oblasti, i když byly na barevných mapách znázorněny, nebyly statisticky významné.

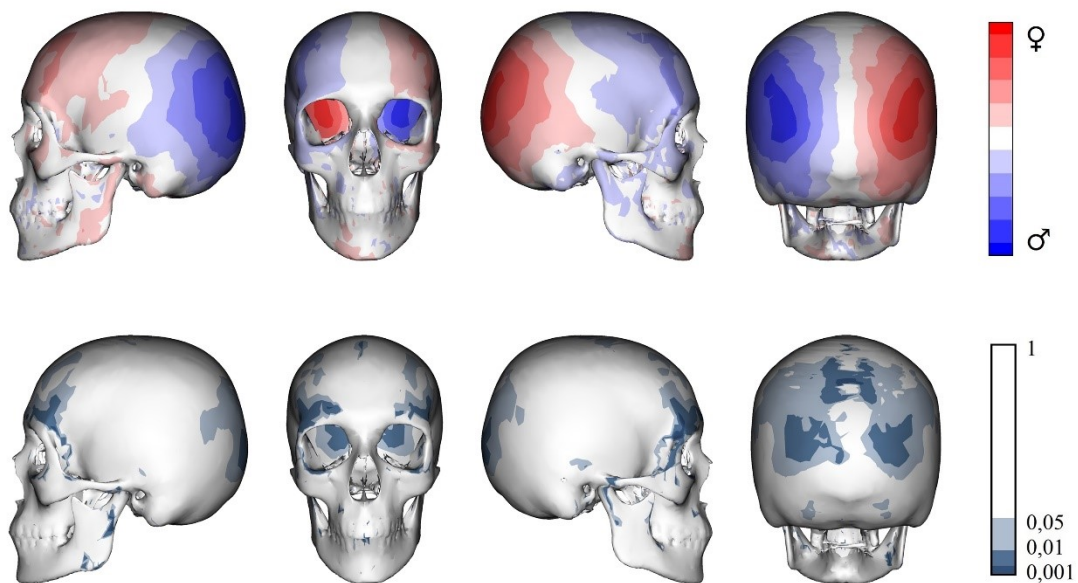


Obrázek 16: Rozdíl asymetrie tvrdých tkání mezi muži a ženami ve věku do 39 let na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

6.3.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie tvrdých tkání ve věku 40–59 let

Ve věkovém intervalu 40–59 let nebylo v obličejové části nalezeno příliš významných rozdílů mezi pohlavími. Protruze žen vlevo byla zjištěna na čelní kosti, směrem od *tubera frontalia* laterálně, postupující inferiorně po vnějším okraji očníce na kosti lící. Ve stejných místech byla protruze u mužů vpravo. Horní čelist byla hodnocena bez významných rozdílů. U dolní čelisti byl nalezen rozdíl pouze v oblasti brady, kde byla zjištěna protruze žen vpravo, mužů vlevo, a na rameni dolní čelisti, kde byla zjištěna naopak protruze žen vlevo a mužů vpravo. Na většině plochy mozkovny, na kosti temenní, posteriorně na kosti týlní a laterálně na kosti spánkové, byla zjištěna protruze žen vpravo a mužů vlevo. Výjimku tvořila malá anteriorní část kosti temenní a *processus mastoideus*, které byly vyhodnoceny obráceně. Ostatní oblasti nevykázaly rozdíl mezi pohlavími.

Na mapách signifikance nebyly zjištěny hodnoty významnosti pod 0,001. Objevují se zde pouze středně a světle modré odstíny, p-hodnoty 0,001–0,05. Jako významná byla vyhodnocena část kosti čelní v oblasti nadočnicových oblouků, inferiorně spodní okraj očníce a na dolní čelisti posteriorní část ramene. Další významné oblasti se vyskytly na posteriorní části kosti temenní a superiorní části kosti týlní. Ostatní oblasti nevykázaly statistickou významnost.

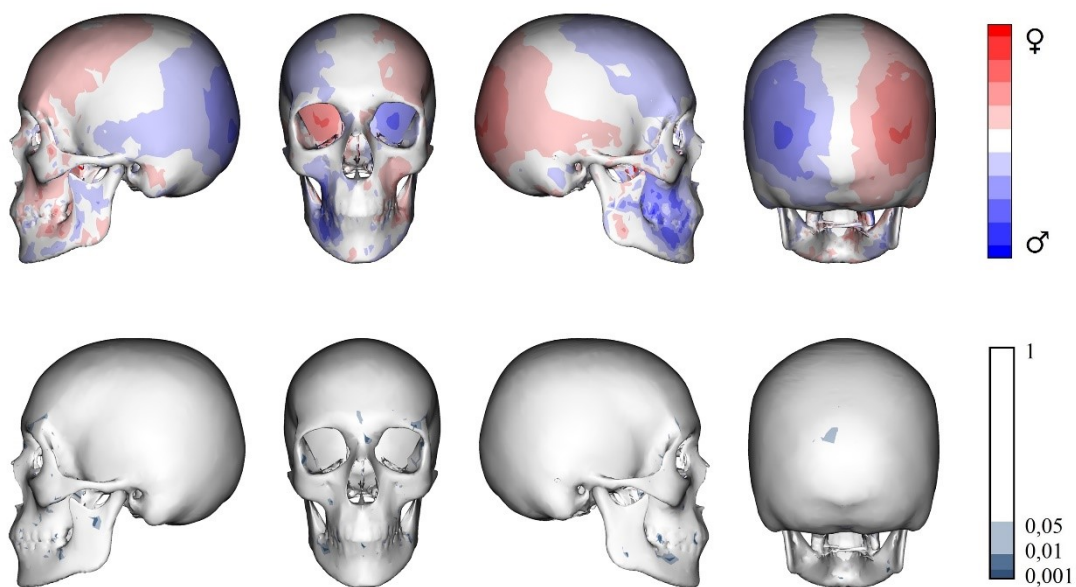


Obrázek 17: Rozdíl asymetrie tvrdých tkání mezi muži a ženami ve věku od 40 do 59 let na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

6.3.3 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie tvrdých tkání ve věku 60 a více let

Při hodnocení rozdílu mezi pohlavími ve věkovém intervalu 60 a více let byla v obličejové části zjištěna protruze žen vlevo a mužů vpravo. Rozdíly mezi pohlavími se projevily na kosti čelní laterálně od *tubera frontalia* a inferiorně k očním. Protruze byla nalezena i na vnitřním okraji očnice a inferiorně na superiorní a laterální části horní čelisti. Rozdíl na dolní čelisti nebyl vyhodnocen zcela jednoznačně. Na mozkovně byla zjištěna protruze naopak u žen vpravo a u mužů vlevo. A to na posteriorní části temenní kosti, posteriorně na téměř celé výšce kosti týlní a laterálně na kosti spánkové. Výjimku tvořil *processus mastoideus*, který byl hodnocen jako obličejová část, tedy ženy byly v protruzi vlevo. Ve všech dalších oblastech nebyl nalezen významný rozdíl.

Z map signifikance bylo patrné, že nebyl v daném věkovém intervalu zjištěn statisticky významný rozdíl mezi pohlavími.

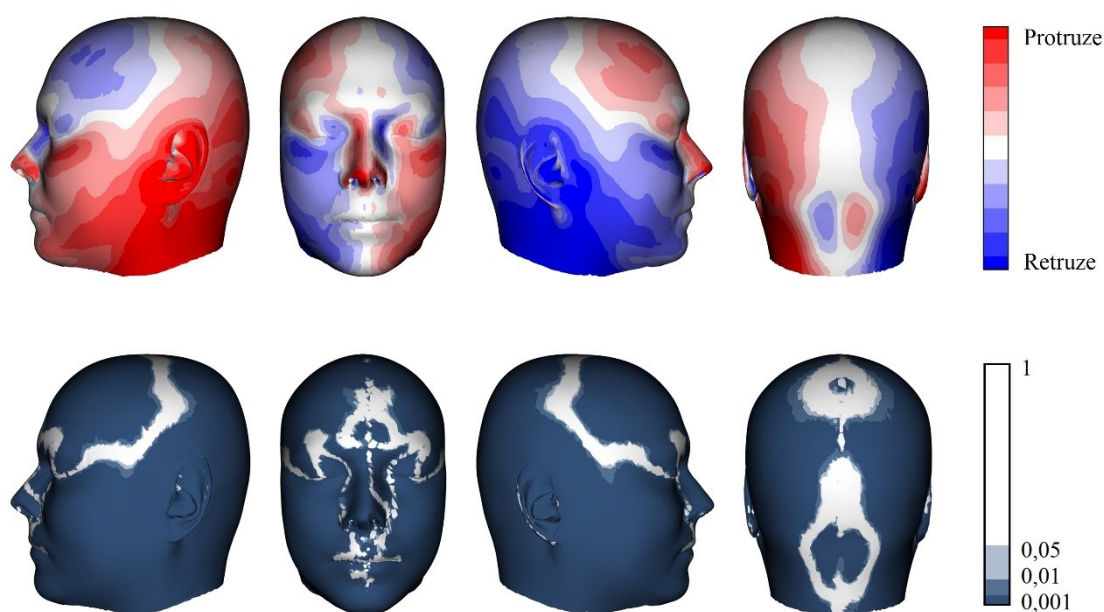


Obrázek 18: Rozdíl asymetrie tvrdých tkání mezi muži a ženami ve věku 60 a více let na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

6.4 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u žen

Stejně jako u tvrdých tkání, i u měkkých tkání byly nejprve hodnoceny všechny ženy ze souboru. Na většině povrchu byla zjištěna levá strana jako protruzivní. Protruze na pravé straně byla vyhodnocena v oblasti čela, odkud pokračovala inferiorním směrem mediálně na nos a laterálně do vnějšího koutku oka. Posteriozně poté přecházela na anteriorní část temene. Ve vnitřním koutku oka navazovala již protruze levé strany, která inferiorně pokračovala na lícní oblast, odkud se plynule roztahovala na oblast celé tváře. Mediálně pak přecházela přes oblast úst a na bradu. Posteriozně protruze vlevo navazovala přes oblast ucha na týlní oblast a superiorně na posteriovní část temene. Oblast zátylku vykázala naopak protruzi na pravé straně.

Jak ukázaly mapy signifikance, všechny vyjmenované oblasti byly vyhodnoceny jako statisticky velmi významné. Téměř celý povrch měkkých tkání byl zbarven do odstínu tmavě modré barvy, jedná se tedy o oblasti s p-hodnotou menší než 0,001.

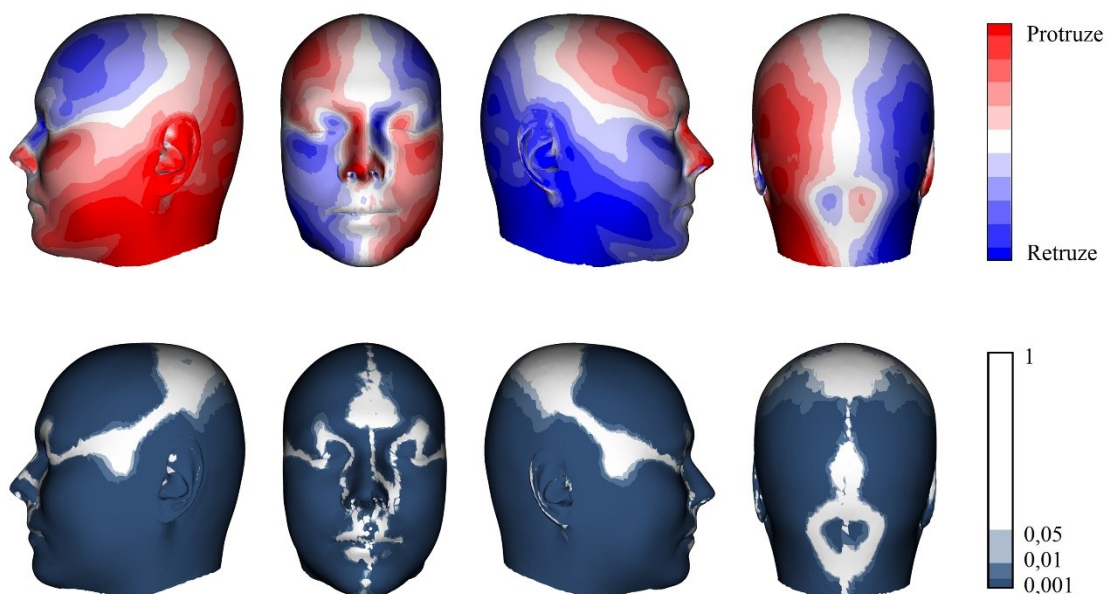


Obrázek 19: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u žen

6.4.1 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u žen ve věku do 39 let

Na většině celého povrchu měkkých tkání u žen ve věkovém intervalu do 39 let byla zjištěna protruze na levé straně. Retruze se na levé straně vyskytla hlavně v oblasti čela. Odtud se posteriorně roztahovala na přední část temene, inferiorně přecházela k vnějšímu koutku oka a mediálně lemovala bok nosu. Protruze vlevo navazovala ve vnitřním koutku oka a pokračovala inferiorně na celou oblast líce, tváře a brady až po hranici dolní čelisti. Z oblasti tváře plynule laterálně pokračovala k oblasti spánku a ucha, přes které přecházela posteriorně na oblast týlu a superiorně až po zadní část temene. Výjimkou byla oblast zátylku, kde byla zjištěna retruze vpravo.

Barevným mapám odpovídaly i mapy significance, kde byla statistická významnost s p-hodnotou menší než 0,001 nalezena na většině výše jmenovaných oblastí.

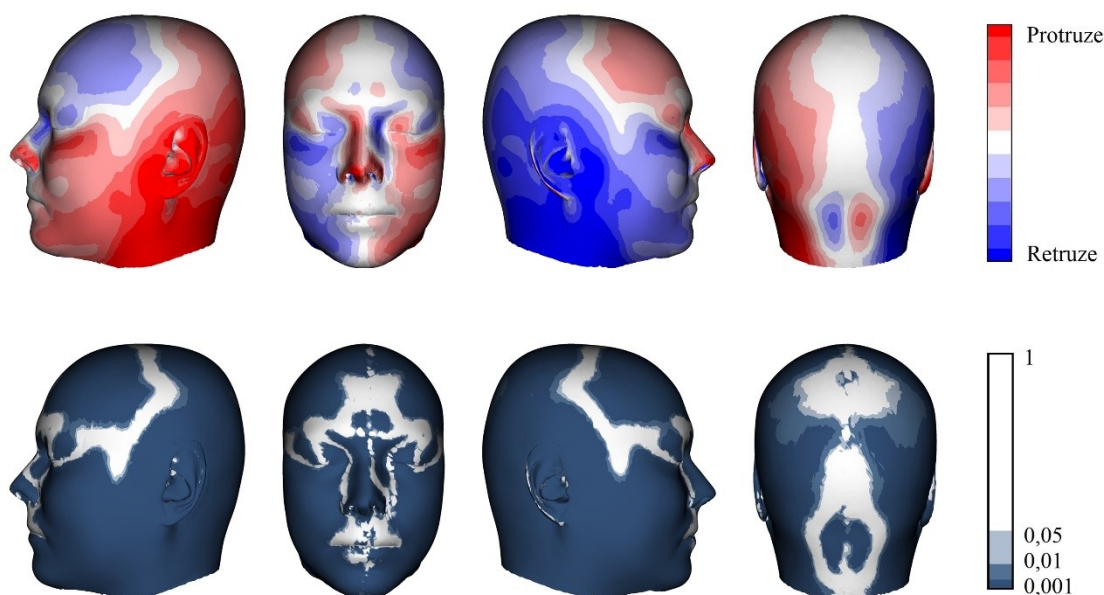


Obrázek 20: Barevná mapa (nahore) a mapa significance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u žen ve věku do 39 let

6.4.2 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u žen ve věku 40–59 let

V dalším věkovém intervalu od 40 do 59 let byl objeven velmi podobný motiv asymetrie, jako u předchozích žen ve věku do 39 let. Na většině celého povrchu měkkých tkání byla pravá strana hodnocena jako retruzivní, protruze se vyskytla na čelní kosti s přechodem do vnějšího koutku oka, více laterálně než u předchozí podkapitoly. Na nose byla také zjištěna protruze vpravo, již plynule nenavazovala na čelní oblast, ale byla od ní oddělena malou oblastí, přibližně v místě spojnice nadočnicových oblouků, kde byla nalezena protruze levé strany, a místem bez významných rozdílů mezi stranami. Od vnitřního koutku oka už pokračovala protruze levé strany. Vedla inferiorně přes lící oblast, laterálně od horního rtu, až na bradu a spodní hranu dolní čelisti. Dále postupovala přes oblast tváře a ucha posteriorně na oblast týlu a superiorně na temeno hlavy. U zátýlní oblasti, stejně jako u předchozí skupiny ženy, se projevila protruze na pravé straně. Vyskytla se zde ale ve větší míře, protažená více superioinferiorním směrem, než u žen ve věku do 39 let.

