

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Katedra antropologie a genetiky člověka



Rekonstrukce obličeje na základě lebky: analýza CT snímků hlavy dospělé populace

Diplomová práce

Zpracovala: Bc. Anna Drgáčová

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

Praha 2014

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Praze dne 30. 4. 2014

Anna Drgáčová

Poděkování

Ráda bych především poděkovala RNDr. Janě Velemínské PhD. za obětavé vedení diplomové práce a cenné rady při studiu. Dále bych chtěla poděkovat Mgr. Pavle Zedníkové Malé za odbornou korekturu textu. Poděkování patří také Mgr. Jánů Dupejovi za rady týkající se softwaru Morphome3cs, a Ing. Jiřímu Kudělkovi za rady spojené se statistickými metodami.

Dále mé poděkování patří všem, kteří mě při studiu podporovali.

Obsah

ABSTRAKT ČJ	7
ABSTRAKT AJ	8
1. ÚVOD	9
2. TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Rekonstrukce obličeje podle lebky	11
2.1.1 2D rekonstrukce obličeje podle lebky	12
2.1.1.1 Superimpozice	14
2.1.2 3D rekonstrukce obličeje podle lebky	15
2.1.2.1 Manuální metody rekonstrukce.....	15
2.1.2.2 Počítačové metody rekonstrukce.....	18
2.1.2.2.1 Vývoj počítačových metod	18
2.1.2.2.2 Postup při rekonstrukci obličeje	19
2.1.2.2.3 Druhy počítačových metod	22
2.1.2.2.3.1 Rekonstrukce obličeje založená na morfometrii	22
2.1.2.2.3.2 Rekonstrukce obličeje založená na morfologii	23
2.1.2.2.3.3 Rekonstrukce obličeje založená na transformaci	26
2.1.3 Přínos počítačových metod.....	28
2.1.4 Vybrané problémy spojené s rekonstrukcí obličeje	29
2.1.4.1 Vztah mezi lebkou a obličejem.....	29
2.1.4.2 Úspěšnost metody	29
2.1.4.3 Využití rozdílného materiálu a metod při získávání dat.....	30
2.1.4.4 Názvosloví landmarků.....	32
2.2 Vztah kosterního podkladu a měkkých tkání obličeje	32
2.2.1 Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k pohlaví	33
2.2.2 Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k věku	33
2.2.3 Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k etnické příslušnosti.....	34

2.2.4	Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k BMI	35
2.3	Predikce jednotlivých částí obličeje z kosterního podkladu	35
2.3.1	Tvar a velikost nosu	35
2.3.2	Postavení a velikost oka	38
2.3.3	Tvar a velikost rtů	39
2.3.4	Tvar a postavení ucha	41
3.	CÍLE	42
4.	MATERIÁL	43
5.	METODY	45
5.1	Získání dat metodou počítačové tomografie	45
5.2	Měření tloušťky měkkých tkání	45
5.2.1	Zvolené landmarky a jejich zadávání.....	45
5.2.1.1	Zvolené landmarky pro měření tloušťky měkkých tkání	45
5.2.1.2	Zadávání landmarků	50
5.2.2	Měření lineární vzdálenosti mezi korespondujícími landmarky	50
5.3	Metody použité při analýze dat	51
5.3.1	Analýza hlavních komponent (PCA)	51
5.3.2	Hottelingův T2 test.....	51
5.3.3	Shapiro-Wilkův test normality	52
5.3.4	Lineární diskriminační analýza (LDA)	52
5.3.5	Kolmogorovův-Smirnovův test	53
5.3.6	Multifaktorová analýza rozptylu (MANOVA)	53
5.3.7	Kruskal-Wallisův test.....	54
5.3.8	Wilcoxonův párový test	54
5.3.9	Prokrústovská analýza a metoda TPS	55
5.3.10	Mnohorozměrná lineární regrese	55
5.4	Sledování vztahu tvrdého a měkkého profilu obličeje: faciální rekonstrukce	56

6. VÝSLEDKY	57
6.1 Intraindividuální chyba měření.....	57
6.2 Hodnocení tloušťek měkkých tkání obličeje: referenční hodnoty pro současnou českou populaci.....	58
6.2.1 Analýza tloušťky měkkých tkání obličeje.....	64
6.2.1.1 Hodnocení variability obličeje s ohledem na pohlavní dimorfismus.....	64
6.2.1.1.1 Hodnocení pohlavního dimorfismu na celém obličeji.....	66
6.2.1.1.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu na horní polovině obličeje.....	68
6.2.1.1.3 Hodnocení pohlavního dimorfismu na dolní polovině obličeje.....	72
6.2.1.3 Hodnocení variability obličeje s ohledem na vliv věku.....	74
6.2.1.4 Hodnocení asymetrie měkkých tkání obličeje.....	76
6.3 Vztah měkkého a tvrdého profilu obličeje: faciální rekonstrukce.....	78
7. DISKUSE	79
8. ZÁVĚR	88
9. LITERATURA	89

ABSTRAKT ČJ

Znalost tloušťky měkkých tkání obličeje je základem každé kraniofaciální rekonstrukce. Má svůj velký význam především ve forenzní praxi, ale i například v estetické medicíně. Definování hodnot tloušťky měkkých tkání obličeje pro jednotlivé pohlavní, věkové a etnické skupiny se stalo důležitým tématem forenzní antropologie.

Diplomová práce byla zaměřena na vymezení tloušťky měkkých tkání obličeje současné české populace, přičemž byl zohledňován vliv pohlaví, věku a asymetrie. Jako výchozí materiál byly využity CT snímky hlav 46 žen a 56 mužů dospělých jedinců české národnosti ve věkovém rozmezí 21 až 83 let. Na každém snímku bylo definováno 80 landmarků – hodnoceno bylo tedy 40 lineárních rozměrů mezi korespondujícími body. Data byla analyzována za použití PCA, Hotellingova testu, lineární diskriminační analýzy, Kolmogorova-Smirnova testu, MANOVY, Kruskal-Wallisova testu a Wilcoxonova párového testu.

Získané tloušťky měkkých tkání budou sloužit jako standardy pro současnou českou populaci. Pohlavní dimorfismus byl prokázán na celém obličeji, stejně tak na jeho horní i dolní polovině, přičemž úspěšnost klasifikace na horní polovině obličeje výrazně klesá. Významný vliv věku na tloušťky měkkých tkání obličeje byl potvrzen u žen v oblasti bodů glabella, orbitale, jugale, zygion, subspinale, gonion, mid-ramus levé strany, mid-mandibular border a inferior malar pravé strany. U mužů se jednalo o body orbitale, supramentale, ektokonchion levé strany a mid-mandibular border levé strany. Vliv asymetrie byl prokázán na tloušťkách měkkých tkání obličeje v oblasti bodů jugale, inferior malar, supra M2, infra M2, infra canine, mentale a mid-mandibular border.

Získaná data byla dále použita pro pilotní studii počítačové rekonstrukce za použití metod geometrické morfometrie a metod statistických (GPA, TPS, PCA, mnohorozměrná lineární regrese). Přesnost predikce polohy landmarků na měkkém profilu byla nedostatečně spolehlivá pro využití ve forenzní praxi. Výsledky mohou sloužit pouze jako východisko pro rozsáhlejší studie.

Klíčová slova: kraniofaciální rekonstrukce, tloušťka měkkých tkání obličeje, počítačová tomografie, PCA, LDA, MANOVA, TPS

ABSTRAKT AJ

Knowledge of the soft facial tissues is the basis of any craniofacial reconstruction. It is of a great importance mainly for forensic practice, but it plays an important role in other fields, for example aesthetic surgery. Defining the thickness of facial tissues for different sexes, age and ethnic groups is an important aspect of forensic anthropology.

The thesis specialises in finding out the thickness of soft facial tissues in modern czech population, it takes into consideration the sex, age and assymetry. The main source of information are the CT scans of the heads of 46 adult women and 56 adult men of czech nationality ranging between ages 21 to 83. 80 landmarks are defined in each scan, therefore 40 linear measurements between corresponding points have been evaluated. Data were analysed using the PCA, Hotelling test, linear discrimination analysis, Kolmogorov-Smirnov test, MANOVA, Kruskal-Wallis test and Wilcoxon paired test.

Retrieved thicknesses of soft tissues will serve as the standards for the current czech population. Sexual dimorphism has been proven regarding the whole face, as well as both upper and lower parts of the face. The success of classification on the upper part of the face decreases significantly. Aging has been proven to have strong effect on the thickness of soft facial tissue of women in the area of glabella, orbitale, jugale, zygion, subspinale, gonion, mid-ramus of the left side, mid-mandibular border and inferior malar of the right side. Males have shown this effect in the area of orbitale, supramentale, ektokonchion of the right side and mid-mandibular border of the left side. The influence of assymetry was proven on the thickness of soft tissue in the area of jugale, inferior malar, supra M2, infra M2, infra canine, mentale and mid-mandibular border.

The obtained data were also used for the leading study of the computer reconstruction using the geometrical morphometry and statistical methods (GPA, TPS, PCA, multimeasurement linear regression). The precision of prediction shows that the method is not sufficiently reliable to be used in the forensic practice and the results may serve only as a reference for more elaborate study.

Key words: craniofacial reconstruction, soft facial tissue thickness, computer tomography, PCA, LDA, MANOVA, TPS

1. ÚVOD

Hlavním cílem metody kraniofaciální rekonstrukce je vytvoření podoby obličeje na základě lebky (Claes et al. 2006). Metoda je používána v archeologii k tvorbě podoby historicky známých osobností i anonymních jedinců či při forenzním vyšetřování jako prostředek napomáhající identifikaci oběti (Wilkinson 2010, Omstead 2002). Kraniofaciální rekonstrukce není metodou vedoucí přímo k pozitivní identifikaci. Rekonstruovaná tvář však může být rozpoznána známými či příbuznými, a tím může vést k zúžení počtu hledaných osob. K pozitivní identifikaci je pak použito dalších metod, jakými jsou např. analýza DNA, otisky prstů atd. (Wilkinson et al. 2006). Metoda rekonstrukce obličeje dodnes čelí kritice pro svou malou spolehlivost výsledků (Stephan a Henneberg 2001, Stephan 2005) a to i přes to, že se v dnešní době dává přednost moderním počítačovým metodám, kde je možnost zásahu do výsledné podoby autorem stále více potlačována, a tím snižována míra subjektivity metody. I přes rozsáhlou kritiku se metoda kraniofaciální rekonstrukce využívá v případech, kdy není možné aplikovat jiné způsoby identifikace (Tyrell et al. 1997).

Stejně jako mnohé jiné metody prošla i samotná kraniofaciální rekonstrukce v průběhu doby svým zásadním vývojem. Od tradičních metod založených na manuální rekonstrukci (ať už 2D malířské či 3D sochařské techniky) se posunula do roviny počítačového 3D zpracování (Miyasaka et al. 1995). K tomu přispěl nejen pokrok ve vývoji počítačových programů, ale především také medicínských zobrazovacích technologií, jakými jsou rentgen, ultrazvuk, magnetická rezonance či počítačová tomografie (Claes et al. 2010), které v dnešní době poskytují hlavní výzkumný materiál pro metody kraniofaciální rekonstrukce a umožňují její provedení neinvazivním způsobem i na živých jedincích. Rozvoj počítačových systémů přispěl k tomu, že se z metody rekonstrukce obličeje podle lebky (dále jen rekonstrukce obličeje) stává stále uznávanější metoda napomáhající identifikaci.