Všechny jmenované oblasti byly vyhodnoceny jako velmi statisticky významné, většina z nich s p-hodnotou menší než 0,001. Pouze u temeno-týlní oblasti se vyskytly střední odstíny modré, které značí míru signifikance od 0,001 do 0,01.

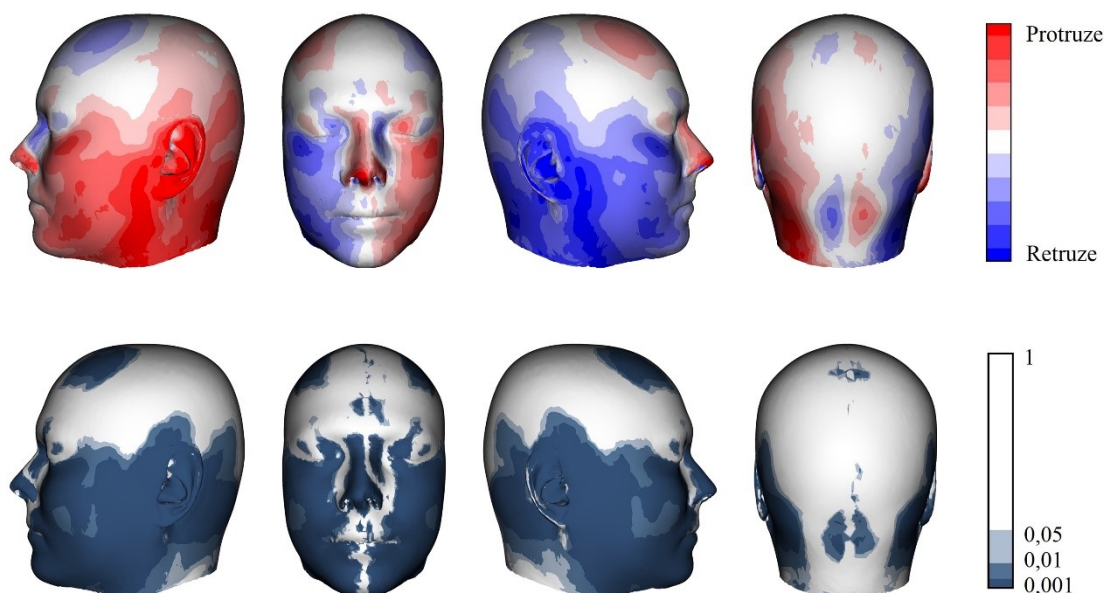


Obrázek 21: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u žen ve věku od 40 do 59 let

6.4.3 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u žen ve věku 60 a více let

U žen ve věku 60 a více let byl odhalen klesající trend, co se týče množství oblastí výskytu asymetrie měkkých tkání. Základní rozložení asymetrie bylo stejné jako u předchozích věkových skupin, většina povrchu vykázala protruzi levé strany. Oblast čela byla vyhodnocena jako protruzivní na pravé straně, jednalo se ale o menší plochu než u mladších žen a byla směřována více posteriorně. V protruzi vpravo přetrvával i vnější koutek oka a nos, žádná z těchto oblastí ale nebyla vzájemně propojená. Stejně jako u žen ve věku 40–59 let byla zjištěna protruze pravé strany v místě spojnice nadočnicových oblouků. Od vnitřního koutku oka, s částečným přesahem na oblast obočí, již navazovala protruze na levé straně. Ta pokračovala inferiorně přes líce na oblast úst až k bradě, až ke spodní hranici dolní čelisti, poté navazovala laterálně na oblast tváře a ucha, a směrem posteriorním přecházela v oblast týlní. Oblast zátýlní, jako u předchozích skupin žen, vykázala protruzi na pravé straně. Superiorně umístěná temenní oblast byla na barevných mapách znázorněna, ale nebyla zde zjištěna statistická významnost.

Hodnocením mapami signifikance bylo zjištěno, že statisticky velmi významné oblasti byly nalezeny na posteriorní části čela, poté hlavně v oblasti líce, horní a dolní čelisti, a také kolem ucha. Střední odstíny modré barvy se vyskytly na tváři a na týlní oblasti.

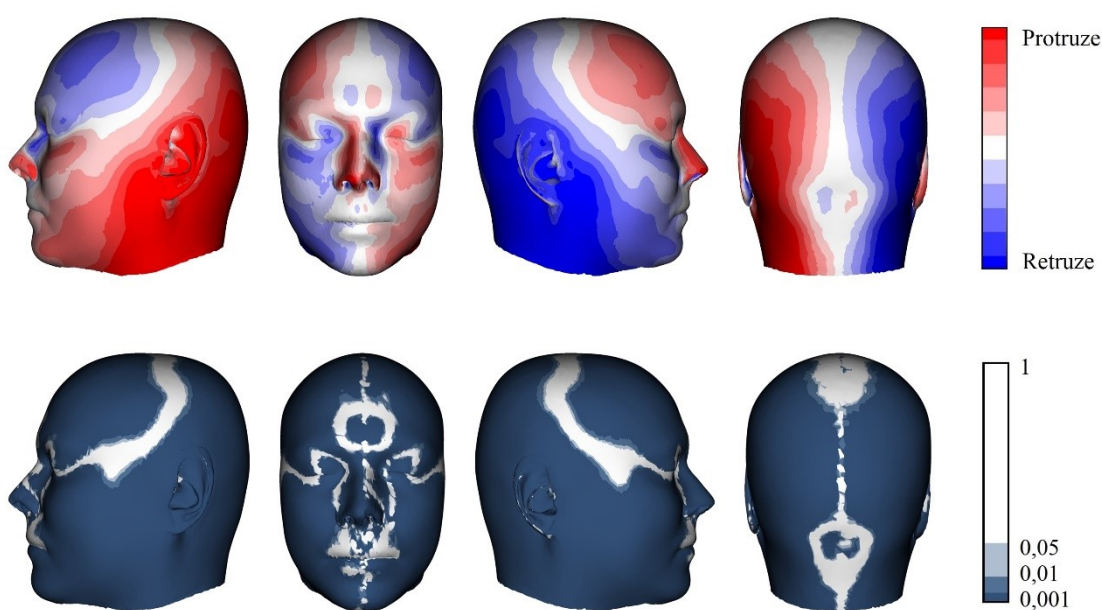


Obrázek 22: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u žen ve věku 60 a více let

6.5 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u mužů

Asymetrie na povrchu měkkých tkání u mužů drží podobný trend jako u žen, většina pravé strany byla zjištěna jako retruzivní. V protruzi byla pravá strana zjištěna v oblasti čela, inferiorně sestupující mediálně na nos a laterálně do vnějšího koutku oka. V mediální oblasti čela, mezi nadočnicovými oblouky byla nalezena naopak protruze vlevo. Protruze levé strany začínala ve vnitřním koutku oka a postupovala inferiorně podél nosu k oblasti úst a na bradu. Odtud se táhla laterálním směrem přes lícní oblast tváře až k uchu. Posteriorně od ucha pokračovala na oblast týlu a superiorně na posteriorní část temene. Posteriorně od ucha pokračovala na oblast týlu a superiorně na posteriorní část temene.

Na mapách signifikance byly jmenované oblasti vyhodnoceny nejtmavším odstínem modré barvy, která odpovídala statisticky velmi významné p-hodnotě menší než 0,001. Oblasti s vyšší p-hodnotou, v rozmezí 0,05–0,001, nebyly u hodnocení všech mužů ze souboru nalezeny.

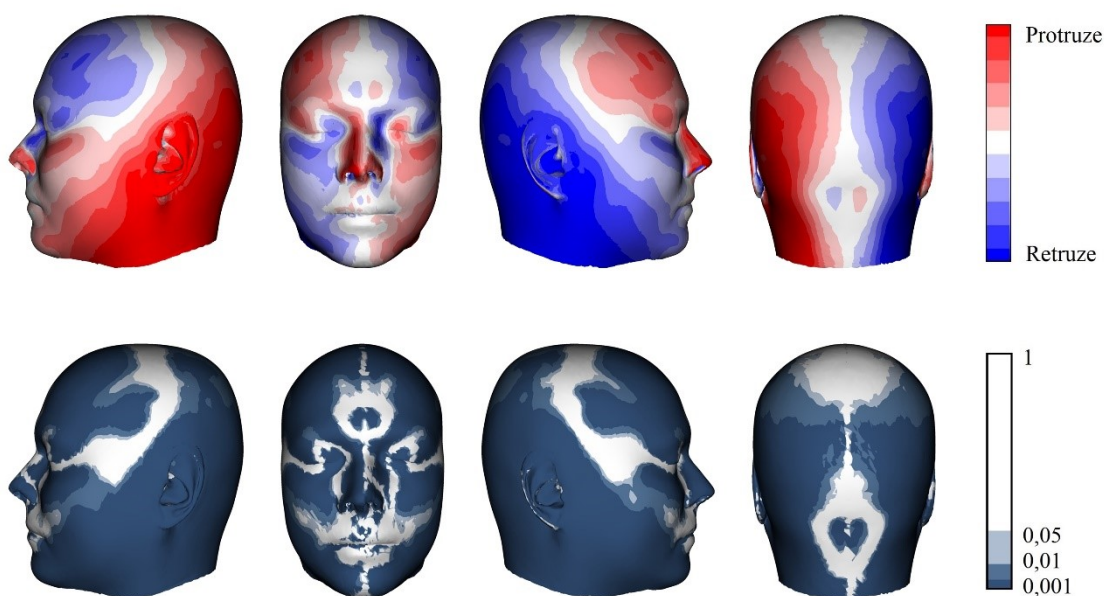


Obrázek 23: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u mužů

6.5.1 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u mužů ve věku do 39 let

U mužů ve věku od 39 let byla nalezena protruze vpravo v oblasti čela, plynule přecházející do vnějšího koutku oka a mediálně na nos, výjimkou byla malá oblast v místě spojnice nadočnicových oblouků, kde se prokázala protruze na levé straně. Protruze levé strany poté navazovala ve vnitřním koutku oka a spojitě se objevila na většině zbytku povrchu. Od koutku oka přecházela na lící oblast, postupovala inferiorně, laterálně od úst, až k bradě. Poté pokračovala laterálně přes tvář k oblasti ucha a posteriorně navazovala na týlní a superiorně na temenní oblast. U zátylku byla jako u žen zjištěna opačná protruze, pravé strany.

Všechny jmenované oblasti byly v mapách signifikance označeny jako významné. S p-hodnotou menší než 0,001 se vyskytla většina z nich. Pouze oblast temenní a pruh vedoucí od koutku úst ke spánku vykázaly nižší hodnoty signifikance, p-hodnota odpovídající rozmezí 0,001–0,05.

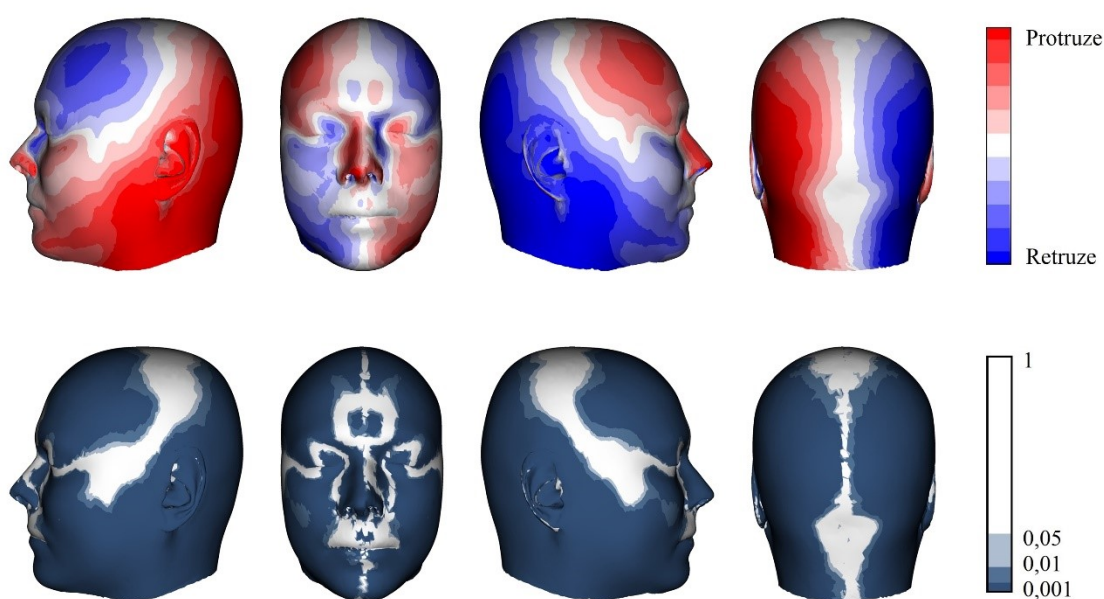


Obrázek 24: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u mužů ve věku do 39 let

6.5.2 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u mužů ve věku 40–59 let

U mužů ve věkovém intervalu od 40 do 59 let přetrvával stejný základní motiv asymetrie. Na oblasti čela byla zjištěna protruze pravé strany jako u mužů ve věku do 39 let, ale zasahovala zde více laterálně ke spánkové oblasti a posteriorně k temeni hlavy. Inferiorně plynule přecházela do vnějšího koutku oka a mediálně na nos. Mediálně v místě spojnice nadočnicových oblouků byla opět zjištěna protruze vlevo. Na levé straně protruze poté pokračovala od vnitřního koutku oka inferiorně přes lící oblast, laterálně od horního rtu, přes dolní ret až na bradu. Protruze na levé straně laterálně přecházela na tvář a přes oblast ucha na posteriorní část hlavy. Týlní i temenní oblast vykázala také protruzi vlevo. V zátýlní oblasti nebyl v této skupině jedinců zjištěn žádný rozdíl mezi stranami.

Jako statisticky velmi významné oblasti byly vyhodnoceny všechny zmíněné oblasti. Byla zjištěna p-hodnota menší než 0,001, jak ukázaly mapy signifikance s nejtmaším odstínem modré barvy.

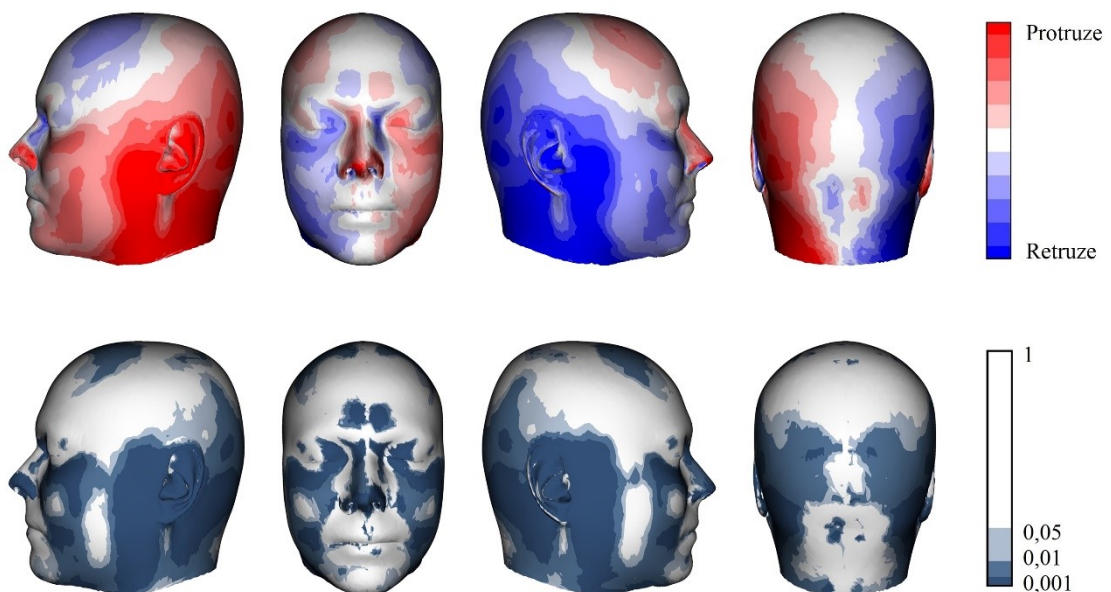


Obrázek 25: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u mužů ve věku od 40 do 59 let

6.5.3 Hodnocení asymetrie měkkých tkání u mužů ve věku 60 a více let

Ve věkové skupině mužů 60 a více let byl vyhodnocen úbytek asymetrie ve srovnání s mladšími muži. Protruze pravé i levé strany se vyskytla na téměř stejných místech, ale v menší míře. Protruze na pravé straně byla zjištěna v oblasti čela na laterální části přesahující k temeni hlavy a anteriorně přecházející ve vnější koutek oka. Nad kořenem nosu byla nalezena protruze vlevo, stejně jako u předešlých skupin mužů, ale ve větším rozsahu. Na nose byla zjištěna protruze vpravo, stejně jako u všech skupin mužů i žen. Protruzivní levá strana navazovala ve vnitřním koutku oka a pokračovala inferiorně přes líce, laterálně kolem úst až na bradu. Poté laterálně pokračovala na oblast tváře, spánku a ucha, až na posteriorní týlní oblast, kde směrem superiorním částečně zasahovala na temeno.

Statisticky významných oblastí bylo zjištěno podstatně méně než u předešlých dvou skupin mladších mužů. Jako velmi významná oblast s p-hodnotou menší než 0,001 byla hodnocena mediální část čela nad kořenem nosu, většina nosu, vnitřní koutek oka plynule přecházející v lící oblast, dále oblast tváře laterálně od úst a oblast před a za uchem. Některé další oblasti vykázaly menší statistickou významnost, jejich modrá barva byla středního nebo světlého odstínu. Mezi tyto oblasti patřila mediální část tváře, anteriorní část temenní oblasti a týlní oblast. Zbylé oblasti byly hodnoceny jako statisticky nevýznamné.

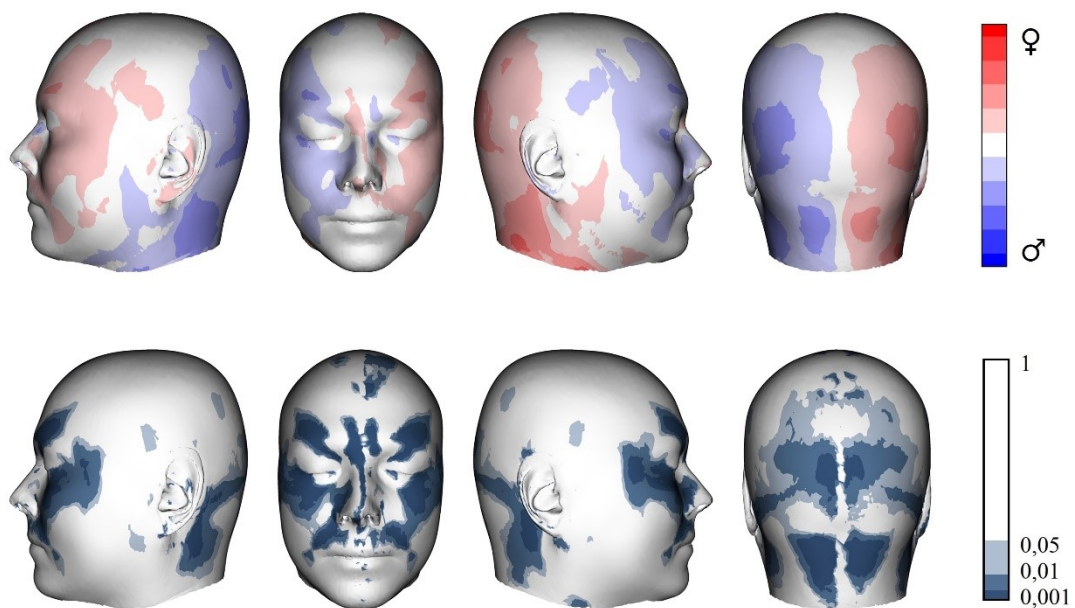


Obrázek 26: Barevná mapa (nahore) a mapa signifikance (dole) zobrazující asymetrii měkkých tkání u mužů ve věku 60 a více let

6.6 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie měkkých tkání

Při hodnocení pohlavního dimorfismu měkkých tkání byl soubor jedinců nejdříve hodnocen jako celek, bez věkového rozdělení. V obličejové části byly ženy vyhodnoceny protruzivní vlevo a muži vpravo. Protruze byla vyhodnocena na laterální části čela, laterálně pokračující na oblast spánku a inferiorně na lící oblast. Mediálně se protruze vyskytla v oblasti horního rtu, odkud laterálně přechází na tvář. Nos a oblast mezi nadočnicovými oblouky tvořili výjimku, nálezu byl opačný než na zbytku obličeje a protruzi vpravo zde vykázaly ženy. Protruze žen vpravo se dále vyskytla na posteriorní části tváře, u oblasti ucha. Odtud pokračovala dále posteriorně na oblast zátylku, týlu a superiorně na posteriorní část temene. V těchto oblastech byli muži vyhodnoceni jako protruzivní na levé straně.

Statisticky velmi významných rozdílů bylo zjištěno méně než při hodnocení každého pohlaví zvlášť. Přesto zde byly určité oblasti vyhodnoceny v nejtmašších odstínech modré barvy, tzn. s p-hodnotou menší než 0,001. Takové oblasti byly nalezeny na inferiorní části čela, nad nadočnicovými oblouky, mezi nimi a inferiorním směrem také na nose. Laterálním směrem na oblasti lící protahující se k oblasti horního rtu pokračovala tmavě modrá přecházející do středního a světlého odstínu. Tyto oblasti vykázaly p-hodnotu 0,001–0,05. V oblasti týlu byla vyhodnocena statistická významnost také v p-hodnotách 0,001–0,05 a inferiorně u zátylku byla zjištěna p-hodnota menší než 0,001.

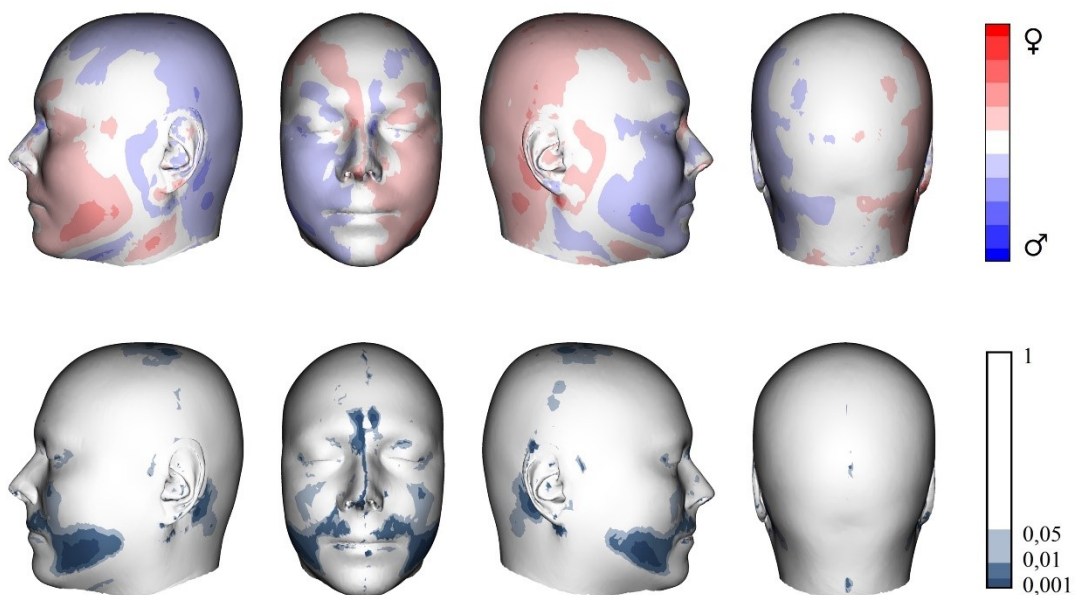


Obrázek 27: Rozdíl asymetrie měkkých tkání mezi muži a ženami na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

6.6.1 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie měkkých tkání ve věku do 39 let

Ve věkovém intervalu do 39 let při srovnání asymetrie měkkých tkání mužů a žen bylo zjištěno, že v obličejové části měly ženy více protruzi vlevo, muži vpravo. U temenní a týlní oblasti tomu bylo naopak. Protruzivní levá strana žen začínala v oblasti obočí a postupovala inferiorně přes oblast oka na oblast lící, ze které plynule přecházela inferiorně do oblasti úst a laterálně na tvář. U oblasti ucha ženy vykazaly retruzi a začínala zde protruze mužů, která pokračovala posteriorně na laterální část týlní oblasti. Superiorně pokračovala na laterální část temene, odkud byla tenkým pruhem plynule spojena s nosem, kde byli muži také v protruzi na levé straně.

Jak ukázaly mapy signifikance, na většině povrchu měkkých tkání nebyl nalezen statisticky významný rozdíl mezi muži a ženami. Značná významnost, místa s p-hodnotou menší než 0,01, byla zjištěna u kořenu nosu táhnoucí se úzkým pruhem po celé délce nosu, poté na laterální části horního rtu plynule přecházející směrem laterálně na inferiorní část tváře. Poslední oblastí s takovou statistickou významností byla oblast za uchem. Odstíny světle modré barvy se v malé míře vyskytly na lící a temenní oblasti. Ostatní oblasti nebyly vyhodnoceny jako statisticky významné.

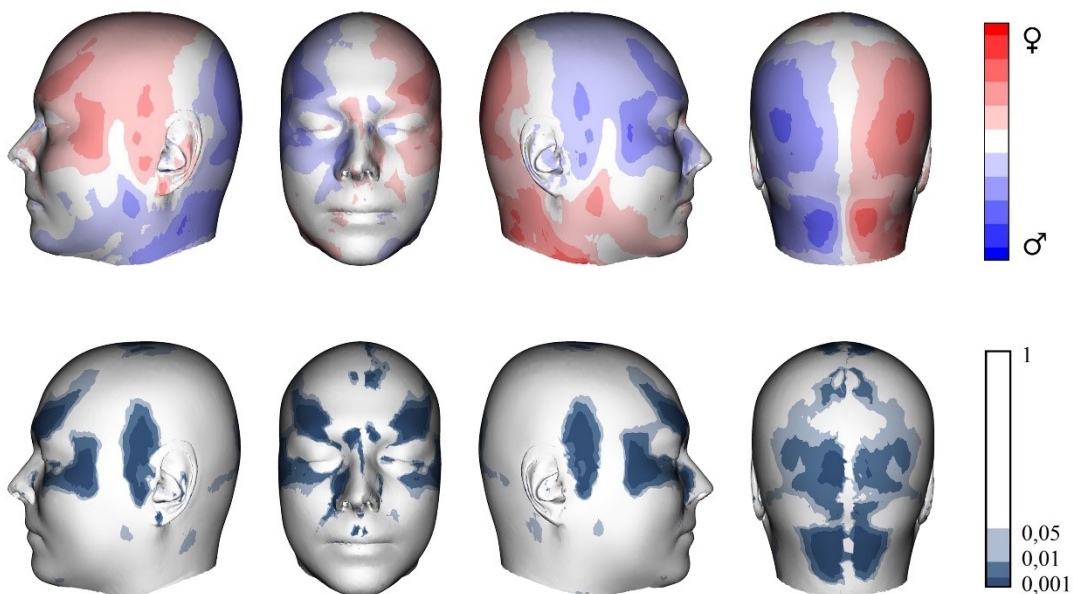


Obrázek 28: Rozdíl asymetrie měkkých tkání mezi muži a ženami ve věku do 39 let na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

6.6.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie měkkých tkání ve věku 40–59 let

Při porovnání rozdílů mezi muži a ženami ve věku od 40 do 59 let byla zjištěna v horní polovině obličejové části protruze mužů na pravé straně, žen na levé. Ve spodní polovině obličeje a posteriorní části hlavy byl nález opačný, na pravé straně vykázaly protruzi ženy, muži na levé. Na rozdíl od předchozí skupiny byla protruze žen a retruze mužů na levé straně nalezena v temenní oblasti, anteriorně pokračující na čelo a laterálně se protahující do spánkové oblasti až k uchu. Protruze žen a retruze mužů vlevo pokračovala mediálně kolem oblasti oka přes lící oblast až k nosu. Od brady laterálně přes inferiorní část tváře pod uchem přecházela protruze mužů a retruze žen vlevo na posteriorní týlní oblast.

Většina zmíněných oblastí nebyla na mapách signifikance vyhodnocena jako statisticky významná. I přes to se zde vyskytlo více signifikantních oblastí s p-hodnotou menší než 0,001 než u věkové skupiny do 39 let. Velmi významné oblasti byly zjištěny v místě nadočnicových oblouků, mediálně u kořenu nosu, laterálně ve spánkové oblasti a anteriorně od ucha. Posteriozně byly nalezeny na týlní a zátýlní oblasti. Odstíny středně a světle modré barvy se vyskytly na temenní oblasti, anteriorně na lící oblasti pokračující na bok nosu.

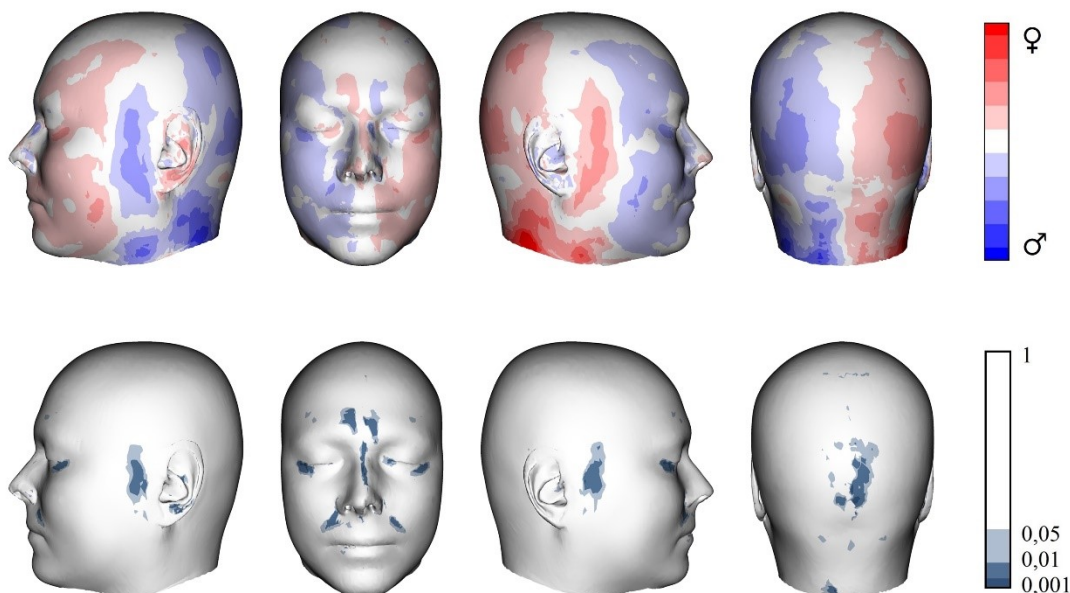


Obrázek 29: Rozdíl asymetrie měkkých tkání mezi muži a ženami ve věku od 40 do 59 let na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

6.6.3 Hodnocení pohlavního dimorfismu u asymetrie měkkých tkání ve věku 60 a více let

Při hodnocení rozdílů asymetrie mezi pohlavími ve věku 60 a více let byl v obličejové části nalezen podobný výskyt asymetrie jako u nejmladší skupiny do 39 let, naopak v posteriorní části byl výskyt podobný druhé skupině ve věku 40–59 let. Protruze mužů, retruze žen, na levé straně se vyskytla nad kořenem nosu v mediální oblasti čela a vnitřním koutku oka. Protruze žen, a zároveň retruze mužů, byla na levé straně zjištěna na laterální části čela přecházející přes spánkovou oblast kolem vnějšího koutku oka na oblast lícní. Směrem inferiorním dále přecházející na oblast úst a laterálně se rozšiřující na tvář. Anteriorně od ucha se již navázala protruze mužů a retruze žen vlevo, pokračující na posteriorní týlní oblast a částečně superiorně zasahující na temenní.