Důležitým tématem, které je s touto problematikou velmi úzce spojeno, je měření tloušťky měkkých tkání obličeje. Získané hodnoty tloušťky tkání v konkrétních bodech obličeje se využívají při rekonstrukci podoby (Claes et al. 2006, Stephan a Simpson 2008). Výsledkem měření jsou průměrné hodnoty pro každou věkovou a genderovou skupinu. Průměrné hodnoty se mohou dělit i podle tělesné stavby jedince na základě naměřeného BMI (Claes et al. 2006), jehož hodnota se pro výslednou podobu obličeje, zdá být, dle některých studií, rozhodující (De Greef et al. 2009).

V této diplomové práci byly využity landmarkové metody měření tloušťky měkkých tkání na CT snímcích dospělé české populace. Cílem práce je naměřením hodnot tloušťky měkkých tkání přispět k širšímu uplatnění metody kraniofaciální rekonstrukce a na výsledcích měření určit mezipohlavní a věkové rozdíly. Předpokládáme, že tato práce přispěje ke zvýšení spolehlivosti kraniofaciální rekonstrukce při identifikaci osob ve forenzní praxi.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Rekonstrukce obličeje

Principem kraniofaciální rekonstrukce je vytvoření obličeje na základě kosterního podkladu. Metoda je založena především na hodnotách tloušťky měkkých tkání pro danou antropologickou skupinu (dle věku, pohlaví a etnické příslušnosti). V literatuře se můžeme kromě pojmu rekonstrukce obličeje (Vanezis et al. 2000, Tyrell et al. 1997) setkat také s pojmy restaurace (Farrar 1977), reprodukce (Ubelaker et al. 1992) či aproximace (Hayes et al. 2005). Pojmy jsou vzájemně zaměnitelné, avšak lze říci, že pojem kraniofaciální rekonstrukce nejlépe vystihuje 2D či 3D rekonstrukci obličeje vytvořenou na základě lebky.

Cílem této metody je reprodukce neznámého obličeje na základě lebky pro účely jeho rozpoznání a následné identifikace jedince (Aulsebrook et al. 1995). Hlavním úkolem je zachytit co nejvěrnější podobu jedince v době jeho smrti (Claes et al. 2010). Rekonstrukce podoby je založena na změřených hodnotách tloušťky měkkých tkání v konkrétních oblastech obličeje a na pochopení vzájemného vztahu mezi tvarem a uspořádáním měkkých tkání a kostěného podkladu obličeje (Aulsebrook et al. 1995).

Rekonstrukce obličeje se ve svých počátcích využívala pro archeologické účely k vytvoření podoby známých osobností (Wilkinson 2010, Omstead 2002). Jednou z prvních rekonstrukcí byla tvorba podoby J. S. Bacha od Hise na konci 19. století (Stoney a Koelmayer 1999). Jelikož se rané práce opírají o měření tloušťky měkkých tkání na mrtvých jedincích, bývají výsledky zatíženy určitou chybou, která vychází z dehydratace tkáně a dalších post-mortem změn (Snow et al. 1970). I přes tyto problémy jsou hodnoty z konce 19. století považovány některými autory za doporučené standardy hodnot měkkých tkání pro euro-americkou populaci (Vanezis a Vanezis 2000).

Od 20. století je rekonstrukce obličeje využívána i pro forenzní účely (Omstead 2002). Prvním případem, kde byly principy kraniofaciální rekonstrukce využity a přispěly k pozitivní identifikaci, byla vražda Mary Rogersové a Isabelly Ruxtonové. Tato událost se odehrála v roce 1935 ve skotském Glasgow. Obě ženy měly zohavený obličej a měly rozřezány články prstů, aby vrah zabránil možné identifikaci těl. Na některých člancích ale přesto bylo možné otisky prstů sejmout a za pomoci metody superimpozice byla obě těla pozitivně identifikována (Wilkinson 2004, Taylor 2001). Dalším využitím metody byla identifikace obětí z koncentračních táborů 2. světové války (Taylor 2001, Snow et al. 1970). V současné

době je kraniofaciální rekonstrukce běžně užívanou metodou v případě, kdy nelze použít jiné postupy vedoucí k pozitivní identifikaci. Nejčastěji se používá za účelem vytipovat možnou totožnost neznámého jedince a na základě rozpoznání rekonstruované podoby příbuznými či známými oběti napomáhá k zúžení výběru hledaných osob při identifikaci kosterního materiálu.

Rekonstrukci obličeje lze rozdělit na 2D a 3D metody či metody manuální a počítačové (Wilkinson et al. 2006).

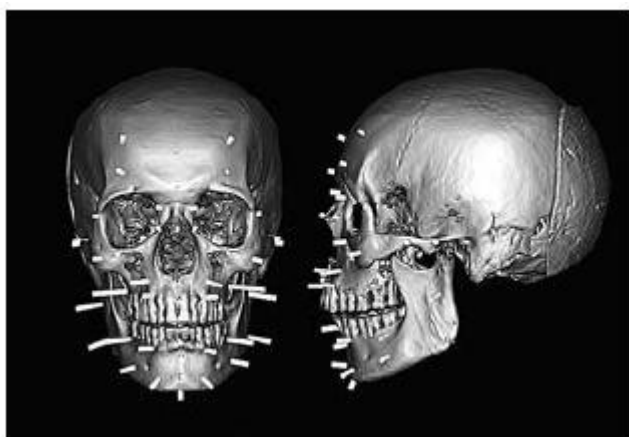
2.1.1 2D rekonstrukce obličeje podle lebky

Dvojměrná rekonstrukce obličeje se dělí na manuální a počítačovou. Principem manuální rekonstrukce je kresba portrétu přes fotografii lebky či rentgenový snímek. Základem kresby jsou hodnoty tloušťky měkkých tkání na konkrétních obličejových landmarcích (Wittwer-Backofen 2011), propojení těchto landmarků křivkou a získání kontury obličejových rysů.

Stejně jako 3D metody se i dvojměrná metoda rekonstrukce obličeje posunula od tradičních manuálních technik k využití počítačových softwarů. Mezi první takové systémy se řadí Face imaging reconstruction morphology (FIRM) od Perpera (Vanezis a Vanezis 2000), který vytváří vzhled obličeje na základě kefalometrických rozměrů. Poté co jsou do systému zaznamenány naměřené hodnoty, je vytvořen obličejový typ, který je založen na vztahu 4 hlavních oblastí obličeje – supraorbitální, patrové, okluzní a mandibulární. Obličej je v konečné fázi doplněn o problematické partie, jakými jsou např. oči, nos, rty atd. Další systémy byly vytvořeny např. Vanezisem (Vanezis a Vanezis 2000) či Miyasakou (Miyasaka et al. 1995).

V roce 1992 vyvinul Evenhouse software, který napodobuje 3D systémy rekonstrukce obličeje od P. Vanezise (Vanezis et al. 2000). Princip obou systémů je ve své podstatě shodný, neboť dochází k výběru průměrného obličeje, který je vhodně deformován na model neznámé lebky. Zohledňuje se přitom tloušťka měkkých tkání pro daného jedince na základě antropologických kritérií (věk, pohlaví, etnická příslušnost). Výsledná podoba se srovnává s ante-mortem záznamy, pokud jsou tyto k dispozici (Vanezis a Vanezis 2000).

Princip 2D počítačových metod rekonstrukce si můžeme detailněji ukázat na tzv. freiburské metodě, která byla vyvinuta ve spolupráci s German Federal Criminal Department (Wittwer-Backofen 2011). Počítačové metody vycházejí z manuální kresebné techniky. Freiburská metoda využívá frontálních pohledů lebky získaných z CT snímků, 3D skenů či 2D fotografií. Na takto získaný model lebky jsou nanášeny tloušťky měkkých tkání na konkrétních antropologických bodech. Tyto hodnoty jsou určeny podle pohlaví, věku a BMI, případně i etnické příslušnosti – pro každou skupinu je možné vygenerovat příslušný faciální templát. Hodnoty pro jednotlivé skupiny byly převzaty z prací Helmer z roku 1998 (Wittwer-Backofen 2011) a de Greef et al. (2006). Na takto definovaný obličej jsou z identikitových policejních databází vybírány tvarově a velikostně vhodné obličejové prvky, jakými jsou oči, nos či rty, a umístěny na lebku tak, aby korespondovaly s principy superimpozice. Výsledná podoba tak může být složena až z 50 různých obličejů. Nakonec je rekonstruovaná podoba doplněna o texturu obličeje včetně vrásek, pigmentace, účesu apod. Tyto detaily mohou vést k úspěšnému rozpoznání osoby. Jsou ale vybírány tak, aby co nejméně zkreslovaly výslednou podobu. I barevnost obrazu je snížena, případně je využívána pouze černobílá podoba právě z důvodu zavádějícího rozpoznání obličeje příbuznými či svědky.

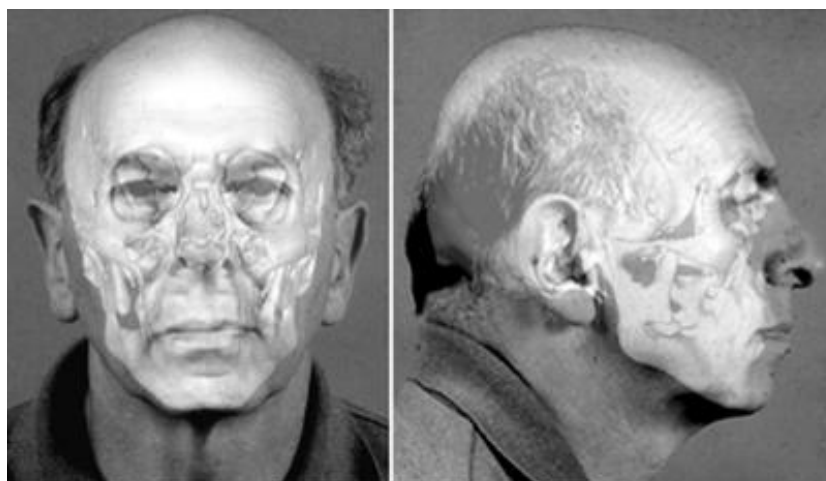


Obr. 1. Nanášení tloušťky měkkých tkání na lebku a výsledná podoba obličeje podle freiburské metody (převzato z Wittwer-Backofen 2011)

2.1.1.1 Superimpozice

Mezi 2D techniky rekonstrukce je některými autory řazena i metoda superimpozice (Tyrell et al. 1997), jindy je považována za samostatnou metodu identifikace jedince (Nelson a Michael 1998). Metoda superimpozice je technikou běžně používanou ve forenzní praxi k identifikaci oběti a její princip spočívá v překrývání dvou obrazů – lebky a obličeje jedince. Po překrytí obrazů je zjišťována jejich vzájemná korelace (Aulsebrook et al. 1995, Ubelaker et al. 1992). Hodnotí se vzájemná poloha odpovídajících antropologických bodů na lebce a obličeji, lineární rozměry a úhly obou struktur a morfologická korespondence obličejových prvků (očí, nosu, rtů apod.) a kostěného podkladu (Aulsebrook et al. 1995).

Superimpozice byla používána už od konce 19. století, více pak ve století následujícím (Omstead 2002). První superimpozice vedoucí k pozitivní identifikaci byla provedena ale až v roce 1960 (Ubelaker et al. 1992). V průběhu doby prošla metoda několika fázemi – od použití projektorů, přes videokomparaci až po využití počítačových systémů (Aulsebrook 1995). Princip zůstává u všech těchto způsobů metody stejný, vždy se využívá obraz neznámé lebky a k jejímu překrytí nejčastěji portrétní fotografie. Někdy mohou jako srovnávací obrazy sloužit busty či kreslené portréty.