Jak ukázaly mapy signifikance, oblasti se statistickou významností menší než 0,001 se zde nevyskytly. Mezi oblastmi vyhodnoceny s p-hodnotou do 0,05 patřila oblast nad kořenem nosu inferiorně pokračující po hřbetu nosu, laterálně vnější koutek oka a anteriorní oblast ucha, inferiorním směrem také nosoretní rýha. I přes rozdíly na barevných mapách neukázal zbytek povrchu měkkých tkání signifikantní rozdíly mezi pohlavími.



Obrázek 30: Rozdíl asymetrie měkkých tkání mezi muži a ženami ve věku 60 a více let na barevných mapách (nahore) a mapách signifikance (dole)

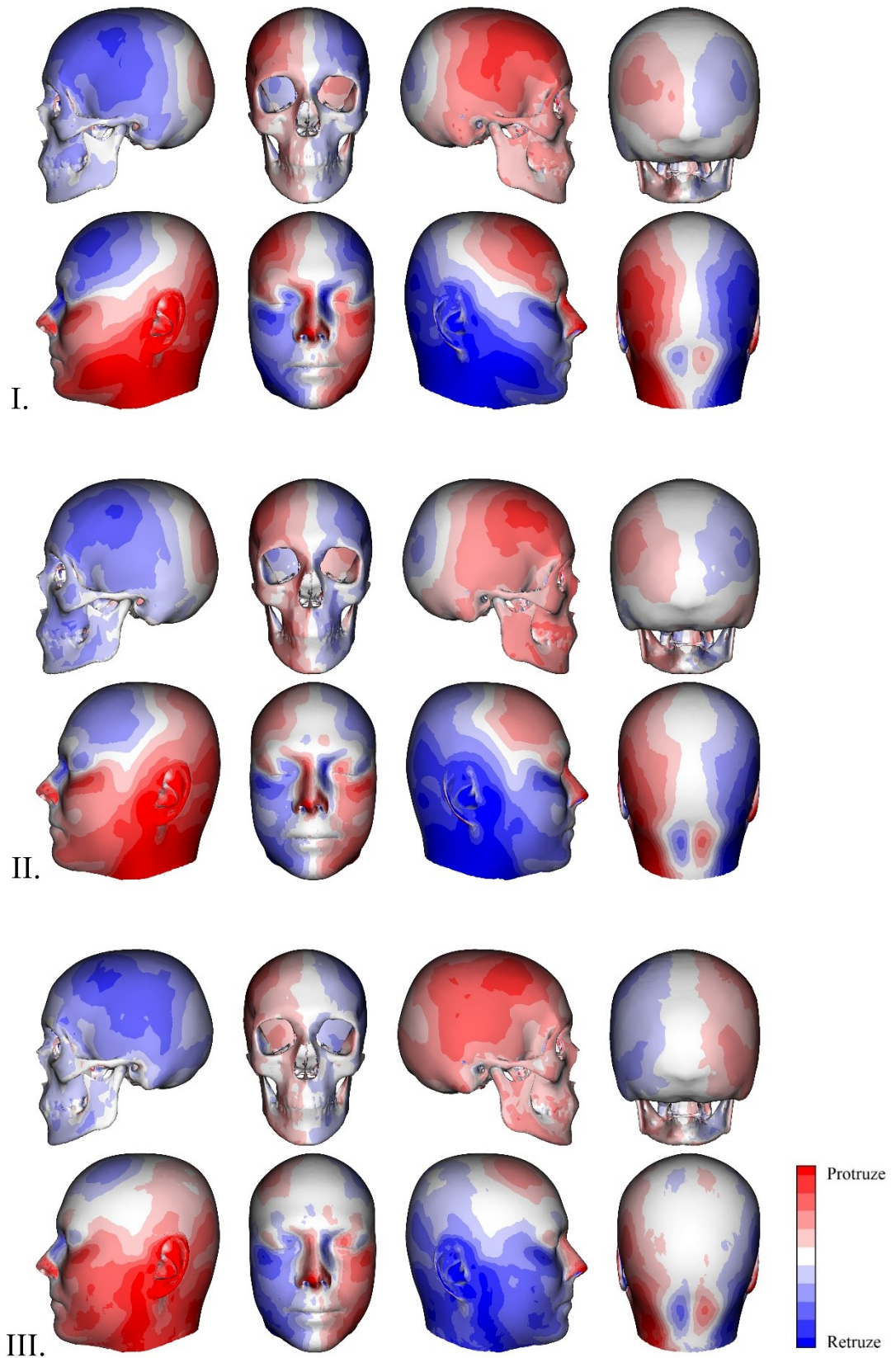
6.7 Srovnání asymetrie měkkých a tvrdých tkání

V následující kapitole byl hodnocen vztah asymetrie měkkých a tvrdých tkání. Využívaný software Morphome3cs II zatím nebyl vybaven algoritmem schopným objektivně zhodnotit rozdíl asymetrie mezi tkáněmi, proto jsou v této práci rozdíly hodnoceny pouze vizuálním srovnáním barevných map.

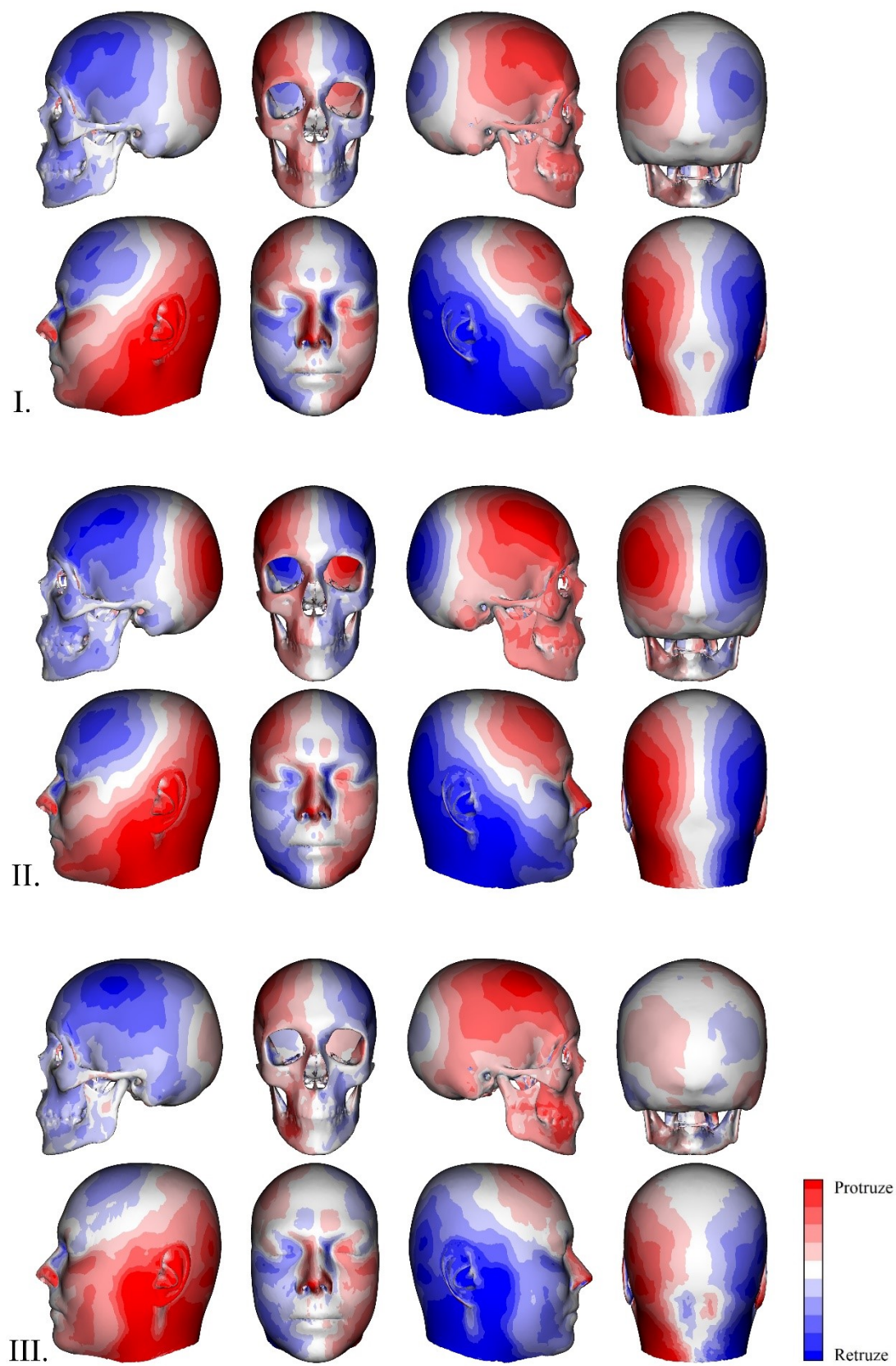
U obou pohlaví byl nalezen velmi podobný motiv asymetrie a vztah mezi tkáněmi, i když s rostoucím věkem rozdíly mezi stranami klesaly, jak ukázaly i mapy signifikance. Protruze, či retruze, u mužů i žen byla vyhodnocena na stejné straně ve všech věkových intervalech. Výjimku tvořila pouze posteriorní oblast tvrdých tkání žen ve věku 60 a více let.

Na tvrdých tkáních byla zjištěna protruze pravé strany u obou pohlaví při pohledu anteriorním po celé výšce obličeje, i laterálním, kde protruze navazovala na anteriorní část kosti temenní, inferiorně se poté táhla přes kost spánkovou až k *processus mastoideus*. Na měkkých tkáních byla protruze zjištěna v oblasti čela, přesahující na vnější část oka a mediálně přecházející na nos. Zde korespondovaly tvrdé a měkké tkáně, v obou případech byla pravá strana u obou pohlaví v protruzi. V oblasti vnitřního koutku oka a dále u inferiorně navazující oblasti líce a tváře, mediálně sahající k oblasti úst a laterálně k uchu, byla zjištěna v případě měkkých tkání na pravé straně retruze u obou pohlaví. U těchto oblastí byly vyhodnoceny měkké a tvrdé tkáně v rozporu a vykazaly opačné hodnoty asymetrie.

U posteriorních oblastí hlavy, týlní a posteriorní části temenní oblasti, byla zjištěna na pravé straně retruze u tvrdých i měkkých tkání obou pohlaví. Asymetrie měkkých tkání zde, stejně jako u oblasti čela a nosu, korespondovala s asymetrií lebky. Výjimka byla nalezena u žen ve věkovém intervalu 60 a více let, kde byla zjištěna na pravé straně protruze tvrdých tkání. U této skupiny žen nebyla tudíž asymetrie měkkých a tvrdých tkání v souladu.



Obrázek 31: Srovnání asymetrie tvrdých a měkkých tkání u žen ve věku do 39 let (I.), od 40 do 59 let (II.) a 60 a více let (III.)



Obrázek 32: Srovnání asymetrie tvrdých a měkkých tkání u mužů ve věku do 39 let (I.), od 40 do 59 let (II.) a 60 a více let (III.)

6.8 Variabilita tvrdých a měkkých tkání

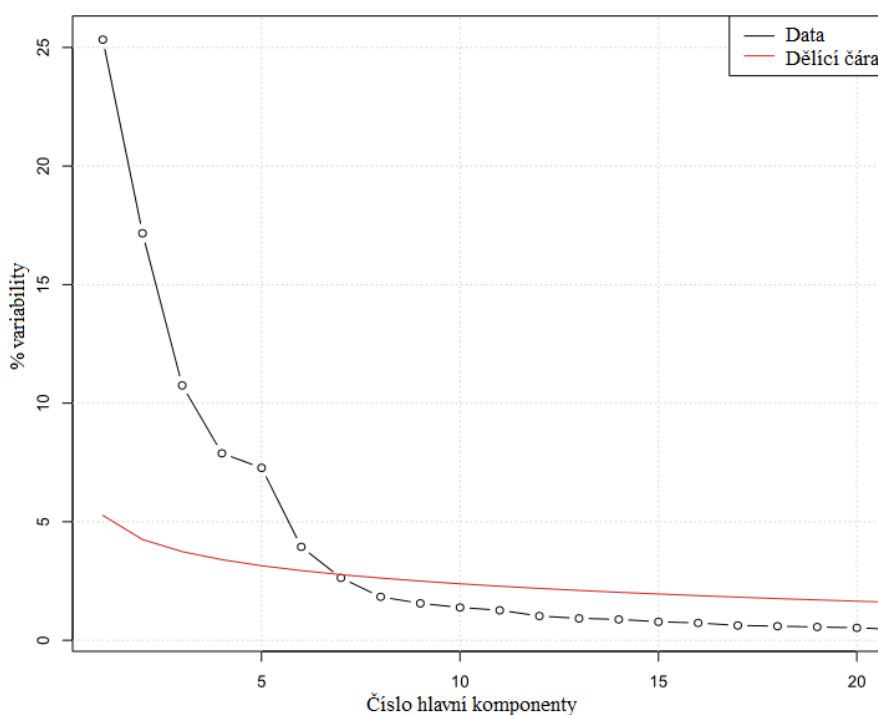
V následujících podkapitolách byla hodnocena variabilita tvaru tvrdých a měkkých tkání. Vzhledem k nevýznamnému pohlavnímu dimorfismu byli hodnoceni všichni jedinci dohromady a zohlednily se pouze věkové skupiny, do kterých byli jedinci rozděleni. K hodnocení byla využita analýza hlavních komponent (PCA). Pomocí sutinového grafu bylo určeno, které hlavní komponenty obsahují takové množství informace, aby dostatečně přispěly k celkové variabilitě sledovaných jedinců. Vztah mezi dvěma hlavními komponentami (PC) byl vyjádřen pomocí grafu PC skóre s vyznačenými 95% konfidenčními elipsami, který vizualizuje variabilitu jednotlivých skupin jedinců. Nakonec byly první komponenty, které se podílely na celkové variabilitě tvaru nejvíce, vizualizovány na vzorový model (base mesh). Byly použity odstíny modré barvy, které znázornily negativní hodnoty dané komponenty, a odstíny červené barvy, které znázornily pozitivní hodnoty. Šedá barva značila místa, která nebyla danou komponentou ovlivněna. Po vyhodnocení nejvíce se podílejících hlavních komponent, byla pomocí vizualizace v programu Morphome3cs II nalezena komponenta zobrazující variabilitu asymetrie. Tato komponenta byla nalezena pro tvrdé i měkké tkáně. Byla taktéž vizualizována na vzorovém modelu a následně zobrazena v grafu PC skóre ve vztahu k první hlavní komponentě.

6.8.1 Hodnocení variability tvaru tvrdých tkání

Prvních deset hlavních komponent tvořících variabilitu tvrdých tkání je shrnuto v tabulce 4. Zobrazené komponenty zodpovídají celkem za 79,76 % celkové variability. Na sutinovém grafu (graf 1) jsou zobrazeny komponenty, které jsou důležité pro hodnocení variability tvrdých tkání. Tyto významné komponenty jsou od těch méně významných odděleny dělicí čarou. Z grafu vyplývá, že na variabilitě tvaru tvrdých tkání se významně podílí první dvě hlavní komponenty (PC 1 a PC 2), které zodpovídají za 42,48 % variability. Jejich vliv na tvar tvrdých tkání je zobrazen na obrázku 33 a jejich závislost ve věkových intervalech je vyjádřena pomocí grafu PC skóre (graf 2).

Tabulka 4: Souhrn deseti hlavních komponent vyjadřujících variabilitu tvrdých tkání

Číslo hlavní komponenty	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
Variabilita (%)	25,35	17,13	10,76	7,87	7,28	3,94	2,64	1,84	1,56	1,39

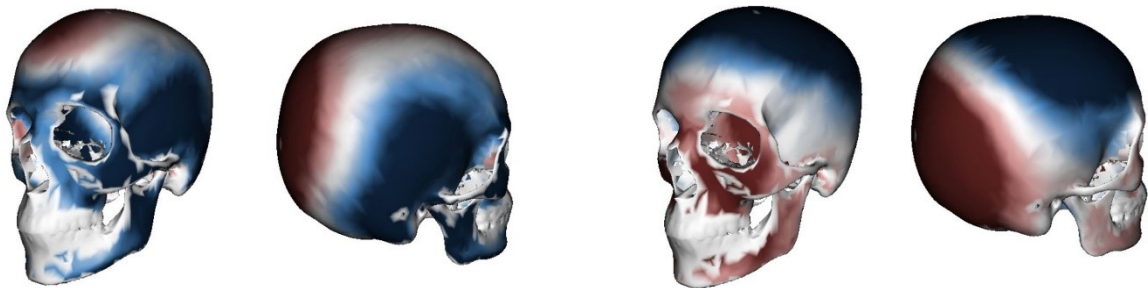


Graf 1: Sutinový graf PCA pro tvar tvrdých tkání

První hlavní komponenta v pozitivních hodnotách vysvětluje variabilitu tvaru mozkovny do délky a výšky. Jedinci nacházející se v těchto hodnotách mají v pásu lemujícím midsagitální rovinu od čelní kosti, přes temenní kosti, posteriorně až k týlnímu otvoru lebku více protaženou a laterálně oploštěnou. Takoví jedinci se vyznačují vysokým čelem, celkově vyšší a užší klenutou mozkovnou s užší obličejovou částí a méně výraznými nadočnicovými oblouky. Šířka mozkovny a obličejové části, také tvar nadočnicových oblouků, je charakterizována negativními hodnotami první hlavní komponenty. Obličej je jako celek také vysvětlen negativními hodnotami, ale ne tak silně jako je tomu u celkové šířky lebky. V negativních hodnotách mají jedinci plošší čelo s výraznějšími

nadočnicovými oblouky, plošší je i týlní oblast a lebka je celkově nižší. Vyznačují se také širší lebkou nejen ve spánkové oblasti, ale i v obličejí.

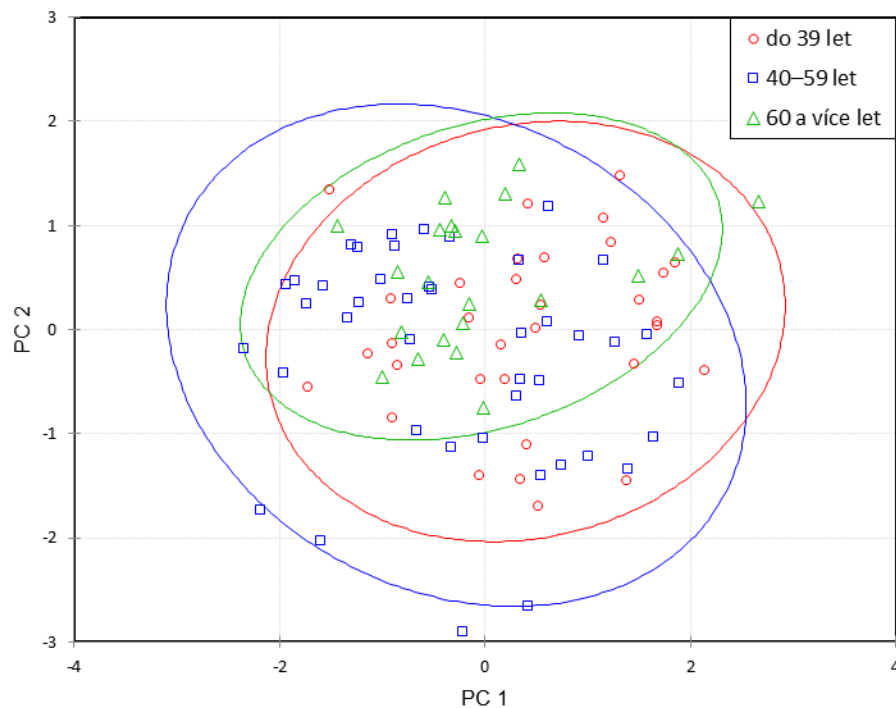
Druhá hlavní komponenta vysvětluje v pozitivních hodnotách variabilitu tvaru obličejí a týlní oblasti. Jedinci vykazující pozitivní hodnoty mají obličej prominující vpřed a týlní oblast vzad. Zároveň mají celou superiorní plochu mozkovny spíše plošší. Lebka se tak jeví předozadně protáhlá. Jedinci se vyznačují vystupujícím obličejem s nízkým užším čelem a celkově nižší, posteriorně protáhlou, lebkou. Negativní hodnoty druhé hlavní komponenty vysvětlují variabilitu tvaru superiorní části celé mozkovny. Jedinci lokalizovaní v negativních hodnotách mají vyšší a širší mozkovnu v superiorní části. Lebka je celkově vyšší a předozadně kratší. Jedinci mají vyšší a širší čelo a výrazně menší prominenci obličejí a týlní oblasti.



Obrázek 33: Vizualizace vlivu prvních dvou hlavních komponent (PC 1 vlevo, PC 2 vpravo) na tvar tvrdých tkání

Při hodnocení grafu PC skóre (graf 2) bylo zjištěno, že ve věkovém intervalu do 39 let se jedinci nacházeli hlavně v pozitivních hodnotách první hlavní komponenty. Nejvíce jich však bylo zjištěno v pravém horním kvadrantu grafu, v pozitivních hodnotách první (PC 1) i druhé hlavní komponenty (PC 2). Tito jedinci se vyznačují užší a nižší lebkou se zaoblenou mozkovnou a mírnou prominencí obličejí a týlní oblasti. Jedinci ve druhé věkové skupině, od 40 do 59 let, se v grafu nacházeli s větším rozptylem než zbylé dvě skupiny. Vyskytli se ve všech kvadrantech, ale nejvíce jich bylo umístěno v levém horním kvadrantu, který odpovídá negativním hodnotám PC 1 a pozitivním hodnotám PC 2. Tito jedinci se projevují širší a předozadně delší lebkou s nižší a plošší mozkovnou. Mají prominující obličej s výraznějšími nadočnicovými oblouky. Jedinci ve věkové skupině 60 a více let byli z většiny vyhodnoceni v negativních hodnotách PC 1. Nejvíce se

jich nacházelo v levém horním kvadrantu grafu, který odpovídá negativním hodnotám první hlavní komponenty a pozitivním hodnotám druhé hlavní komponenty. Sledují motiv předchozí věkové skupiny, ale s mnohem menším rozptylem. Tito jedinci mají širší a předozadně delší lebku s nižší a plošší mozkovnou a prominující obličej s výraznějšími nadočnicovými oblouky.

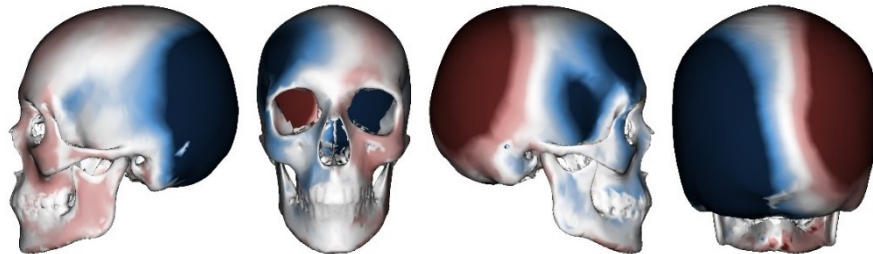


Graf 2: Graf PC skóre znázorňující závislost prvních dvou hlavních komponent (PC 1, PC 2) tvaru tvrdých tkání

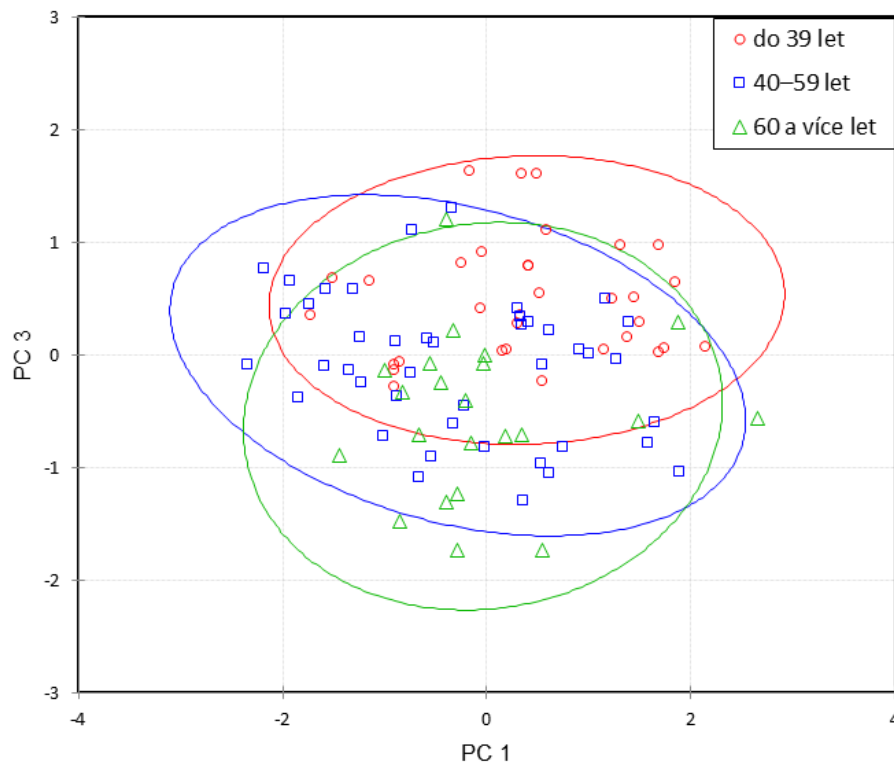
6.8.2 Hodnocení variability asymetrie tvrdých tkání

Asymetrii tvrdých tkání zobrazuje třetí hlavní komponenta (PC 3), ta zodpovídá za 10,76 % celkové variability tvaru lebek. Pozitivní hodnoty této komponenty charakterizují prominující levou polovinu obličeje a pravou polovinu mozkové části lebky. Jedinci lokalizováni v pozitivních hodnotách mají lebku s mírně vpřed vystupující levou polovinou obličeje a pravou polovinou posteriorní a laterální plochy mozkové části. Pravá polovina obličeje a levá polovina mozkové části je u těchto jedinců méně vystupující. Negativní hodnoty třetí hlavní komponenty charakterizují prominující pravou polovinu obličejové části lebky a levou polovinu mozkové části. Jedinci v negativních hodnotách mají vpřed

vystupující pravou polovinu obličeje a levou polovinu laterální a posteriorní plochy mozkové části lebky. Méně vystupující mají naopak levou polovinu obličeje a pravou polovinu mozkové části.



Obrázek 34: Vizualizace třetí hlavní komponenty (PC 3) zobrazující asymetrii tvrdých tkání



Graf 3: Graf PC skóre znázorňující závislost dvou hlavních komponent (PC 1 a PC 3) variability asymetrie tvrdých tkání

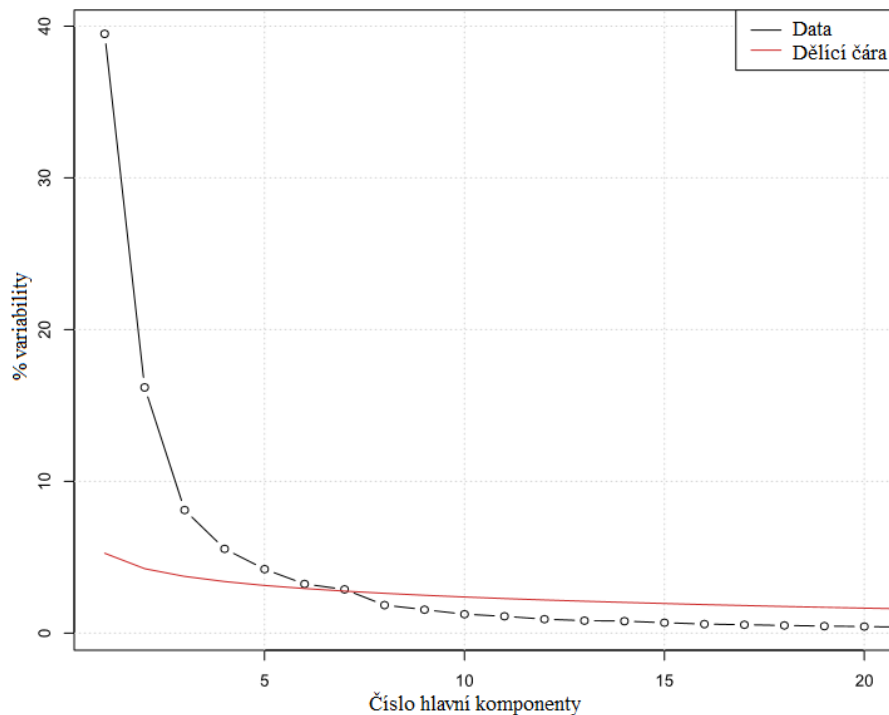
Při hodnocení grafu PC skóre pro třetí hlavní komponentu (graf 3) bylo zjištěno, že se stoupajícím věkem se jedinci posouvají z pozitivních hodnot třetí hlavní komponenty do negativních hodnot. Jedinci ve věkové skupině do 39 let se nacházeli hlavně v pozitivních hodnotách PC 3. Tito jedinci mají více prominující levou polovinu obličeje a pravou laterální i posteriorní oblast mozkové části lebky. Střední věková skupina jedinců, od 40 do 59 let, byla umístěna ve střední části grafu s mírnou převahou posunu k negativním hodnotám PC 3. Jedinci ve věku 60 a více let byli vyhodnoceni v naprosté většině v negativních hodnotách PC 3. Jedinci v této skupině se projevují více prominující pravou polovinou obličejové části lebky a naopak levou laterální a posteriorní oblastí mozkové části.

6.8.3 Hodnocení variability tvaru měkkých tkání

Prvních deset hlavních komponent vysvětlujících variabilitu měkkých tkání je zobrazeno v tabulce 5. Dané komponenty zodpovídají celkem za 84,69 % celkové variability. Komponenty důležité pro hodnocení jsou zobrazeny na sutinovém grafu (graf 4) a jsou odděleny dělicí čarou od méně významných komponent. Z grafu vyplývá, že na variabilitě měkkých tkání se významně podílí první dvě hlavní komponenty (PC 1 a PC 2), které vysvětlují 54,68 % variability. Vizualizace vlivu PC 1 a PC 2 na měkké tkáně je zobrazen na obrázku 35 a jejich závislost je vyjádřena pomocí grafu PC skóre (graf 5) s ohledem na rozdělení jedinců do věkových skupin.