Obr. 2. Příklad techniky kraniofaciální superimpozice (převzato z <http://cahid.dundee.ac.uk/facilities-services/forensic-services/craniofacial-superimposition>)

2.1.2 3D rekonstrukce obličeje podle lebky

Trojrozměrné metody rekonstrukce lze dělit na tradiční manuální metody, kdy dochází k nanášení plastické hmoty přímo na skeletální podklad (Lebedinskaya et al. 1993), a na počítačové metody (Ubelaker et al. 1992, Shahrom et al. 1996, Miyasaka et al. 1995). Princip obou metod je totožný a vychází ze vztahu měkkých tkání obličeje a skeletálního podkladu (Tyrell et al. 1997, Vanezis a Vanezis 2000).

2.1.2.1 Manuální metody rekonstrukce

Manuální 3D metody rekonstrukce se dělí na anatomické metody a metody využívající hodnoty tloušťky měkkých tkání (Ullrich a Stephan 2011, Verzé 2009, Stephan a Henneberg 2001, Quatrehomme et al. 2007, Starbuck a Ward 2007). Anatomická metoda nese svůj název podle způsobu vytváření reliéfu obličeje, a to nanášením žvýkacích a mimických svalů na lebku. Metody využívající hodnoty tloušťky měkkých tkání naopak anatomickou modelaci ignorují a opírají se pouze o tloušťku měkkých tkání v definovaných bodech obličeje, které jsou následně propojeny a vzniklá síť je vyplněna plastickou hmotou právě do dané výšky (Wilkinson 2004).

V průběhu 20. století se vyčlenily tři školy rekonstrukce obličeje – ruská, americká a manchesterská (Verzé 2009), přičemž ruská a manchesterská škola se v literatuře obecně řadí k anatomickým metodám a americká škola k druhé skupině.

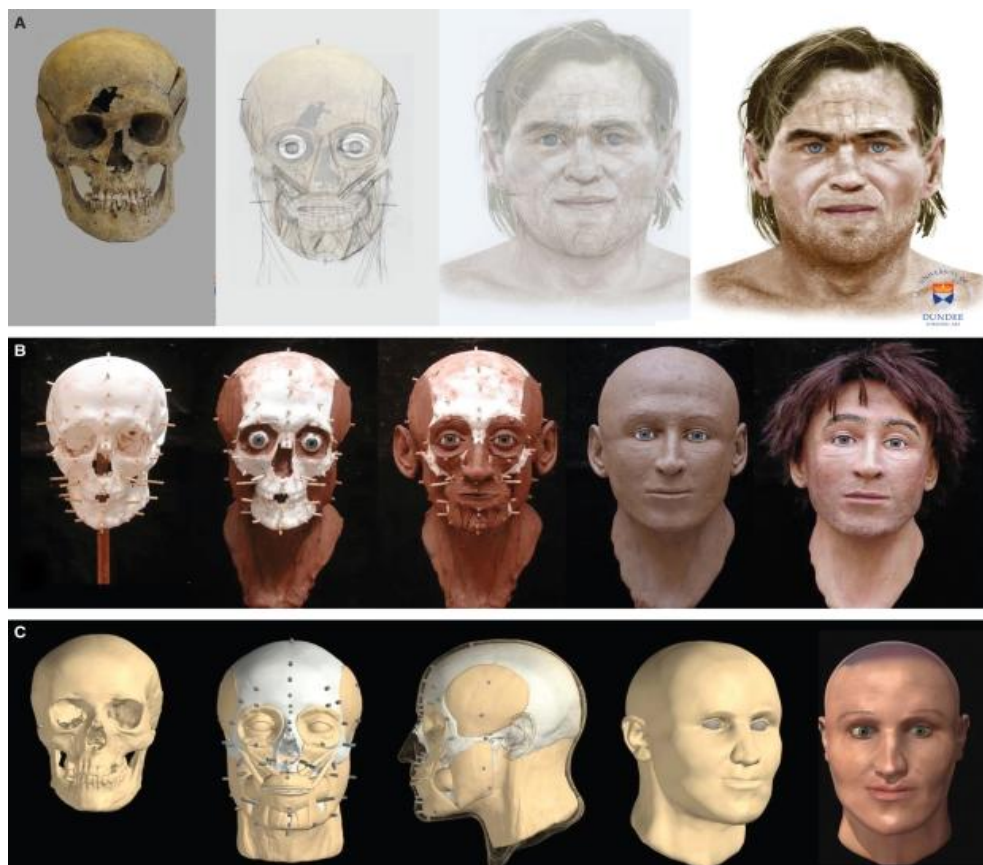
Zakladatelem ruské školy je M. M. Gerasimov (Vanezis a Vanezis 2000, Ullrich a Stephan 2011). Jak ve své práci ukázali Ullrich a Stephan (2011), Gerasimova metoda nespočívá v nanášení svalové tkáně, ale v pokrývání lebky plastickými liniemi, které přímo představují tloušťku měkkých tkání. Tím se tato metoda tedy spíše přesouvá mezi metody využívající průměrné hodnoty měkkých tkání (Ullrich a Stephan 2011). Gerasimova metoda měla téměř 100% úspěšnost a sám Gerasimov vytvořil mnoho predikčních pravidel pro tvorbu obličeje. Problémem této metody je však nedostatečnost publikací, ve kterých by byl postup metody detailně popsán, a změna některých predikcí, které už ale Gerasimov nestihl za svůj život publikovat (Ullrich a Stephan 2011).

Druhou školou je metoda tzv. „manchesterská“ vycházející z práce britských autorů (Wilkinson 2010). Tato metoda více vystihuje obsah anatomické metody, i přesto, že

k vytvoření podoby obličeje využívá i průměrné hodnoty tloušťky měkkých tkání. Proto bývá označována také za kombinovanou metodu. Jejím základem je pečlivá modeláž obličejových svalů, následně překrytá tenkou vrstvou, představující povrch obličeje (Wilkinson 2010).

Oproti Gerasimově metodě je manchesterská metoda detailně popsána, a tak i dnes více využívána. Proces rekonstrukce podle této metody spočívá ve třech krocích – anatomickém modelování, morfologické determinaci a publikování výsledné podoby za účelem rozpoznání osoby (Wilkinson 2010).

Anatomické modelování vychází z předpokladu, že různé obličeje mají podobný počet svalů, ale tvar, velikost a pozice svalů je individuálně variabilní a některé svaly mohou chybět nebo být naopak zdvojeny. Tyto variace se dají z lebky těžce vyčíst, ale dá se podle jejího charakteru a povrchu určit začátek či úpon svalů (Wilkinson 2010, Evans a Copp 1986).



Obr. 3. Ukázka metod kraniofaciální rekonstrukce – 2D metoda (A), 3D manuální metoda (B), metoda rekonstrukce obličeje v počítačovém editoru založená na principu manuálních metod (C) (převzato z Wilkinson 2010).

Morfologická determinace znamená přesné určení velikosti a tvaru obličejových prvků, jakými jsou oko, nos, ústa či ušní boltec. Této problematice bude v práci věnována zvláštní kapitola.

Posledním krokem manchesterské metody kraniofaciální rekonstrukce je doplnění detailů obličeje, které by mohly pomoci k lepšímu rozpoznání obličeje – jedná se hlavně o barvu vlasů, typ účesu, barvu kůže, brýle atd. (Wright a Sladden 2003, Lewis a Johanson 1997).

Americká škola využívá pro tvorbu obličeje pouze tloušťky měkkých tkání na konkrétních místech obličeje (Verzé 2009). Výraznou osobností této školy byl W. M. Krogman, který formuloval základní pravidla rekonstrukce obličeje týkající se postavení a velikosti oční koule, tvaru nosu, postavení a délky ucha a šířky úst. Také standardizoval hlavní oblasti obličeje vedoucí k rozpoznání osoby (Tyrell et al. 1997). Následovníky jeho práce byli B. P. Gatliff a C. Snow, kteří jsou považováni za zakladatele tzv. Americké 3D metody, která využívá data pro průměrnou tloušťku měkkých tkání v daných antropologických bodech, přičemž bere v potaz pohlaví, věk a etnickou příslušnost daného jedince (Snow et al. 1970). O převedení této metody do počítačové podoby se zasloužil především D. Ubelaker (Verzé 2009).

Tloušťka měkkých tkání je určena věkem, pohlavím a etnickou příslušností jedince (Wilkinson 2010). Pro určení tloušťky měkkých tkání existuje dnes mnoho databází, které vznikaly v průběhu 20. st. (např. Wilkinson 2002, Manhein et al. 2000, Lebedinskaya et al. 1993). Z nejnovějších prací jsou to studie na brazilské populaci (de Almeida et al. 2013, Pithon et al. 2014), populaci francouzské (Guyomarc'h et al. 2013), kolumbijské (Ruiz 2013), jihokorejské (Cha 2013) či japonské (Utsuno et al. 2014).

Velmi problematické je ze skeletálního podkladu určit tělesnou stavbu jedince a věkové změny měkké tkáně, neboť tyto jsou individuálně velmi variabilní (Wilkinson 2010). I když jsou obecně známy věkové změny postihující obličej, jako je snížení elasticity kůže, změny v distribuci kolagenního materiálu, ztráta tukové tkáně, úbytek vlasů atd., jejich načasování je velmi individuální a závisí na mnoha faktorech. Jedním z nejdůležitějších faktorů je především životní styl jedince, vystavení slunci, vliv kouření, alkoholu, medikace atd. (Taister et al. 2000). K tomu se přidávají také genetické faktory, typ kůže, tvar obličeje a další (Wilkinson 2010).

2.1.2.2 Počítačové metody rekonstrukce

Při počítačové rekonstrukci obličeje se využívají matematické postupy, pomocí nichž lze docílit vytvoření relativně věrné podoby. Pokrok ve vývoji počítačových softwarů a medicínských zobrazovacích přístrojů přispěl k rozvoji počítačových metod faciální rekonstrukce (Tilotta et al. 2009, Claes et al. 2010). Všechny počítačové metody rekonstrukce obličeje vycházejí z principů tradičních metod. Hlavním předpokladem realizace rekonstrukce je znalost vztahů obličeje a jeho skeletálního podkladu (Claes et al. 2006).

V dnešní době počítačové metody převažují a stále se pracuje na jejich zdokonalování. Ideální počítačový software, sloužící k rekonstrukci podoby, musí být schopen vytvořit obraz lebky pomocí skenovacího zařízení, brát v úvahu věkové, pohlavní a etnické rozdíly jedince a vytvořit na základě dat co nejvěrnější podobu jedince (Clement a Marks 2005).

2.1.2.2.1 Vývoj počítačových metod

Prvním autorem, který převedl 3D metody rekonstrukce obličeje do počítačové podoby byl v roce 1987 J. P. Moss (Quatrehomme et al. 2007). Nový systém využíval laserového skeneru a videokamery k nasnímání lebky. Na tu byly nanášeny hodnoty tloušťky měkkých tkání. Následně byl vybrán z databáze obličejový templát, který byl vhodně deformován na naskenovanou lebku (Wilkinson 2006).