Tabulka 5: Souhrn deseti hlavních komponent vyjadřujících variabilitu měkkých tkání

Číslo hlavní komponenty	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7	PC 8	PC 9	PC 10
Variabilita (%)	39,53	15,15	9,83	5,32	3,93	3,36	2,94	1,72	1,63	1,29

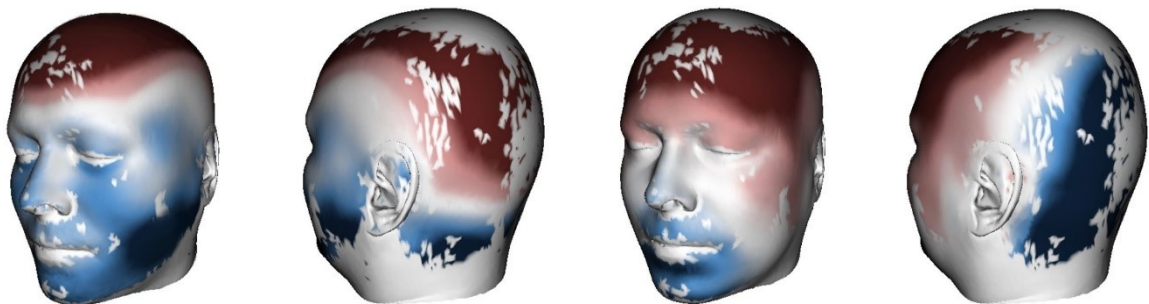


Graf 4: Sutinový graf PCA pro tvar měkkých tkání

První hlavní komponenta v pozitivních hodnotách vysvětluje variabilitu tvaru měkkých tkání mozkové části do výšky a délky. V oblasti začínající na čele, posteriorně pokračující na temeno a týl hlavy mají jedinci, kteří se nachází v pozitivních hodnotách PC 1, hlavu více vystupující a zaoblenou. Obličej je méně prominující a hlava je celkově užší. Jedinci se projevují zaoblenou větší mozkovou částí a menším, užším a méně vystupujícím obličejem s vyšším čelem. Negativní hodnoty první hlavní komponenty vysvětlují variabilitu tvaru obličeje a spodní části zátýlní oblasti, kde hlava přechází v krk. Tvar hlavy od oblasti očí inferiorně po celý zbytek obličeje, laterálně k uším a na spánkovou oblast, je u jedinců nacházejících se v negativních hodnotách PC 1 více prominující. Tito jedinci se projevují obličejem prominujícím vpřed, ale i do šířky. Hlavně v oblasti dolní čelisti, kde mají více vystouplé tváře a širší přechod do oblasti krku, který pokračuje i posteriorně. Mají nízké užší čelo, které ustupuje vzad díky plošší mozkové části na temeni i týlu.

Druhá hlavní komponenta vysvětluje v pozitivních hodnotách variabilitu tvaru čela a temenní oblasti do šířky a výšky, a také šířku obličeje v oblasti spánku. Temenní oblast, která je u jedinců nacházejících se v pozitivních hodnotách PC 2 více prominující,

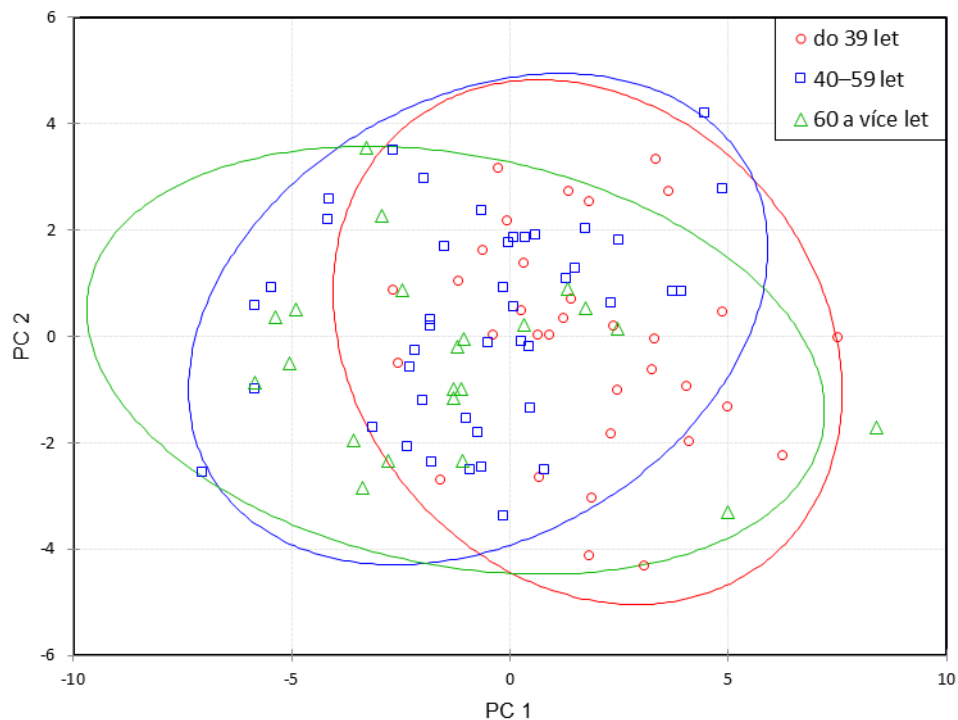
způsobuje celkově vyšší hlavu. Prominující je i celá oblast čela, která vystupuje vpřed a do šířky, kde laterálně přechází na spánkovou a lícni oblast. Tito jedinci se projevují širším čelem i celou horní polovinou obličeje. Oblast úst není příliš výrazná, také mají užší a menší bradu. Hlava je vyšší a předozadně kratší, jelikož je týlní oblast více plochá. Negativní hodnoty druhé hlavní komponenty vysvětlují variabilitu tvaru oblasti úst a posteriorní části hlavy. Oblast inferiorní poloviny obličeje je více v prominenci. Ústa i brada více vystupují vpřed a oblast je laterálně širší. V posteriorní části hlavy více vystupuje celá týlní oblast vzad, je více klenutá a prodlužuje tak předozadní délku hlavy. Jedinci nacházející se v negativních hodnotách PC 2 mají nízké ploché čelo, které ustupuje vzad, a úzkou horní polovinu obličeje. Naopak spodní polovina vystupuje vpřed s výraznou bradou. Hlava je nižší a předozadně delší.



Obrázek 35: Vizualizace vlivu prvních dvou hlavních komponent (PC 1 vlevo, PC 2 vpravo) na tvar měkkých tkání

Při hodnocení grafu PC skóre (graf 5) ve věkovém intervalu do 39 let byl zjištěn značný rozptyl variability pohybující se hlavně v pozitivních hodnotách první hlavní komponenty. Nejvíce jedinců bylo zjištěno v pravém dolním kvadrantu, který odpovídá pozitivním hodnotám PC 1 a negativním hodnotám PC 2. Jedinci umístění v těchto hodnotách mají zaoblenou vystupující mozkovou část hlavy s prominencí týlní oblasti. V obličeji se projevují vyšším čelem, také výraznou dolní čelistí a bradou. Ve věkovém intervalu od 40 do 59 let vykázali jedinci v grafu velmi podobný rozptyl jako předchozí skupina. Nejvíce se jich nachází v levém dolním kvadrantu grafu, který odpovídá negativním hodnotám PC 1 i PC 2. Jedinci mají nižší hlavu díky méně zaoblené a plošší mozkové části, zároveň i předozadně delší díky vystupující týlní oblasti vzad a obličeji vpřed. Obličej je širší, hlavně v oblasti tváří a dolní čelisti včetně brady, která je širší

a mohutnější. I když má věková skupina 60 a více let největší rozptyl hodnot první hlavní komponenty, většina jedinců ze skupiny se nacházela v jejích negativních hodnotách. Nejvíce jedinců bylo zjištěno v levém dolním kvadrantu, v negativních hodnotách PC 1 i PC 2. Sleduje tak trend věkového intervalu 40–59 let. Jedinci se projevují nižší a předozadně delší hlavou, díky plošší mozkové části a vystupující týlní oblasti. Obličej prominuje vpřed, je široký a brada výrazně vyčnívající.



Graf 5: Graf PC skóre znázorňující závislost prvních dvou hlavních komponent (PC 1, PC 2) tvaru měkkých tkání

6.8.4 Hodnocení variability asymetrie měkkých tkání

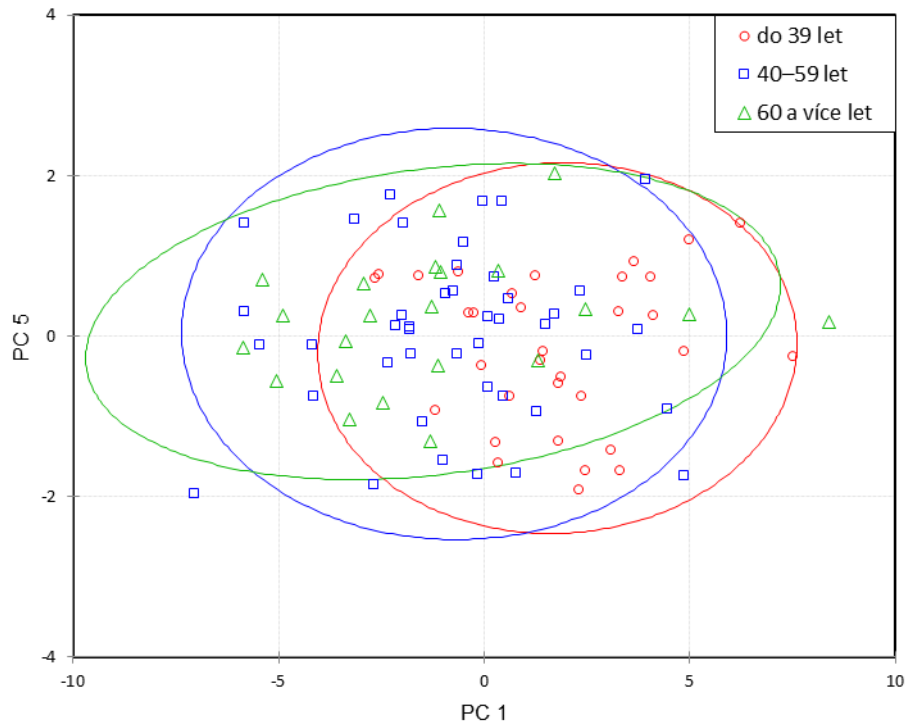
Asymetrii měkkých tkání nejlépe zobrazuje pátá hlavní komponenta (PC 5), která vysvětluje 3,93 % celkové variability tvaru měkkých tkání. Pozitivní hodnoty této komponenty vyjadřují prominenci levé poloviny obličeje, od čela inferiorně dolů až po bradu a laterálně se protahující k uchu. U posteriorní části hlavy byla jako prominující vyhodnocena pravá část, a to od ucha posteriorně postupující dozadu na celou týlní a posteriorní část temenní oblasti. Jedinci nacházející se v pozitivních hodnotách, tak mají

mírně vpřed vystupující levou polovinu obličeje, a naopak pravou polovinu posteriorní části hlavy. Negativní hodnoty páté hlavní komponenty se vyznačují prominující pravou polovinou obličeje pokračující inferiorně na bradu a laterálně k uchu. Posteriorní oblast temenní a oblast týlní je prominující na levé straně. V negativních hodnotách mají jedinci mírně vpřed vystupující pravou polovinu obličeje a levou polovinu posteriorní oblasti hlavy.



Obrázek 36: Vizualizace páté hlavní komponenty (PC 5) zobrazující asymetrii měkkých tkání

Jako komponenta vyjadřující asymetrii měkkých tkání byla vyhodnocena pátá hlavní komponenta, která se podílí na celkové variabilitě jen z 3,93 %. Při hodnocení grafu PC skóre variability asymetrie (graf 6) bylo poté potvrzeno, že rozdíly mezi skupinami nejsou příliš velké a všechny věkové skupiny byly umístěny kolem středu grafu. I přesto byli jedinci ve věku do 39 let posunuti více do negativních hodnot PC 5. Tito jedinci mají mírně vpřed vystupující pravou polovinu obličeje, a naopak levou polovinu od ucha posteriorně postupující na týlní a temenní oblast. Narozdíl od nejmladších jedinců byly zbylé dvě věkové skupiny v grafu posunuty spíše do pozitivních hodnot PC 5. Jedinci ve věku 40–59 let a 60 a více let mají více prominující levou polovinu obličeje a pravou polovinu posteriorní části hlavy.



Graf 6: Graf PC skóre znázorňující závislost dvou hlavních komponent (PC 1 a PC 5) variability asymetrie měkkých tkání

7. Diskuze

V předkládané diplomové práci byla pomocí metod geometrické morfometrie sledována asymetrie na měkkých a tvrdých tkáních celého povrchu hlavy. Metody geometrické morfometrie umožňují získávat, zpracovávat a analyzovat tvarové proměnné v trojrozměrném prostoru s uchováním všech geometrických informací. Hodnocení tvaru probíhá na základě souřadnic landmarků, které charakterizují analyzovanou strukturu (Slice, 2005). Díky upravenému algoritmu CPD – DCA bylo možné lépe analyzovat asymetrii celého povrchu hlavy (Krajíček et al., 2012) a nevycházet při hodnocení pouze z měření úhlů nebo vzdáleností mezi landmarky, které je méně přesné (Verhoeven et al., 2016). K analýze byly využity CT snímky dospělé české populace ve věkovém rozmezí 21–84 let a od každého jedince byl k dispozici povrch měkkých i tvrdých tkání. Použity byly pouze CT snímky jedinců bez viditelných zranění a operací hlavy, morfologických anomálií, většího počtu chybějících zubů a podobných jevů, které by mohly ovlivnit výsledky práce. Jedinci byli rozděleni na muže a ženy a poté do tří věkových skupin podle zvolených věkových intervalů. Jelikož se jedná o transversální studii, byly tyto intervaly zvoleny tak, aby byl v každé skupině přibližně stejný počet jedinců a zároveň skupina pokrývala rozpětí zhruba 20 let. Vzhledem k povaze práce je však obtížné poté odvodit kauzální vztahy věkového rozdělení (Setia, 2016).

Jako první byla sledována asymetrie na tvrdých tkáních. U žen i mužů ve všech věkových intervalech byla zjištěna pravá strana v protruzi na celém frontálním i laterálním povrchu lebky. Větší asymetrie na pravé polovině lebky byla zjištěna i v jiných studiích (e.g. De Moraes et al., 2011). Tato nesouměrnost byla u všech skupin žen i mužů vyhodnocena na mapách signifikance jako statisticky velmi významná. Protruze vpravo pokračovala na posteriorní oblast pouze u žen ve věku 60 a více let. U mladších skupin žen, ve věkovém intervalu do 39 let a od 40 do 59 let, a všech skupin mužů byla u posteriorní oblasti vyhodnocena v protruzi levá strana. Nicméně, jak ukázaly mapy signifikance, rozdíly mezi stranami na posteriorní oblasti lebky nebyly vyhodnoceny jako statisticky významné. Pouze u mužů ve věkovém intervalu od 40 do 59 let byl nalezen signifikantní rozdíl. Protruze vpravo na frontální ploše lebky a na posteriorní ploše protruze naopak vlevo souvisí s vývojem a lateralizací mozkových hemisfér (Özener et al., 2011; Hodgetts and Hausmann, 2020) a vyskytuje se již od ranného postnatálního vývoje (Raz et al., 2004; Vannucci et al., 2019). Tento nálezn také souvisí s preferencí pravé ruky

(LeMay, 1977; Nissan et al., 2004; Özener et al., 2011). Informace, kterou ruku jedinci použití pro tuto práci preferují, nebyla při analýze známa. Je možné se odkázat pouze na dostupnou literaturu, ze které vychází, že většina populace preferuje pravou ruku jako dominantní (Hellige, 2001). Další možné vysvětlení protruze pravé strany v obličejové části je unilaterální typ mastikace, který taktéž převažuje v populaci na pravé straně a ovlivňuje vznik asymetrie (Nissan et al., 2004; Ibrová et al., 2017; Tiwari et al., 2017).