Dalším významným autorem počítačové rekonstrukce obličeje byl P. Vanezis (Vanezis et al. 2000). Jeho systém využíval digitální obraz lebky, převedený do počítače, a obličeje, kterým byla lebka překryta. Obličej byl vybírán z široké databáze skenů podle příslušných antropologických kritérií. Hodnoty tloušťky měkkých tkání byly převzaty z práce Rhina a Moora z roku 1982 (Vanezis et al. 2000). Problematické partie obličeje byly opět doplňovány z policejních identikitových databází (Vanezis a Vanezis 2000). Hlavní výhody spatřoval Vanezis ve snížení vlivu subjektivity autora rekonstrukce na výslednou podobu obličeje a v rychlosti provedení. Nespornou výhodou bylo také uložení rekonstruovaného obrazu (Vanezis et al. 2000).

Tyrell (Tyrell et al. 1997) popsal další metodu, na jejímž základě pracuje Open Inventor software. Ve stejném roce uvedl svou metodu také Quatrehomme (Quatrehomme et al. 1997), který pracuje se systémem referenční a cílové lebky a obličeje. Ty na základě matematických

algoritmů deformuje na sebe. Na tomto principu pracuje dnes většina počítačových programů pro rekonstrukci obličeje.

Hlavní výhody počítačové rekonstrukce vidí autoři (např. Tyrell et al. 1997) v rychlosti provedení, uložení obrazu, opakovatelnosti rekonstrukce atd. Nevýhodou jsou stále nedostatečné databáze pro hodnoty tloušťky měkkých tkání a problematické určení některých partií obličeje ze skeletálního podkladu.

2.1.2.2.2 Postup při rekonstrukci obličeje

I přesto, že existuje mnoho různých přístupů v provedení samotné rekonstrukce, základ všech metod je shodný. Základem každé počítačové rekonstrukce je antropologické hodnocení lebky, resp. určení základních charakteristik jedince jakými jsou dosažený věk, pohlaví či etnická příslušnost (Claes et al. 2010). Následně je nutné získat pomocí 3D zobrazovacích metod digitalizovaný obraz lebky. Po převedení reálného objektu do digitální podoby s ním lze bez problémů dále pracovat.

Dalším krokem rekonstrukce obličeje je matematické vyjádření daného objektu. Popis objektu pomocí čísel je hlavní myšlenkou geometrické morfometrie. Ta pracuje s objekty v podobě datových množin, které popisují přesný tvar a formu objektu. S takto transformovanými objekty lze pak pracovat v matematické rovině a všechny změny je možné pomocí kvalitního počítačového softwaru opět zobrazit do digitální podoby (Marcus et al. 1996).

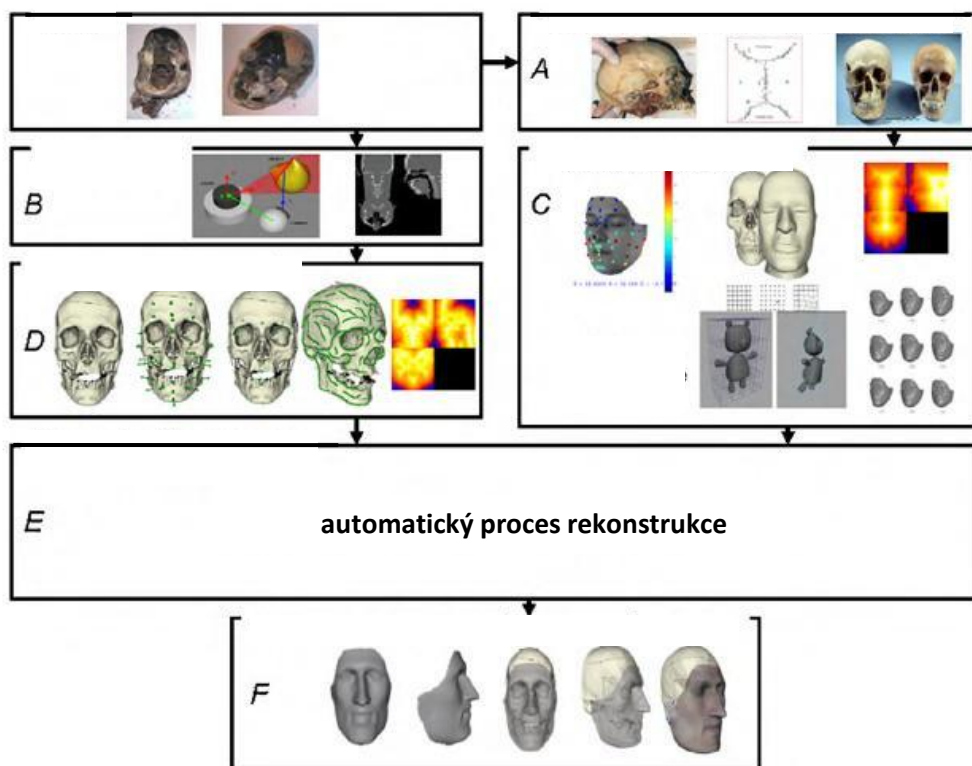
Existuje několik způsobů, jak převést objekt do matematické podoby. Tradiční metody využívají antropometrie, kdy je každý objekt měřen pomocí základních antropometrických nástrojů (antropometr, posuvné či dotykové měřidlo atd.). Tradiční metody nám sice dávají informaci o rozměrech objektu, ale nic nám nevypovídají o jeho tvaru (Clement a Marks 2005). Proto se dnes přistupuje k metodám geometrické morfometrie, které nám pomocí tvarových proměnných nabídnou informace o obojím. Objekty lze vzájemně standardizovat, tj. zarovnávat na sebe bez vlivu rotace, otočení a velikosti, aniž by došlo ke ztrátě jakékoliv tvarové informace, což je velká výhoda geometricko-morfometrických metod (Slice 2007).

Existují dva základní druhy dat, se kterými je možné při analýze obličeje pracovat. Prvním typem dat, která lze mezi sebou vzájemně porovnávat, jsou tzv. landmarky (využity

v pracích např. Tilotta et al. 2009, Berar et al. 2011, de Almeida 2013). Landmarky jsou body, které mají svou přesnou definici. Musí se nacházet na všech objektech a musí být homologní (Rohlf 1990). Existují tři typy landmarků. Landmarky prvního typu se nacházejí na přesně definovaných bodech (nejčastěji to bývá na průsečíku lebečních švů apod.). Landmarky druhého typu jsou externální body (např. největší šířka) a třetím typem jsou body extrémní křivosti (např. bod největší konkavity určitého místa) (Marcus et al. 1996). Kranio-metrické či kefalometrické body, které se při rekonstrukci obličeje využívají, mají svou přesnou definici. Někteří autoři si ale tyto definice upravují, a tak je důležité, aby k jednotlivým landmarkům připojili přesný popis. Odchyly od původních definic představují problém při komparaci metod jednotlivých autorů a jejich výsledků (Stephan a Simpson 2008). Důležité je použít k analýze dostatek landmarků – obecně platí pravidlo, že čím více landmarků použijeme, tím bude výsledek přesnější. Je ale také potřeba, aby metoda zůstávala dostatečně přehledná, co nejvíce spolehlivá a zároveň relativně rychlá. Jednotlivé body by měly mít co největší výpovědní hodnotu vzhledem k cílům, na které je práce zaměřena (Clement a Marks 2005). Landmarky se získávají manuálním zadáváním do digitálního obrazu, takže přesnost metody záleží především na zkušenostech autora rekonstrukce. Každý landmark má své souřadnice v prostoru (Mitteroecker a Gunz 2009).

Druhým typem dat jsou obrisy, které jsou dále rozděleny na body. Tyto body se následně srovnávají mezi sebou. Dělit křivky můžeme pomocí vzdáleností či úhlů. Každá křivka je rozdělena na několik úseků, přičemž dělicí body jsou opět mezi sebou homologní. Postavení každého bodu je vázáno na konkrétní souřadnice v prostoru (Rohlf 1990).

Dalším krokem rekonstrukce je vybrání adekvátního kraniofaciálního modelu (tzv. craniofacial template) (Claes et al. 2010). Jedná se o digitální model lebky a k ní náležejícího obličeje, který vybíráme z databáze nasnímaných lebek (např. pomocí laseru, počítačové tomografie či magnetické rezonance) a který představuje základ celé rekonstrukce. Tento model se volí tak, aby odpovídal zjištěným antropologickým charakteristikám zkoumané lebky. V mnoha studiích se jedná o průměrný vzor pro danou skupinu (Claes et al. 2006, Starbuck a Ward 2007, Tilotta et al. 2010). Někdy se ke třem výše jmenovaným kritériím (věk, pohlaví, etnikum) přidává také BMI, což je komponenta, která může do velké míry rozhodovat o výsledné podobě jedince.



Obr. 4. Obecný postup metod počítačové rekonstrukce obličeje (převzato z Claes et al. 2010).

Nejprve je nalezená lebka podrobena antropologickému určení (A), dále je vytvořen její digitální obraz (B), který je vyjádřen pomocí landmarků či crest lines (D), následuje vybrání adekvátního kraniofaciálního templátu (C). Dalším krokem je transformace templátu na lebku (E) a na závěr dotvoření textury obličeje (F).

V dalším kroku rekonstrukce se nalézají vztahy mezi cílovou lebkou a kraniofaciálním modelem. Tvar modelové lebky je deformován do tvaru lebky cílové a stejná deformace se pak odráží v podobě obličeje (Claes et al. 2010). Z obličeje kraniofaciálního templátu se tak vytvoří obličej hledaného jedince.

Finálním stupněm rekonstrukce je dotvoření textury obličeje, očí, nosu, úst a případně dalších individuálních charakteristik, pokud jsou známy (Claes et al. 2010).

2.1.2.2.3 Druhy počítačových metod

Následující členění počítačových metod na metody založené na morfometrii, morfologii a transformaci vychází z práce Quatrehomme a Subsol (2005).

2.1.2.2.3.1 Rekonstrukce obličeje založená na morfometrii

Rekonstrukce obličeje založená na morfometrii vychází z principu nanášení hodnot tloušťky měkkých tkání na vybrané antropometrické body, které jsou jednak definovány na modelu lebky a jednak na modelu obličeje. Kraniofaciální model je vybírán na základě antropologických kritérií z existující databáze (Vanezis et al. 2000) a je deformován na lebku, čímž vzniká rekonstruovaná podoba.

Jedním z prvních autorů této metody byl již zmíněný profesor P. Vanezis (Vanezis et al. 2000). Základem jeho metody je nejprve určení základních antropologických charakteristik lebky (věk, pohlaví a etnická příslušnost). Dále pak digitalizace lebky a nanášení landmarků na digitalizovaný skeletální podklad. Následuje vybrání obličejového templátu z databáze, nanesení landmarků na tento templát a pomocí počítačových softwarů tvorba rekonstruované podoby (Vanezis et al. 2000).

Objekty jsou do digitalizované podoby přenášeny pomocí laserového skenovacího zařízení Facia Optical Surface Scanner (vytvořený Medical Physics Department of University College London). Data jsou ukládána v podobě LSM formátu (Laser Scan Multiple), který je převeden na systém kartézských souřadnic pomocí počítačového softwaru Facial Reconstruction (Vanezis et al. 2000). Tento software dokáže upravovat vzájemnou pozici landmarků na lebce a obličejí a pomocí definovaných hodnot tloušťky měkkých tkání realizovat výslednou podobu. Hodnoty tloušťky měkkých tkání vycházejí z práce Rhina a Moora a jsou, dle autorů, platné pro euroamerickou populaci (Vanezis et al. 2000). Jednou z výhod softwaru Facial Reconstruction je to, že lze manuálně upravit směr linie mezi korespondujícími landmarky a upřesnit tak orientaci nanášení tloušťky měkké tkáně. Vanezis pracoval konkrétně se 40 landmarky na lebce a stejným počtem na obličejí (Vanezis et al. 2000).

Obličejový templát je vybírán z databáze naskenovaných živých jedinců a to na základě antropologické podobnosti se zkoumanou lebku. Na vybraný obličej jsou naneseny

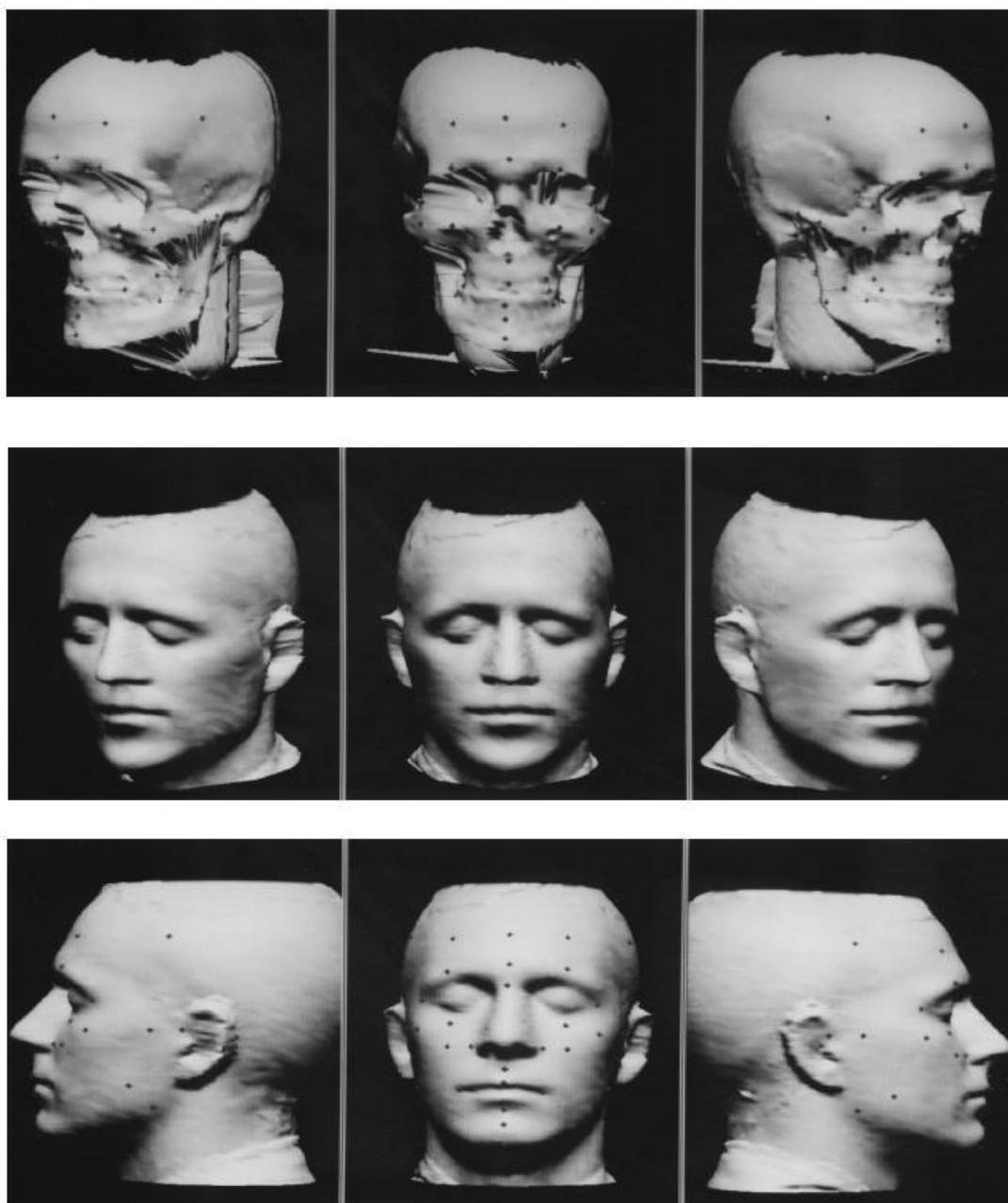
landmarky, jejichž pozice je upravena pomocí trojdimenzionální transformace tak, aby odpovídala co nejvíce bodům na lebce. K tomuto účelu se používá prokrústovská transformace (Goodall 1991). Touto deformací je určena tzv. finální warpa, která je aplikována na každý bod na obličejí a tím je vytvářena rekonstruovaná podoba (Vanezis et al. 2000). Rekonstruovaný obličej je převeden do formátu TIFF nebo JPEG. Obraz je importován do policejní databáze (CD-fit nebo E-fit), ve kterém jsou doplněny problematické obličejové prvky – nos, oči, uši a rty (Vanezis et al. 2000).

Landmarkové metody jsou využity i v práci P. Claese (Claes et al. 2006), která byla uskutečněna na 118 jedincích euroamerické populace, z toho bylo 48 žen a 70 mužů ve věku mezi 18 a 55 lety. Na každém jedinci bylo definováno 52 obličejových landmarků a na těchto bodech byly měřeny ultrazvukem tloušťky měkkých tkání. Z databáze byl vytvořen statistický model – průměrný obličejový templát získaný pomocí analýzy hlavních komponent (PCA). Každý obličej v databázi tak lze vyjádřit kombinací těchto hlavních komponent (Claes et al. 2006).

Prvním krokem rekonstrukce Claesovy metody je digitalizace cílové lebky pomocí CT skenování. Podle specifických vlastností této lebky je celá databáze nasnímaných lebek normalizována a dochází k deformaci obličejů. Na základě takto normalizované databáze vzniká nový statistický model, tj. model průměrného obličeje a lebky vytvořený na základě metody PCA. Tento model je zpětně deformován na cílovou lebku pomocí metody TPS. Stejná deformace je také využita na modelový obličej, čímž vzniká rekonstruovaná podoba (Claes et al. 2006).

2.1.2.2.3.2 Rekonstrukce obličeje založená na morfologii

Princip metody spočívá v modelaci svalů a tukové tkáně na skeletální podklad. Tyto vrstvy jsou následně překryty tenkou vrstvou, představující kůži (Quatrehomme a Subsol 2005). K modelaci obličejových prvků se používají algoritmy, které popsali Wilhelms a Van Gelder (1997). Morfologické metody v sobě spojují automatizaci počítačové rekonstrukce a zároveň tradiční postupy (Quatrehomme a Subsol 2005).



Obr. 5. Digitalizovaná lebka a na ní nanesené landmarky (nahore), obličejový templát s korespondující landmarky (uprostřed) a výsledná podoba (dole) (převzato z Vanezis et al. 2000).

V roce 2002 byl vytvořen nový program 3ds max (Discreet, 2002) pro počítačové modelování a animaci (Davy et al. 2005). Ten přispěl k tvorbě nové metody kraniofaciální rekonstrukce. Model lebky je naskenován laserovým skenerem a povrch modelu je převeden

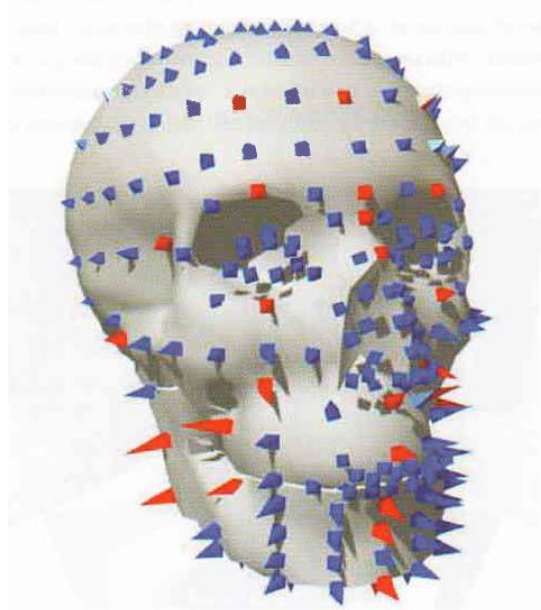
na editovatelné polygony. Povrch je následně vyhlazen. Na takto připravený objekt jsou v místě obvyklých landmarků naneseny malé pyramidy, které představují základ rekonstrukce. Výška pyramid je dána tloušťkou měkké tkáně. V místech, kde tloušťky měkkých tkání chybí, jsou přidány barevně odlišené pyramidy, které jsou matematicky dopočítány (Davy et al. 2005).

Pro dopočítání prostoru mezi landmarky se používají různé matematické metody (např. Attardi et al. 2000), ale rozdíly mezi nimi nejsou tak velké, aby výrazně ovlivnily rekonstruovanou podobu obličeje (Davy et al. 2005).

Ve svém počátku byla tato metoda rekonstrukce velmi časově náročná. To se ale v průběhu doby změnilo, protože nastavení pyramid je uloženo v programu nezávisle na lebce. Data jsou stanovena pro každou etnickou skupinu a pohlaví (Davy et al. 2005).

Zásadním problémem metody bylo, jak spojit jednotlivé markery tak, aby výsledný obraz byl co nejvěrnější. Z tohoto důvodu byla vytvořena metoda, jejímž základem je aplikace křivek NURBS (Nonuniform rational B-splines) CV (control-vertex curves). Každá část křivky je průměrnou linií mezi třemi kontrolními body. Povrchy vytvořené pomocí NURBS CV jsou obecně hladší a jejich výhodou je, že práce s nimi je poměrně rychlá. Pomocí těchto křivek se vytváří model obličejových svalů, které pokrývají lebku. Svalový model je překryt pomocí většího množství CV křivek a vytváří se tak kompletní povrch obličeje. Textura a barva dodá obličejí reálného vzhledu. Obličejová textura je obecně považována za jednu z největších výhod této metody (Davy et al. 2005).

Oči byly umístěny na obličej podle metody Stephana (Stephan 2002). V programu 3ds max byla dotvořena textura a barva zornice i duhovky. Tvorba nosu je založena na studii Macha z roku 1986 (Davy et al. 2005).



Obr. 6. Nanášení pyramid zobrazujících tloušťky měkkých tkání na digitální obraz lebky. Červené pyramidy jsou obvyklé landmarky definované literaturou, modré pyramidy představují matematicky dopočítané body (převzato z Clement a Marks 2005).