Se stoupajícím věkem byl zjištěn klesající výskyt asymetrie u žen i u mužů. Tento úbytek byl nejvíce patrný na frontálním povrchu lebky. V menší míře na čelní kosti, kde tvar lebky ovlivňuje asymetrie mozkových hemisfér, která se vyskytuje napříč různými věkovými kategoriemi (Raz et al., 2004). Hlavní úbytek byl zjištěn na kosti lícni a horní i dolní čelisti. Ubývající asymetrie byla také patrná na inferiorní části laterálního povrchu lebky, zejména na kosti spánkové v oblasti *processus mastoideus*. Úbytek asymetrie s přibývajícím věkem byl statisticky významný, jak ukázaly mapy signifikance, kde z tmavého odstínu modré postupně přechází barva na šedou. Změny tvaru lebky se nevyskytují pouze během růstu v dětství, ale po celou dospělost a stáří (Velemínská et al., 2021). Růst pokračuje i do pozdějšího věku, ale zjevně zpomalujícím způsobem. Velmi staří lidé ve skutečnosti vykazují zmenšení velikosti kraniofaciální kostry, částečně to souvisí s remodelací alveolárních výběžků (Behrents, 1985; Mahnama et al., 2013).

Z pohledu pohlavního dimorfismu byla u mužů i u žen zjištěna pravá strana v protruzi oproti levé straně na celém frontálním i laterálním povrchu lebky. Pohlavní dimorfismus byl vyhodnocen jako velmi nízký a jak ukázaly mapy signifikance, nebyl statisticky významný. Tento nález je v souladu s literaturou (e.g. Vannucci et al., 2019).

V dalších kapitolách byla sledována asymetrie na měkkých tkáních. Jako na povrchu lebek, i u měkkých tkání, byly výsledky žen i mužů velmi podobné a byly mezi nimi pouze malé rozdíly. V oblasti čela a anteriorní části temenní oblasti byla zjištěna protruze na pravé straně, která pokračovala mediálně na nos. Na lícni oblasti se protruze vpravo změnila na protruzi levé strany, která postupuje inferiorně kolem úst na bradu, poté mediálně na tvář a přes oblast ucha na posteriorní část hlavy. Dá se tedy konstatovat, že na většině povrchu měkkých tkání dominuje levá strana v protruzi. Tento nález byl shodný pro ženy i muže a na mapách signifikance byl vyhodnocen jako statisticky velmi významný. Větší výskyt asymetrie na levé straně zjistily i další studie (e.g. Ercan et al., 2008; Huang et al., 2013). U jiných studií vyšla naopak pravá strana více asymetrická

(e.g. Ferrario et al., 1995a). Vždy ale záleží na použité metodě i interpretaci výsledků (De Moraes et al., 2011). Asymetrie v obličeji také souvisí se stranovou preferencí používání mimického svalstva (Lindell, 2018; Ocklenburg and Güntürkün, 2018).

Podobně jako u tvrdých tkání i zde byl zjištěn s přibývajícím věkem úbytek asymetrie. Úbytek byl vyhodnocen na barevných mapách i mapách signifikance převážně na superiorní a posteriorní oblasti hlavy u obou pohlaví. Výrazné rozdíly mezi stranami u žen ve věku 60 a více let zůstávají na nose, inferiorně v oblasti úst a laterálně pokračují na oblast tváří a líce, u mužů bylo signifikantních rozdílů zjištěno méně. Nicméně i muži vykázali rozdíl mezi stranami v oblasti lící a inferiorní části tváře. V menší míře byla vyhodnocena asymetrie na posteriorní týlní oblasti, hlavně u mužů, a na temeni hlavy. U obou pohlaví byla zjištěna výrazná asymetrie v horizontálně táhlé oblasti před uchem a inferiorně i za uchem. Tento lokálně specifický rozdíl byl pravděpodobně způsoben deskami výpočetní tomografie, které se během skenování přiřkládají laterálně právě v této oblasti pro stabilizaci hlavy. Rozdíl v této oblasti byl nejvíce patrný u nejstarších věkových skupin. Tito jedinci mají již věkem povolené měkké tkáně, které mohly právě desky CT zdeformovat a vnést tak chybu do hodnocení asymetrie v této práci. Nejen v oblasti uší, ale na celém povrchu měkkých tkání je možné zkreslení hodnot asymetrie z důvodu skenování jedinců v horizontální poloze a působení gravitace na povislé nebo ochablé části obličeje (De Greef et al., 2005; Coleman and Grover, 2006).

Pohlavní dimorfismus byl u měkkých tkání více zřetelný než na lebkách, ale ani tak nebyly hodnoty signifikance příliš vysoké. U nejmladších jedinců ve věku do 39 let byl mezi muži a ženami nalezen signifikantní rozdíl laterálně v oblasti horního rtu a pokračoval na inferiorní část tváře do oblasti dolní čelisti. Zde byly ženy v protruzi vlevo a muži vpravo. Ve věkovém intervalu od 40 do 59 let byl významný rozdíl zjištěn kolem očí, kde měly ženy protruzi vlevo, a posteriorně na týlní oblasti, kde byly ženy v protruzi naopak vpravo. V posledním věkovém intervalu nebyl významný rozdíl mezi pohlavími, což může souviset s již zmiňovaným efektem gravitace, který mohl skrýt některé rozdíly nejen mezi stranami u jednoho jedince, ale i při porovnání mužů a žen mezi sebou. Také další studie nezjistily signifikantní rozdíly při hodnocení pohlavního dimorfismu asymetrie v obličeji (e.g. Ferrario et al., 1995a; Koehler et al., 2004). Jiné zjistily rozdíl, ale bez laterální specifikace. Např. Ercan (2008) vyhodnotil ženy obecně více asymetrické než muže (Ercan et al., 2008).

V další části diplomové práce byl sledován rozdíl mezi asymetrií povrchu měkkých a tvrdých tkání. Mezi muži a ženami nebyl významný rozdíl, jak bylo zjištěno v předchozích kapitolách. S přibývajícím věkem asymetrie sice na obou typech tkání ubývala, ale její rozložení se, co se týče stranovosti, neměnilo. Z toho důvodu byl hodnocen soubor jako celek. Korelace mezi tkáněmi byla zjištěna v oblasti nosu, superiorně v oblasti čela přecházející na temenní oblast a poté posteriorně na oblast týlní. Všechny tyto oblasti jsou místa s nižší hloubkou měkkých tkání. Tkáně zde více přiléhají k lebce a není tu prostor pro kompenzaci asymetrie kostěného podkladu a měkké tkáně jsou téměř symetricky rozloženy (Torres Muñoz et al., 2011). Asymetrie oblasti tváří v celé výšce, od oka až po hranici dolní čelisti, pokračující do oblasti ucha, byla hodnocena v nesouladu s asymetrií zjištěné na lebce. U měkkých tkání byla vyhodnocena protruze na levé straně a na tvrdých tkáních naopak na pravé straně. Jedná se o oblasti s vyšší hloubkou měkkých tkání a tak se zde může vyskytovat jejich nesymetrické rozložení (Drgáčová et al., 2016). Díky většímu množství měkkých tkání je v těchto oblastech také větší prostor pro kompenzaci asymetrie na povrchu lebky. Existence kompenzačního mechanismu je možné vysvětlení rozdílného výsledku hodnocení asymetrie na obou typech tkání (Shah and Joshi, 1978; Nur et al., 2016; Economou et al., 2018).

Kvůli zatím nenaprogramovanému algoritmu v softwaru Morphome3cs II pro výpočet rozdílu asymetrie mezi různými typy tkání, byl rozdíl hodnocen pouze pomocí vizuálního porovnání barevných map a map signifikance. Nelze proto konstatovat, zda byly oblasti, kde si asymetrie vizuálně odpovídaly, skutečně podobné nebo zde byl rozdíl, který ale nelze tímto způsobem hodnotit. Podobně je tomu i u oblastí, kde byly povrchy, co se týče asymetrie, v rozporu. Zda mezi nimi byl statisticky významný rozdíl či nikoli, se vizuální metodou také nedozvíme. Jedná se tak o možnost pro další studii, kde by byla tato problematika hodnocena přesněji.

8. Závěr

Diplomová práce se zabývala sledováním asymetrie celého povrchu lebky člověka a souvisejících měkkých tkání. Pro analýzu byl vybrán soubor CT snímků jedinců dospělé české populace ve věkovém rozmezí 21–84 let. Cílem práce bylo pomocí metod geometrické morfometrie hodnotit tvar obou typů tkání s ohledem na pohlavní dimorfismus a věk jedince. Dalším navazujícím cílem bylo vyhodnotit rozdíly mezi měkkými a tvrdými tkáněmi u všech skupin jedinců. Na základě těchto cílů a dostupné literatury byly na začátku práce stanoveny tři hypotézy:

1. Asymetrie se vyskytuje ve prospěch pravé strany.

Hypotéza byla částečně přijata a částečně zamítnuta. Většina povrchu lebky všech skupin jedinců byla vyhodnocena protruzivní na pravé straně. Pouze posteriorní plocha temenní a týlní kosti byla na pravé straně v retruzi. Výjimku tvořily ženy ve věku 60 a více let, které vykázaly i na posteriorní ploše lebky stejný motiv jako v obličejové části a byla zde zjištěna protruze vpravo. Měkké tkáně všech skupin jedinců vykázaly protruzi na pravé straně pouze v oblasti čela a nosu, na zbytku povrchu měkkých tkání byla zjištěna vpravo retruze.

2. Větší výskyt asymetrie je v obličejové části.

Hypotéza byla přijata. Z použité metodologie a map signifikance byl zjištěn větší výskyt asymetrie v obličejové části ve srovnání s mozkovou částí. Nález byl vyhodnocen u mužů i u žen, a to ve všech věkových skupinách. Signifikantně větší asymetrie v obličejí byla nalezena na povrchu tvrdých i měkkých tkání.

3. Asymetrie tvrdých a měkkých tkání je podobná.

Hypotéza byla částečně přijata a částečně zamítnuta. Na místech s nízkou hloubkou měkkých tkání, jako na nose a mozkové části lebky, odpovídala asymetrie lebky asymetrii měkkých tkání. Výjimku tvořila skupina žen ve věku 60 a více let, kde byla na posteriorní oblasti lebky zjištěna neshoda s měkkými tkáněmi i přes nízkou hloubku měkkých tkání.

Naopak v místech větší hloubky měkkých tkání byla na lebce a na měkkých tkáních zjištěna opačná asymetrie. U všech skupin jedinců byla na lebkách v oblasti lícní kosti, horní i dolní čelisti zjištěna protruze pravé strany. Korespondující plocha na povrchu měkkých tkání, oblast tváře, byla zjištěna na pravé straně v retruzi.

9. Seznam literatury

- Athanasiou AE, Miethke R, Van Der Meij AJ. 1999. Random errors in localization of landmarks in postero-anterior cephalograms. *Br J Orthod* 26:273–284.
- Bajaj K, Rathee P, Jain P, Panwar VR. 2011. Comparison of the Reliability of Anatomic Landmarks based on PA Cephalometric Radiographs and 3D CT Scans in Patients with Facial Asymmetry. *Int J Clin Pediatr Dent* 4:213–223.
- Behrents RG. 1985. Growth in the aging craniofacial skeleton. The University of Michigan.
- Beklemishev VN. 1969. Principles of Comparative Anatomy of Invertebrates. 3rd edition. Chicago: University of Chicago Press.
- Berlin NF, Berssenbrügge P, Runte C, Wermker K, Jung S, Kleinheinz J, Dirksen D. 2014. Quantification of facial asymmetry by 2D analysis - A comparison of recent approaches. *J Cranio-Maxillofacial Surg* 42:265–271.
- Besl P, McKay N. 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 14:239–256.
- Bigoni L, Krajcicek V, Sladek V, Veleminsky P, Veleminska J. 2013. Skull shape asymmetry and the socioeconomic structure of an early medieval central european society. *Am J Phys Anthropol* 150:349–364.
- Bishara SE, Burkey PS, Kharouf JG. 1994. Dental and facial asymmetries: a review. *Angle Orthod* 64:89–98.
- Bookstein FL. 1996. Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bull Math Biol* 58:313–365.
- Bookstein FL. 1997. Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology. Cambridge University Press.
- Burke PH. 1971. Stereophotogrammetric measurement of normal facial asymmetry in children. *Hum Biol* 43:536–548.
- Chebib FS, Chamma AM. 1981. Indices of craniofacial asymmetry. *Angle Orthod* 51:214–226.
- Choi KY. 2015. Analysis of Facial Asymmetry. *Arch Craniofacial Surg* 16:1–10.

- Čihák R. 2011. *Anatomie 1*. Praha: Grada Publishing, a.s.
- Claman L, Patton D, Rashid R. 1990. Standardized portrait photography for dental patients. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 98:197–205.
- Codari M, Pucciarelli V, Stangoni F, Zago M, Tarabbia F, Biglioli F, Sforza C. 2017. Facial thirds-based evaluation of facial asymmetry using stereophotogrammetric devices: Application to facial palsy subjects. *J Cranio-Maxillo-Facial Surg* 45:76–81.
- Coghlan BA, Laitung JKG, Pigott RW. 1993. A computer-aided method of measuring nasal symmetry in the cleft lip nose. *Br J Plast Surg* 46:13–17.
- Cohen MM. 1995. Perspectives on craniofacial asymmetry. *Int J Oral Maxillofac Surg* 24:2–7.
- Coleman SR, Grover R. 2006. The Anatomy of the Aging Face: Volume Loss and Changes in 3-Dimensional Topography. *Aesthetic Surg J* 26:4–9.
- Dadáková M, Cagáňová V, Dupej J, Hoffmannová E, Borský J, Velemínská J. 2016. Three-dimensional evaluation of facial morphology in pre-school cleft patients following neonatal cheiloplasty. *J Cranio-Maxillofacial Surg* 44:1109–1116.
- Dahan J. 2002. A simple digital procedure to assess facial asymmetry. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 122:110–116.
- Diernberger S, Bernhardt O, Schwahn C, Kordass B. 2008. Self-reported chewing side preference and its associations with occlusal, temporomandibular and prosthodontic factors: Results from the population-based study of health in Pomerania (ship-0). *J Oral Rehabil* 35:613–620.
- Djordjevic J, Zhurov AI, Richmond S, Consortium V. 2016. Genetic and Environmental Contributions to Facial Morphological Variation: A 3D Population-Based Twin Study. *PLoS One* 11:1–20.
- Drgáčová A, Dupej J, Velemínská J. 2016. Facial soft tissue thicknesses in the present Czech Population. *Forensic Sci Int* 260:106.e1-106.e7.
- Dupej J, Krajíček V, Velemínská J, Pelikán J. 2014. Statistical mesh shape analysis with nonlandmark nonrigid registration. *Eurographic Symp Geom Process*:2–3.

- Economou S, Stoustrup P, Kristensen KD, Dalstra M, K seler A, Herlin T, Pedersen TK. 2018. Evaluation of facial asymmetry in patients with juvenile idiopathic arthritis: Correlation between hard tissue and soft tissue landmarks. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 153:662-672.e1.
- Edler R, Wertheim D, Greenhill D. 2001. Clinical and computerized assessment of mandibular asymmetry. *Eur J Orthod* 23:485–494.
- Edler R, Wertheim D, Greenhill D. 2003. Comparison of radiographic and photographic measurement of mandibular asymmetry. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 123:167–174.
- Enlow DH, Hans MG. 1996. *Essentials of facial growth*. Philadelphia: W. B. Saunders company.
- Enquist M, Arak A. 1994. Symmetry, beauty and evolution. *Nature* 372:169–172.
- Ercan I, Ozdemir ST, Etoz A, Sigirli D, Tubbs RS, Loukas M, Guney I. 2008. Facial asymmetry in young healthy subjects evaluated by statistical shape analysis. *J Anat* 213:663–669.
- Evison MP. 1996. *Computerised 3D facial reconstruction*.
- Fang J-J, Tu Y-H, Wong T-Y, Liu J-K, Zhang Y-X, Leong I-F, Chen K-C. 2016. Evaluation of mandibular contour in patients with significant facial asymmetry. *Int J Oral Maxillofac Surg* 45:922–931.
- Farkas LG. 1994. *Anthropometry of the Head and Face*. 2nd ed. New York: Raven Press.
- Farkas LG, Cheung G. 1981. Facial Asymmetry in Healthy North American Caucasians: An Anthropometrical Study. *Angle Orthod* 51:70–77.
- Ferrario VF, Sforza C, Miani Jr A, Serrao G. 1995a. A three-dimensional evaluation of human facial asymmetry. *J Anat* 186:103–110.
- Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, Schmitz JH. 1998. Facial volume changes during normal human growth and development. *Anat Rec* 250:480–487.
- Ferrario VF, Sforza C, Schmitz JH, Miani A, Taroni G. 1995b. Fourier analysis of human soft tissue facial shape: sex differences in normal adults. *J Anat* 187:593–602.
- Filipek PA, Richelme C, Kennedy DN, Caviness VS. 1994. The Young Adult Human Brain: An MRI-based Morphometric Analysis. *Cereb Cortex* 4:344–360.