2.1.2.2.3.3 Rekonstrukce podoby založená na transformaci

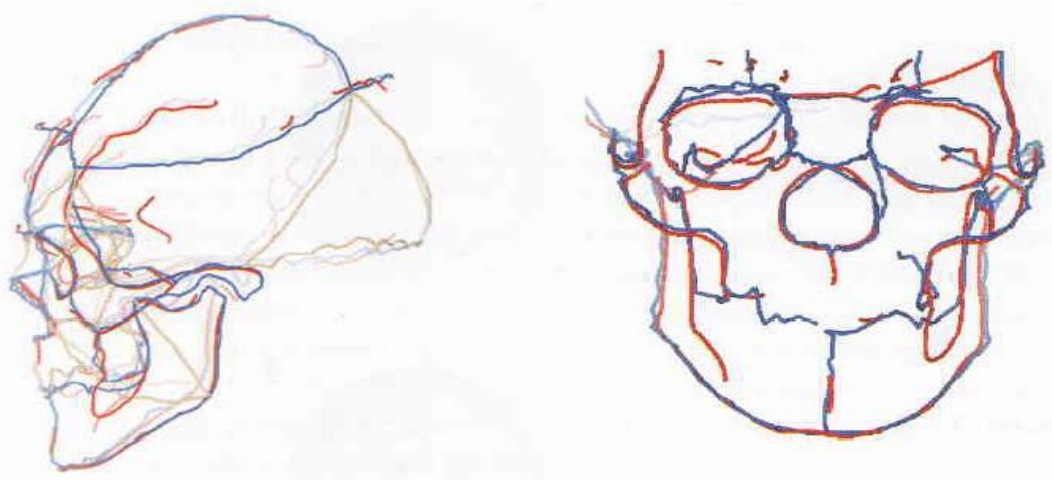
Metody založené na transformaci nebo také přizpůsobení (či tzv. flesh deformation) pracují s tvorbou referenčního modelu hlavy, obsahujícího jak lebku, tak obličej, který byl získán pomocí metod počítačové tomografie (Shaham et al. 2000) nebo skenováním pomocí laseru (Tyrrell et al. 1997). Data získaná pomocí počítačové tomografie mají velké výhody. CT skenování vytváří řezy objektem, které lze v příslušném počítačovém programu opět složit do jediného 3D objektu. Na digitálním objektu lze postupovat jednotlivými vrstvami a je možné pracovat zvláště s povrchem obličeje a povrchem lebky. Velkou nevýhodou této zobrazovací metody je vystavení jedince vysoké dávce radiace, a tak se na živých jedincích spíše využívá metody magnetické rezonance (Nelson a Michael 1998).

Prvním krokem rekonstrukce je vybrání referenční hlavy (tedy lebky společně s obličejem), která musí být co nejvíce podobná cílové lebce z hlediska pohlaví, věku a kraniální formy (Nelson a Michael 1998). Tento referenční model je vybírán tak, aby spolu body na cílové lebce a referenční lebce co nejvíce korespondovaly (tzv. control points). Referenční lebka je pak srovnávána s cílovou lebkou na základě několika bodů, které jsou

vybrány na obou objektech, a je vytvořena 3D deformace. Tato deformace se pak aplikuje stejným způsobem na referenční obličej za účelem vytvoření rekonstruované podoby (Quatrehomme a Subsol 2005). Na konci 20. století bylo vytvořeno několik registračních algoritmů, které umožňují kvalitní rekonstrukci obličeje (např. Lorensen a Cline 1987, Quatrehomme et al. 1997).

Někteří autoři převádí povrch obličeje a lebky na trojúhelníkové sítě (tzv. mesh), které mezi sebou vzájemně srovnávají, resp. srovnávají souřadnice vrcholů jednotlivých trojúhelníků (např. Berar et al. 2011, Tilotta et al. 2009). Opět se referenční lebka deformuje na lebku cílovou a stejná deformace je převedena na povrch obličeje.

Jedním z autorů, kteří pracovali s transformačními metodami, byl Quatrehomme (Quatrehomme et al. 1997). Jeho metoda je založena na snímcích získaných pomocí počítačové tomografie. Pracuje s databází modelů, které jsou rozděleny podle pohlaví, věku, etnika a tělesné konstituce jedince. Na referenční a cílové lebce jsou definovány specifické body a linie, tzv. crest lines, neboli linie kopírující hlavní zakřivení lebky v místech jejího největšího vyklenutí (orbity, obvod mandibuly, jařmové oblouky apod.) (Thirion a Gourdon 1996). Crest lines úzce korespondují s tzv. „ridge lines“, které souvisí s landmarky druhého typu (Quatrehomme a Subsol 2005). Pro srovnání jednotlivých linií byly vyvinuty matematické algoritmy, které najdou vztahy mezi oběma lebkami automaticky. Např. algoritmus v práci Subsola (Subsol et al. 1998) hledá vztahy mezi nejbližely položenými body první sady linií a body ve druhé sadě. Při počítačovém zpracování je možné najít až 1500 korespondujících bodů během několika minut.



Obr. 7. Srovnání crest lines (červeně) a ridge lines (modře) (převzato z Marks a Clement 2005).

Dalším krokem rekonstrukce je normalizace obou lebek za použití metod geometrické morfometrie, tj. sjednocení do stejné pozice, orientace a velikosti (Slice 2007). Hlavním principem celé metody je transformace linií referenční lebky na lebku cílovou a převedení této transformace na faciální model, čímž z referenčního obličejce získáme co nejvěrnější rekonstruovanou podobu (Quatrehomme et al. 1997). Zásadním momentem celého procesu je nalezení adekvátního referenčního modelu, který poslouží jako vhodný vzor pro vytvoření podoby neznámého jedince (Quatrehomme et al. 1997). Limitujícím faktorem metody jsou nedostatečně velké databáze referenčních snímků. Jejich rozšíření je v současné době jedním z hlavních témat metod kraniofaciální rekonstrukce. Východiskem může být použití virtuálního modelu, který je vytvořen na základě naměřených antropometrických hodnot (DeCarlos et al. 1998). V takovém případě je nejlepší vytvoření průměrného modelu z nasnímaných hlav v databázi, který nám poslouží jako referenční vzor. Žádný další jedinec sice nebude naprosto stejný, ale všichni jedinci se k tomuto průměrnému modelu budou více přibližovat. Tuto variantu zvolili např. Blanz a Vetter (1999) ve své studii.

Podobným způsobem jako Quatrehomme postupoval i Jones (2001), který používal taktéž metodu počítačové tomografie ke skenování jedinců. Metoda je založena na principu korespondujících bodů na referenční i cílové lebce a využívá hodnoty tloušťky měkkých tkání na daných bodech. Také pracuje s matematickým dopočítáním pomocných bodů mezi landmarky. K transformaci je využito matematického algoritmu (Jones 2001). Stejný postup využil ve své práci také např. Tu et al. (2007).

2.1.3 Přínos počítačových metod

Vývoj počítačových systémů přispěl k tomu, že už metoda rekonstrukce obličejce nečelí takové kritice jako v případě manuálních metod. Naopak dnes sledujeme trend, který hodnotí počítačové metody jako efektivní, rychlé, objektivní, přesné atd. Bezpochyby mají pokročilé počítačové softwary a zobrazovací metody mnoho výhod, neznamená to ale, že by nebyly zatížené určitými problémy. Zprvce nelze říci, že by počítačové systémy pracovaly rychleji a šetřily by tak čas oproti manuálním metodám (Wilkinson 2005). Např. přidání barvy či textury do výsledné rekonstrukce je velmi časově náročné. O efektivnosti metody a úspoře času můžeme mluvit jen v případě 2D počítačových rekonstrukcí (Wilkinson 2005).

Také subjektivita autora se při rekonstrukci stále uplatňuje a to především při výběru průměrného obličej z databáze či některých obličejových struktur. Také neexistuje žádné tvrzení, které by dokazovalo, že počítačové metody jsou přesnější či vedou častěji k identifikaci než metody tradiční (Wilkinson 2005).

Opravdovými výhodami počítačových metod je domodelování chybějících fragmentů lebky, práce s digitalizovaným modelem, snadné uchování výsledné rekonstrukce či více realistická podoba jedince (Clement a Marks 2005).

2.1.4 Vybrané problémy spojené s rekonstrukcí obličej

2.1.4.1 Vztah mezi lebkou a obličejem

Již od začátku 20. století čelí metoda kraniofaciální rekonstrukce rozsáhlé kritice (Wilkinson 2005). Je vyzdvižováno několik zásadních nedostatků, se kterými je tato metoda spojena. Jedním z hlavních problémů je, podle některých autorů, skutečnost, že z lebky nelze predikovat podobu obličej, což naráží na samotnou podstatu rekonstrukce (Stephan 2003). Měkké tkáně nejsou přímo vázány na skeletální podklad, a tak je jejich predikce problematická či dokonce nemožná. Je sice známa anatomie svalů obličej, ale některé nemají na skeletálním podkladě svůj začátek či úpon, případně obojí. Také pro obličejové prvky, jakými jsou nos, ústa či oči, máme pouze několik publikovaných pravidel pro predikci jejich velikosti a tvaru, ale přesnost některých z nich nebyla prakticky nikdy testovaná (Stephan 2003).

2.1.4.2 Úspěšnost metody

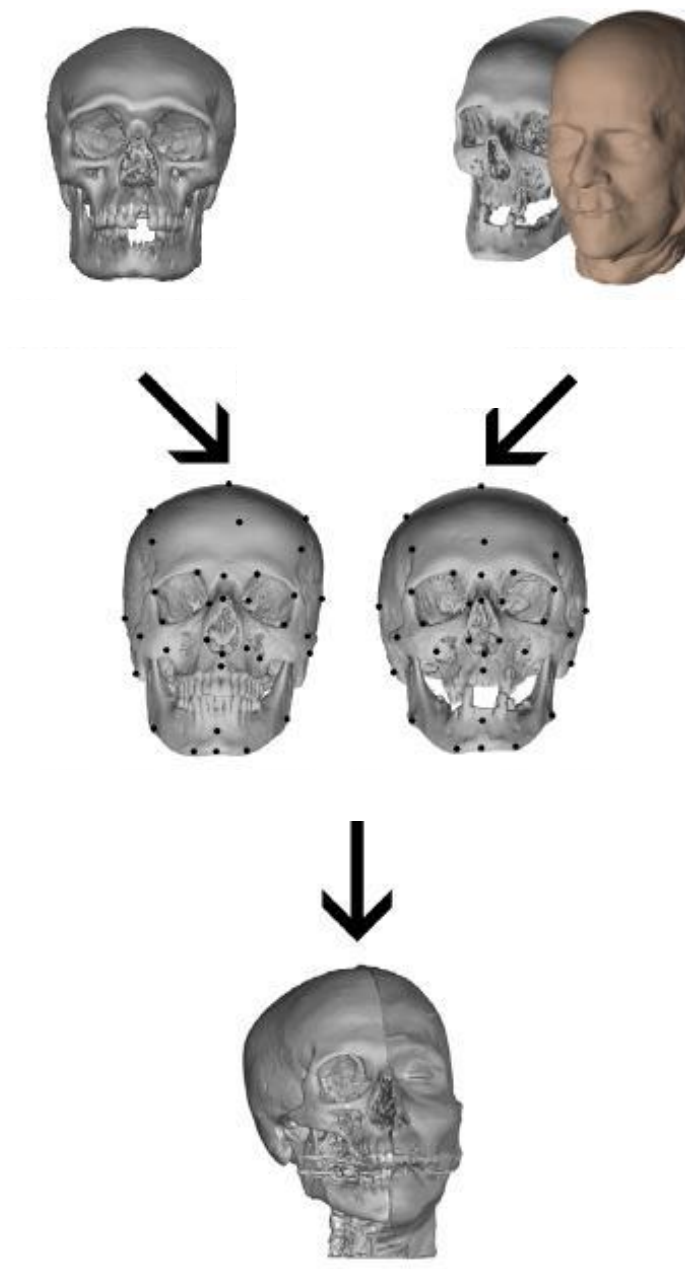
Dalším kontroverzním tématem je úspěšnost metody ve forenzní praxi. Kraniofaciální rekonstrukce jistě vedla v mnoha případech k identifikaci těla (např. Phillips et al. 1996, Stoney a Koelmeyer 1999). Gerasimov udává úspěšnost metody dokonce na 100%, Bender na 85%, Wilkinson na 75%, Gatliff na 70% a Neave pouze na 50-60% (Stephan 2003). Nikde se ale neudává v kolika případech kraniofaciální rekonstrukce neuspěla. Takové zprávy zůstávají často nepublikovány, a tak i úspěšnost metody je zatím neznámá.

O testování úspěšnosti kraniofaciální rekonstrukce se pokusil Quatrehomme, který rekonstruoval 25 obličejů na základě lebky (Quatrehomme et al. 2007). Vytvořil 3 rozdílné skupiny odborníků, které přistupovaly k analýze odlišným způsobem. První skupina prováděla pouze experimentální 3D manuální rekonstrukci, druhá skupina podrobila lebky antropologické analýze a kefalometrickému měření, třetí skupina prováděla komplexní antropologickou a odontologickou analýzu včetně kefalometrické analýzy rtg snímků. Úspěšnost metody narůstala od 0% (první skupina) ke 27% (druhá skupina), resp. k 75% (třetí skupina). Bylo tak prokázáno, že samotné rekonstrukci by měla předcházet komplexní analýza lebky. Sám Quatrehomme (Quatrehomme et al. 2007) ale upozornil na fakt, že při identifikaci nezáleží tolik na přesnosti výsledné podoby, ale úspěšná může být i méně zdařilá podoba, neboť i ta může vést k rychlému rozpoznání jedince či zúžení okruhu hledaných osob.

2.1.4.3 Využití rozdílného materiálu a metod při získávání dat

Dalším problémem rekonstrukce obličeje je skutečnost, že je metoda založena na aplikaci průměrných hodnot měkkých tkání v konkrétních antropologických bodech (Vanezis a Vanezis 2000). Zde se setkáváme s další kritikou, protože nelze srovnávat naměřené hodnoty tloušťky měkkých tkání na mrtvých a živých jedincích (Vanezis a Vanezis 2000). Také hodnoty měřené na živých jedincích se v mnohém liší podle toho, jakým způsobem byly získány (Stephan a Simpson 2008). V pracích se nejčastěji setkáme s manuální invazivní metodou, využívající jehly (de Almeida et al. 2013), dále pak rentgenovou metodou uplatňovanou na živých i neživých jedincích (Smith a Throckmorton 2006), ultrazvukem (De Greef et al. 2006), magnetickou rezonancí a počítačovou tomografií (Kim et al. 2005, Sakuma et al. 2010, Hwang et al. 2012, Lee et al. 2012). Při vzájemném porovnání výsledků lze nalézt mezi metodami zásadní rozdíly (Stephan a Simpson 2008). Rentgenové metody na živých lidech produkují vyšší hodnoty u bodů, které se nacházejí v mediální rovině. Nižší hodnoty pak najdeme pouze u bilaterálních bodů gonion a zygion. Rentgeny mrtvých osob vykazují druhé nejvyšší naměřené hodnoty. U ultrazvuku najdeme výrazně vyšší hodnoty u bodu supra-M2, a to u mužů i u žen. Metody používající ultrazvuk a manuální metoda mají vzájemně srovnatelné naměřené hodnoty. Ultrazvuk má lehce vyšší hodnoty kromě bodu supra-M2, také u infra-M2 a gonion. Naopak jehličková metoda má vyšší hodnoty u bodu zygion. Metody využívající počítačovou tomografii mají obecně všechny naměřené hodnoty

nižší než metody ostatní. Toto tvrzení ovšem Stephan a Simpson (2008) zakládají pouze na jedné studii, takže se nedá tento závěr považovat za spolehlivý. Hodnoty získané pomocí magnetické rezonance jsou také nižší, ale pouze u landmarků nacházejících se v mediální rovině. U bilaterálních bodů naopak vykazuje vyšší hodnoty u žen (Stephan a Simpson 2008).



Obr. 8. Proces rekonstrukce obličeje podle Jonese (2001). Nahoře je nalezená lebka a referenční lebka a obličej, dále je znázorněn proces transformace korespondujících landmarků, dole pak je stejná transformace využita na rekonstruovanou podobu obličeje.

2.1.4.4 Názvosloví landmarků

Složitě je také srovnání jednotlivých studií, protože názvosloví landmarků není standardizované (Stephan a Simpson 2008). Některé antropometrické body se mohou vyskytovat v pracích pod různými názvy. Na druhou stranu může docházet k tomu, že body, které jsou v pracích vedeny pod stejným názvem, mohou být měřeny na různých místech (Stephan a Simpson 2008) (např. bod orbitale může být měřen v nejnižším bodě dolního okraje očníce nebo jako bod na dolním okraji ve střední sagitální rovině očníce (Manhein et al. 2000)).

2.2 Vztah kosterního podkladu a měkkých tkání obličeje

Měkké a tvrdé tkáně jsou ve vzájemném těsném vztahu. Znalost tloušťky měkkých tkání se, kromě účelů identifikace ve forenzní praxi (např. Leopold et al. 1993), uplatňuje také např. v embryologii či estetické medicíně (Simpson a Henneberg 2002).

Tvar a povrchový profil kosterního materiálu je výchozím prvkem pro faciální rekonstrukci. Podoba obličeje je na skeletální podklad modelována na základě znalostí průměrné tloušťky měkkých tkání v antropometrických bodech (Farrar 1977). Také je při tvorbě podoby nezbytná znalost vzájemných vztahů mezi velikostí a tvarem jednotlivých prvků obličeje (očí, nosu, rtů atd.) a velikostí a tvarem přiléhající kosti.

Tloušťka měkké tkáně se v daném antropometrickém bodě obličeje pohybuje v určitém rozmezí. Její konkrétní hodnota je závislá na věku, pohlaví, etnické příslušnosti a také tělesné konstituci jedince. Prvním krokem rekonstrukce obličeje je tedy nejprve správně identifikovat jedince ve vztahu k pohlaví, věku a etnicitě. Poté je možné vybrat průměrné hodnoty tloušťky měkkých tkání pro danou antropologickou skupinu (Starbuck a Ward 2007, Manhein et al. 2000).

Získání dat se provádí buď za použití invazivních metod nebo, v dnešní době více využívaných, neinvazivních metod, kdy lze zjišťovat tloušťky měkkých tkání i na živých jedincích (např. ultrazvuk, magnetická rezonance či počítačová tomografie). Využití jiných způsobů sběru dat vede k tomu, že mezi jednotlivými studiemi vznikají rozdíly v naměřených hodnotách. Častým problémem je také odlišné názvosloví landmarků (Stephan a Simpson 2008).

Tloušťka měkké tkáně je definována jako vzdálenost měřená od daného kefalometrického bodu k jeho korespondujícímu kranio-metrickému bodu (Stephan a Simpson 2008). Měření je prováděno převážně kolmo ke kosti. Toto neplatí u bodů, které mají přesně definované místo na měkkém profilu (např. glabella, subspinale atd.).

2.2.1 Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k pohlaví

Obecně uznávaným předpokladem je, že muži mají vyšší naměřené hodnoty tloušťky měkkých tkání než ženy téměř na všech landmarcích (Simpson a Henneberg 2002). Jedinou partií obličeje, v níž ženy převyšují v naměřených hodnotách muže, je oblast tváří (De Greef et al. 2009, Stephan a Simpson 2008). Největší rozdíly lze sledovat u bodů suborbitale, inferior malar a supra-M2 (De Greef et al. 2009). Podle De Greefovy studie (2009) mají muži naopak vyšší hodnoty hlavně v oblasti očí a úst. V práci Simpsona a Henneberga (2002) byly zjištěny signifikantní rozdíly v naměřených hodnotách ve vztahu k pohlaví u bodů metopion, nasion, subnasale, subspinale, labrale inferius a mid-ramus. Signifikantní rozdíly ve vztahu k pohlaví našel také Manhein et al. (2000) a to na všech měřených landmarcích. I přes prokázanou pohlavní diferenci, nalezneme větší rozdíly v rámci jednoho pohlaví než mezi muži a ženami (De Greef et al. 2009, Stephan et al. 2005). Stephan et al. (2005) ve své studii uvádí, že v tloušťkách měkkých tkání obličeje nejsou mezi muži a ženami prakticky žádné rozdíly. V průměrných hodnotách se jedná o rozdíl menší než 2 mm, takže navzdory statistické významnosti to v praxi nehraje důležitou roli (Stephan et al. 2005).

2.2.2 Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k věku

Co se týká věkových změn obličeje, ovlivňují je především zevní vlivy, jakými jsou solární radiace, kouření, užívání drog či psychický stres (O'Hare et al. 1999, Taister et al. 2000). Vystavení různým klimatickým vlivům, stresu a užívání drog má vliv především na barvu a texturu pokožky (Albert et al. 2007). Kouření pak převážně na tvorbu vrásek (O'Hare et al. 1999).

Podoba obličeje je ovlivněna změnami kosterní struktury, změnami v muskulatuře, ale i např. vývojem obličejové exprese (Albert et al. 2007). Na změny obličeje má vliv také ztráta elasticity a celkového objemu měkkých tkání obličeje. Rychlost změn je ovlivněna i výživou

jedince – jedinci s vyšším BMI mají tendenci k pomalejšímu stárnutí obličeje. Obecně také muži mají tendenci k pomalejšímu stárnutí obličeje než ženy (Albert et al. 2007).

Věkové změny jsou individuálně velmi variabilní, a tudíž těžce predikovatelné. Nejméně věkových změn je evidováno mezi 20-30 lety, naopak důležité změny na obličeje nalezneme mezi 40-50 lety. Věk okolo 50 let je spojen s typickými změnami na obličeji a krku a to u obou pohlaví (Doual et al. 1997). Větší změny probíhají u žen, což je dááno do souvislosti s menopauzou.

Wilkinson (2004) uvádí, že tloušťky tkání v oblasti úst se s věkem zmenšují, naopak hodnoty v oblasti brady a obočí s věkem rostou. Přiklání se také k názoru, že tloušťky měkkých tkání v oblasti obličeje z hlediska věku jsou velmi těžce predikovatelné a individuálně variabilní.

2.2.3 Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k etnické příslušnosti

Pokud se podíváme na vztah rasové příslušnosti a schopností rozpoznávat lidské obličeje, je prokázáno, že lidé lépe poznávají jedince ze své etnické skupiny (Starbuck a Ward 2007). Ve studii Manheina et al. (2000) byly zjištěny signifikantní rozdíly v tloušťkách tkání ve vztahu k etnicitě a to na všech měřených landmarcích. Muži černošské populace mají oproti mužům bělošské populace vyšší hodnoty na všech měřených landmarcích kromě bodu glabella. Naopak ženy bělošské populace dominují kromě bodu glabella také v hodnotách na bodu rhinion, mid-mandibular border a gonion.

Srovnání průměrných hodnot tloušťky měkkých tkání na bodech nasion, supramentale, pogonion, menton, zygion a gonion provedli Stephan a Simpson (2008). Porovnali výsledky tří studií pro euroamerickou populaci (De Greef et al. 2009, Helmer 1984 (Stephan a Simpson 2008), Simpson a Henneberg 2002) s hodnotami pro černošskou americkou populaci, americké indiány a populaci japonskou. V bodě nasion vykazuje vyšší hodnoty euroamerická populace a populace japonská. Japonci také mají vyšší hodnoty v bodě supramentale a druhé nejvyšší hodnoty v bodě pogonion. V tomto bodě dominuje euroamerická populace, ale pouze u výsledků z práce Helmera (Stephan a Simpson 2008). Tato práce také vykazuje nejvyšší hodnoty pro euroamerickou populaci v bodě gnathion. Naopak v bodech zygion a gonion dominuje euroamerická populace ve studii Simpsona a Henneberga (2002). Tři zmíněné studie zaměřené na euroamerickou populaci se ale velmi významně liší a to i v řádu několika

milimetrů na konkrétním landmarku. Srovnání těchto čtyř etnických skupin nevykazuje významné rozdíly, větší diferenci můžeme nalézt spíše mezi studii zaměřenými na stejnou populaci, což by mohlo být zapříčiněno využitím různých technik sběru dat (De Greef a Helmer využívali ve své studii ultrazvuk a Simpson a Henneberg jehličkovou metodu).