- Gateño J, Jajoo A, Nicol M, Xia JJ. 2016. The primal sagittal plane of the head: a new concept. *Int J Oral Maxillofac Surg* 45:399–405.
- Gateño J, Jones TL, Shen SGF, Chen K-C, Jajoo A, Kuang T, English JD, Nicol M, Teichgraber JF, Xia JJ. 2018. Fluctuating asymmetry of the normal facial skeleton. *Int J Oral Maxillofac Surg* 47:534–540.
- Gawlikowska A, Szczurowski J, Czerwiński F, Miklaszewska D, Adamiec E, Dzięciołowska E. 2007. The fluctuating asymmetry of mediaeval and modern human skulls. *HOMO - J Comp Hum Biol* 58:159–172.
- Grabowsky GL. 1994. Symmetry, Locomotion, and the Evolution of an Anterior End - a Lesson From Sea-Urchins. *Evolution (N Y)* 48:1130–1146.
- Graham JH, Raz S, Hel-Or H, Nevo E. 2010. Fluctuating asymmetry: Methods, theory, and applications. *Symmetry (Basel)* 2:466–540.
- Grayson BH, McCarthy JG, Bookstein F. 1983. Analysis of craniofacial asymmetry by multiplane cephalometry. *Am J Orthod* 84:217–224.
- De Greef S, Claes P, Mollemans W, Loubele M, Vandermeulen D, Suetens P, Willems G. 2005. Semi-automated Ultrasound Facial Soft Tissue Depth Registration: Method and Validation. *J Forensic Sci* 50:1282–1288.
- De Greef S, Claes P, Vandermeulen D, Mollemans W, Suetens P, Willems G. 2006. Large-scale in-vivo Caucasian facial soft tissue thickness database for craniofacial reconstruction. *Forensic Sci Int* 159:126–146.
- Hajeer MY, Ayoub AF, Millett DT. 2004. Three-dimensional assessment of facial soft-tissue asymmetry before and after orthognathic surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg* 42:396–404.
- Hammond P, Hutton TJ, Allanson JE, Campbell LE, Hennekam RCM, Holden S, Patton MA, Shaw A, Temple KI, Trotter M, Murphy KC, Winter RM. 2004. 3D analysis of facial morphology. *Am J Med Genet A* 126A:339–348.
- Hartsfield JKJ, Morford LA, Otero LM. 2012. Genetic Factors Affecting Facial Growth. In: Bourzgui F, editor. *Orthodontics - Basic Aspects and Clinical Considerations*. InTech. p 125–152.

- Hellige JB. 2001. Hemispheric asymmetry: What's right and what's left. Harvard University Press.
- Hodgetts S, Hausmann M. 2020. Sex/gender differences in the human brain. In: Neuroscience and biobehavioral psychology. Elsevier. p 1–10.
- Huang CS, Liu XQ, Chen YR. 2013. Facial asymmetry index in normal young adults. *Orthod Craniofac Res* 16:97–104.
- Hume DK, Montgomerie R. 2001. Facial attractiveness signals different aspects of “quality” in women and men. *Evol Hum Behav* 22:93–112.
- Hutton TJ, Buxton BF, Hammond P. 2001. Dense surface point distribution models of the human face. *Proc Work Math Methods Biomed Image Anal*:153–160.
- Hwang HS, Youn IS, Lee KH, Lim HJ. 2007. Classification of facial asymmetry by cluster analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 132:279.e1-279.e6.
- Ibrová A, Dupej J, Stránská P, Velemínský P, Poláček L, Velemínská J. 2017. Facial skeleton asymmetry and its relationship to mastication in the Early Medieval period (Great Moravian Empire, Mikulčice, 9th–10th century). *Arch Oral Biol* 84:64–73.
- Jung H, Woo EJ, von Cramon-Taubadel N. 2020. The relationship between ante-mortem molar loss and mandibular ramus shape in an archaeological population from Korea. *Int J Osteoarchaeol* 30:197–205.
- Katsumata A, Fujishita M, Maeda M, Ariji Y, Ariji E, Langlais RP. 2005. 3D-CT evaluation of facial asymmetry. *Oral Surgery, Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endodontology* 99:212–220.
- Kim T-Y, Baik J-S, Park J-Y, Chae H-S, Huh K-H, Choi S-C. 2011. Determination of midsagittal plane for evaluation of facial asymmetry using three-dimensional computed tomography. *Imaging Sci Dent* 41:79–84.
- Kitai N, Fujii Y, Murakami S, Furukawa S, Kreiborg S, Takada K. 2002. Human Masticatory Muscle Volume and Zygomatico-mandibular Form in Adults with Mandibular Prognathism. *J Dent Res* 81:752–756.
- Klingenberg CP. 2003. A developmental perspective on developmental instability: theory, models and mechanisms. In: *Developmental Instability: Causes and Consequences*. p 14–34.

- Klingenberg CP, Graham JH. 2015. Analyzing Fluctuating Asymmetry with Geometric Morphometrics: Concepts, Methods, and Applications. *Symmetry (Basel)* 7:843–934.
- Ko EW-C, Huang CS, Chen YR. 2009. Characteristics and Corrective Outcome of Face Asymmetry by Orthognathic Surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 67:2201–2209.
- Koehler N, Simmons LW, Rhodes G, Peters M. 2004. The relationship between sexual dimorphism in human faces and fluctuating asymmetry. *Proc R Soc B Biol Sci* 271:233–236.
- Kolar JC, Salter EM. 1997. *Craniofacial Anthropometry: Practical Measurement of the Head and Face for Clinical, Surgical, and Research Use*. C.C. Thomas.
- Krajčiček V, Dupej J, Velemínská J, Pelikán J. 2012. Morphometric analysis of mesh asymmetry. *J WSCG* 20:65–72.
- Kwon TG, Park HS, Ryoo HM, Lee SH. 2006. A comparison of craniofacial morphology in patients with and without facial asymmetry - A three-dimensional analysis with computed tomography. *Int J Oral Maxillofac Surg* 35:43–48.
- Lee KH, Hwang HS, Curry S, Boyd RL, Norris K, Baumrind S. 2007. Effect of cephalometer misalignment on calculations of facial asymmetry. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 132:15–27.
- Lee MS, Chung DH, Lee JW, Cha KS. 2010. Assessing soft-tissue characteristics of facial asymmetry with photographs. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 138:23–31.
- LeMay M. 1977. Asymmetries of the skull and handedness. *J Neurol Sci* 32:243–253.
- Lennartsson F, Nordin P, Wennergren G. 2016. Teaching Parents How to Prevent Acquired Cranial Asymmetry in Infants 1. *J Pediatr Nurs* 31:252–261.
- Lindell A. 2018. Lateralization of the expression of facial emotion in humans. In: *Cerebral Lateralization and Cognition: Evolutionary and Developmental Investigations of Behavioral Biases*. Elsevier. p 249–270.
- Lu SM, Bartlett SP. 2014. On facial asymmetry and self-perception. *Plast Reconstr Surg* 133:873–881.

- Mahnama A, Tafazzoli-Shadpour M, Geramipannah F, Mehdi Dehghan M. 2013. Verification of the mechanostat theory in mandible remodeling after tooth extraction: Animal study and numerical modeling. *J Mech Behav Biomed Mater* 20:354–362.
- Malínský J, Malínská J, Michalíková Z. 2005. Morfologie orofaciálního systému pro studenty zubního lékařství. Olomouc: Univerzita Palackého.
- Martin R, Saller KF. 1959. Lehrbuch der Anthropologie in systematischer darstellung Mit besonderer Berücksichtigung der anthropologischen Methoden. Stuttgart: Fischer.
- Masuoka N, Momoi Y, Ariji Y, Nawa H, Muramatsu A, Goto S, Ariji E. 2005. Can cephalometric indices and subjective evaluation be consistent for facial asymmetry? *Angle Orthod* 75:651–655.
- Meloun M, Militký J. 2002. Kompendium statistického zpracování dat. Academia.
- De Momi E, Chapuis J, Pappas I, Ferrigno G, Hallermann W, Schramm A, Caversaccio M. 2006. Automatic extraction of the mid-facial plane for cranio-maxillofacial surgery planning. *Int J Oral Maxillofac Surg* 35:636–642.
- De Moraes MEL, Hollender LG, Chen CSK, Moraes LC, Balducci I. 2011. Evaluating craniofacial asymmetry with digital cephalometric images and cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 139:523–531.
- Moslerová V, Dadáková M, Dupej J, Hoffmannova E, Borský J, Černý M, Bejda P, Kočandrlová K, Velemínská J. 2018. Three-dimensional assessment of facial asymmetry in preschool patients with orofacial clefts after neonatal cheiloplasty. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 108:40–45.
- Nanda RS, Meng H, Kapila S, Goorhuis J. 1990. Growth changes in the soft tissue facial profile. *Angle Orthod* 60:177–190.
- Nissan J, Gross MD, Shifman A, Tzadok L, Assif D. 2004. Chewing side preference as a type of hemispheric laterality. *J Oral Rehabil* 31:412–416.
- Nur RB, Çakan DG, Arun T. 2016. Evaluation of facial hard and soft tissue asymmetry using cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 149:225–237.
- Ocklenburg S, Güntürkün O. 2018. The Lateralized Brain - The Neuroscience and Evolution of Hemispheric Asymmetries. Academic Press.

- Özener BE, Pelin C, Özener BE, Kürkçüoğlu A, Zağyapan R. 2011. Analysis of facial directional asymmetry in extreme handed young males and females. *Eurasian J Anthropol* 2:96–101.
- Palmer AR, Strobeck C. 1992. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of non-normal distributions and power of statistical tests. *Acta Zool Fenn* 191:57–72.
- Palmer AR, Strobeck C, Strobecke C. 1986. Fluctuating Asymmetry: Measurement, Analysis, Patterns. *Annu Rev Ecol Syst* 17:391–421.
- Parsons PA. 1992. Fluctuating asymmetry: A biological monitor of environmental and genomic stress. *Heredity (Edinb)* 68:361–364.
- Perrett DI, Burt DM, Penton-Voak IS, Lee KJ, Rowland DA, Edwards R. 1999. Symmetry and Human Facial Attractiveness. *Evol Hum Behav* 20:295–307.
- Proffit WR, Fields HW, Sarver DM. 2013. Contemporary orthodontics. 5th ed. St. Louis, Missouri: Mosby, Elsevier.
- Raz N, Gunning-Dixon F, Head D, Rodrigue KM, Williamson A, Acker JD. 2004. Aging, sexual dimorphism, and hemispheric asymmetry of the cerebral cortex: Replicability of regional differences in volume. *Neurobiol Aging* 25:377–396.
- Rossi M, Ribeiro E, Smith R. 2003. Craniofacial asymmetry in development: An anatomical study. *Angle Orthod* 73:381–385.
- Russett SJ. 2007. An analysis of mandibular asymmetry using digital panoramic imaging—a skull study measuring jaw dimensions of artificially induced mandibular asymmetry. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 131:690.
- Samal A, Subramani V, Marx D. 2007. Analysis of sexual dimorphism in human face. *J Vis Commun Image Represent* 18:453–463.
- Savriama Y, Klingenberg CP. 2006. Geometric morphometrics of complex symmetric structures: Shape analysis of symmetry and asymmetry with Procrustes methods. *Conf Pap*:158–161.
- Setia M. 2016. Methodology series module 3: Cross-sectional studies. *Indian J Dermatol* 61:261–264.

- Severt TR, Proffit WR. 1997. The prevalence of facial asymmetry in the dentofacial deformities population at the University of North Carolina. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 12:171—176.
- Shah SM, Joshi MR. 1978. An assessment of asymmetry in the normal craniofacial complex. *Angle Orthod* 48:141–148.
- Shin SM, Kim Y-M, Kim N-R, Choi Y-S, Park S-B, Kim Y-I. 2016. Statistical shape analysis-based determination of optimal midsagittal reference plane for evaluation of facial asymmetry. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 150:252–260.
- Slice DE. 2005. *Modern morphometrics in physical anthropology*. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Šmahel Z. 2001. *Principy, teorie a metody auxologie*. Praha: Karolinum.
- Thiesen G, Gribel BF, Cristina K, Pereira R, Perpetua M, Freitas M. 2016. Is there an association between skeletal asymmetry and tooth absence? *Dent Press J Orthod* 21:73–79.
- Tiwari S, Nambiar S, Unnikrishnan B. 2017. Chewing Side Preference – Impact on Facial Symmetry, Dentition and Temporomandibular Joint and its Correlation With Handedness. *J Orofac Sci* 9:22–27.
- Torok A. 1890. *Grundzüge einer systematischen Kranimetrie : methodische Anleitung zur kranimetrischen Analyse der Schädelform für die Zwecke der physischen Anthropologie, der vergleichenden Anatomie sowie für die Zwecke der medizinischen Disziplinen Medizin) Publish*. Stuttgart: Verlag von Ferdinand Enke.
- Torres Muñoz SR, Cantín M, Pérez Rojas FJ, Suazo Galdames I. 2011. Evaluation of Facial Asymmetry Using Soft-Tissue Thickness for Forensic Purposes. *Int J Morphol* 29:1033–1039.
- Valen L Van. 1962. A Study of Fluctuating Asymmetry. *Evolution (N Y)* 16:125–142.
- Vannucci RC, Heier LA, Vannucci SJ. 2019. Cerebral asymmetry during development using linear measures from MRI. *Early Hum Dev* 139:1–12.
- Velemínská J, Bigoni L, Krajíček V, Borský J, Šmahelová D, Cagaňová V, Peterka M. 2012. Surface facial modelling and allometry in relation to sexual dimorphism. *HOMO- J Comp Hum Biol* 63:81–93.

- Velemínská J, Fleischmannová N, Suchá B, Dupej J, Bejdová Š, Kotěrová A, Brůžek J. 2021. Age-related differences in cranial sexual dimorphism in contemporary Europe. *Int J Legal Med*.
- Verhoeven T, Xi T, Schreurs R, Bergé S, Maal T. 2016. Quantification of facial asymmetry: A comparative study of landmark-based and surface-based registrations. *J Cranio-Maxillofacial Surg* 44:1131–1136.
- Vig PS, Hewitt AB. 1975. Asymmetry of the human facial skeleton. *Angle Orthod* 45:125–129.
- Weibel ER. 1991. Fractal geometry: a design principle for living organisms. *Am J Physiol* 261:361–369.
- Yoon KW, Yoon SJ, Kang BC, Kim YH, Kook MS, Lee JS, Palomo JM. 2014. Deviation of landmarks in accordance with methods of establishing reference planes in three-dimensional facial CT evaluation. *Imaging Sci Dent* 44:207–212.
- Zabrodsky H, Peleg S, Avnir D. 1995. Symmetry as a Continuous Feature. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 17:1154–1166.
- Zaidel DW, Deblieck C. 2007. Attractiveness of natural faces compared to computer constructed perfectly symmetrical faces. *Int J Neurosci* 117:423–431.
- Zhang D, Wang S, Li J, Zhou Y. 2018. Novel method of constructing a stable reference frame for 3-dimensional cephalometric analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 154:397–404.
- Zheng X, Wang L, Zhang B, Bai X, Qin K, Tian Y, Zhao R, Liu S, Wang J, Zhao Z. 2018. Accuracy of two midsagittal planes in three-dimensional analysis and their measurement in patients with skeletal mandibular deviation: a comparative study. *Br J Oral Maxillofac Surg* 56:600–606.
- Zuna I, Poušek L. 2000. Úvod do zobrazovacích metod v lékařské diagnostice I. Vydavatelství ČVUT.