2.2.4 Hodnoty měkkých tkání ve vztahu k BMI

Posledním znakem, který výrazně ovlivňuje výslednou podobu obličeje, je tělesná stavba. BMI způsobuje více interindividuálních rozdílů než pohlaví či věk (De Greef et al. 2009). Oblast horního rtu a oblast nosu je nezávislá na BMI. Konkrétně na landmarcích labrale superius, lateral nasal, alare, subspinale, supra canine není ve vztahu k BMI žádná závislost. Signifikantní rozdíly nalezneme na bodech rhinion a nasio-labial ridge. V praxi ale tyto rozdíly nejsou nijak významné. Nejvíce ovlivněné hodnotou BMI jsou body gonion, mid-mandibular border, infra M2 a supra M2 (De Greef et al. 2009).

Se zvyšujícím BMI se hodnoty tloušťky měkkých tkání zvyšují u všech landmarků kromě bodů mid philtrum (subspinale) a labrale superius, kde hodnoty naopak klesají. U žen se k těmto bodům přidává ještě rhinion, kde hodnoty pro BMI pod 20 a mezi 20-25 jsou stejné, a labrale inferius, kde jsou hodnoty stejné pro BMI 20-25 a nad 25 (De Greef et al. 2009).

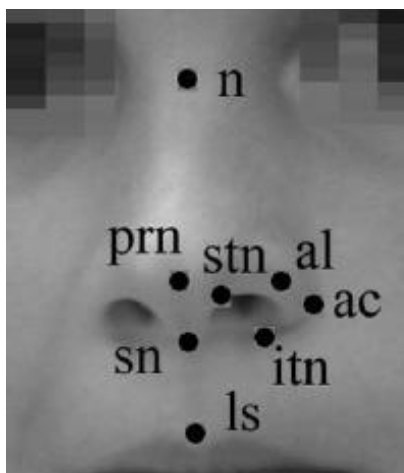
2.3 Predikce jednotlivých částí obličeje ze skeletálního podkladu

2.3.1 Tvar a velikost nosu

Zřejmě nejrozsáhlejší studii týkající se obtížně predikovatelných oblastí obličeje, vytvořil Sforza et al. (2010). Věnoval se oblasti nosu, očí, úst a uší. Studie byla provedena na euroamerické populaci, konkrétně populaci italské. Jednalo se o průřezovou studii zahrnující zdravé jedince ve věku mezi 4 až 73 lety. Skupina byla rozdělena na několik podskupin podle věku (do 18 let členili skupinu po dvou letech, po 18. roce po deseti i více letech) a zjišťoval se tvar a velikost konkrétní obličejové struktury ve vztahu k věku a pohlaví. Pozornost byla věnována 50 vybraným landmarkům a na jejich základě byly zjišťovány objemy jednotlivých prvků, jejich plocha, vzdálenosti mezi body, úhly apod. I když tato studie má určité limity (především to, že se nejedná o longitudinální výzkum, či malé množství jedinců v první a

poslední věkové skupině), jedná se bezpochyby o nejucelenější práci věnovanou právě této problematice. Do studie bylo zařazeno celkem 531 mužů a 357 žen (Sforza et al. 2010).

V oblasti nosu bylo vybráno několik landmarků. Ve střední linii se jedná o nasion (n), pronasale (prn), subnasale (sn), labrale superius (ls). Mezi párové body pak patří alare (al), nejvíce laterální bod na nosních křídlech (nasal alar crest, ac), bod na spodním okraji nosních otvorů (inferior point of the nostril axis, itn) a superiorní bod na úhlu nosních otvorů (superior point of the nostril axis, stn). Na základě těchto bodů zkoumali objem nosu, plochu nosu, indexy ($\text{prn} - \text{sn} / \text{n} - \text{sn} \times 100$, $\text{al} - \text{al} / \text{n} - \text{sn} \times 100$), úhly a vzdálenosti (šířka nosu, šířka báze nosu, délka nosu, délka filtra, nosní protruze atd.). Na základě svých měření dospěli k několika závěrům. Především zjistili, že plocha a objem nosu a všechny lineární vzdálenosti jsou u mužů vždy větší než u žen. Naopak nenalezli pohlavní rozdíly v úhlech či protruzi nosu. U některých rozměrů zjistili, že jsou u mužů větší až v pozdějším věku (výraznější rozdíly se objevují kolem 18 let věku), kdežto při narození a prvních měsících po narození nevidujeme žádné významné rozdíly. Věkové ovlivnění našli u objemu, plochy a lineárních rozměrů nosu, které se s věkem zvyšují, zatímco úhel nosního hrotu n-prn-sn (nasal tip angle) se snižuje. Věk naopak nemá vliv na indexy a ostatní nosní úhly (Sforza et al. 2010).



Obr. 9. Umístění landmarků v oblasti nosu (Sforza et al. 2010)

Rekonstrukce nosu je pouze na základě skeletálního podkladu velmi problematická (Wilkinson 2010). Kromě toho tvar a velikost nosu, oproti jiným obličejovým prvkům, má v rozpoznání obličeje pouze zanedbatelný význam (Rynn a Wilkinson 2006). Obecně se předpokládá, že tvar a velikost nosu má úzký vztah k tvaru apertura piriformis a kostem, které ji tvoří. Šířka nosu je dávana do souvislosti s největší šířkou apertura piriformis (Wilkinson

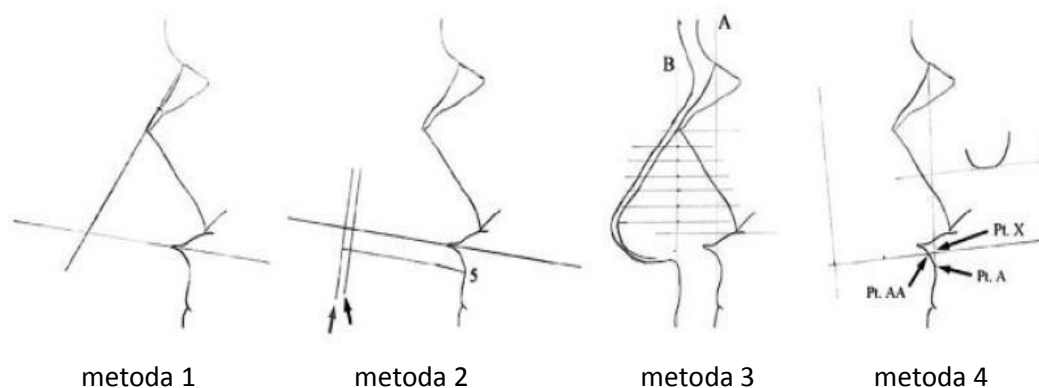
2010). Někteří autoři uvádějí, že šíře nosu je o 10 mm větší než šířka apertury (Starbuck a Ward 2007) nebo že se šířka apertury rovná 3/5 šířky nosu (Rynn et al. 2010).

Protruze nosu je predikována na základě několika metod. Čtyři nejznámější a v běžné praxi nejvíce využívané podrobil kritice Stephan et al. (2003) ve své práci. První metoda byla navržena Gerasimovem v roce 1971 a vycházela z předpokladu, že pokud je spuštěna tangenta od nosních kostí a druhá podél spina nasalis anterior, jejich průsečík odpovídá protruzi nosu. Druhou metodu definoval Krogman v roce 1962. Vycházela z tvrzení, že konec hrotu nosu odpovídá trojnásobné délce spina nasalis anterior (měřeno od spojení maxilly a vomeru ke hrotu spina nasalis anterior). Obě metody na základě své studie určil Stephan jako velmi nepřesné. Oproti tomu shledává následující dvě metody jako velmi zdařilé. První z nich byla popsána v práci Prokopce a Ubelakera (2002). Základem metody bylo propojení bodů nasion a prosthion. K této spojovací linii byla přidána paralelní linie vycházející z bodu rhinion. Od této linie se vedlo 5 kolmic. Vždy byla na každé kolmici změřena vzdálenost od linie z bodu rhinion k okraji apertura piriformis a tato vzdálenost pak byla použita i k prodloužení kolmic na vnější stranu linie (Prokopec a Ubelaker 2002). Po propojení naměřených vzdáleností vzniká obrys nosu. Tato metoda se ukázala jako velice přesná. Poslední metodou, a dle Stephana et al. (2003) nejspolehlivější, je metoda George z roku 1987. Principem je měření vzdálenosti mezi body nasion a bodem X, který leží na průsečíku spojnice bodů nasion a bodu A v místě největší konkavity těla maxilly (odpovídá bodu subspinale) a horizontální linie procházející bodem AA (polovina vzdálenosti mezi hrotem spina nasalis anterior a bodem subspinale). Na tuto linii je vynesena z bodu A vzdálenost odpovídající určitému procentu vzdálenosti mezi body nasion a bodem X (60,5% pro muže, 56% pro ženy). Tato hodnota odpovídá protruzi nosu (George 1987).

Stejně studie, včetně práce Stephana et al. (2003), analyzovali také Rynn a Wilkinson (2006) ve své práci. Ti shledávají Gerasimovu práci pro predikci nosu jako velmi vhodnou. Zatímco Stephan et al. (2003) uvádí, že projekce nosu je nadhodnocena touto metodou o 6,3 mm u mužů a 4,3 mm u žen, Rynn a Wilkinson (2006) uvádí, že rozdíl je maximálně 1 mm. Zdůvodňují to variabilitou vzorku, odlišným umístěním landmarků či malým vzorkem pro posouzení přesnosti této metody. Metodu Krogmana shledávají, stejně jako Stephan, velmi nepřesnou, i když se jejich výsledky opět liší. Stejně tak metoda Prokopce a Ubelakera se zdá být nepřesná v predikci nosního profilu. Nejlépe i v této práci vyšly výsledky George, který

nadhodnocuje projekci nosu v průměru o 1,4 mm u mužů a pouze 0,9 mm u žen (Rynn a Wilkinson 2006).

Další predikce byly věnovány hlavně postavení nosních křídel, jejichž poloha je určena profilem apertura piriformis. Nejčastěji se udává nejnižší bod nosních křídel jako místo 4 mm pod spodním okrajem apertury (Starbuck a Ward 2007, Rynn et al. 2010). Profil apertura piriformis také dobře koreluje s profilem hrotu nosu, jak ukázal ve své práci Rynn et al. (2010).



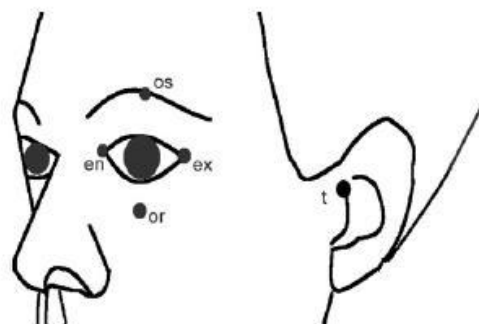
Obr. 10. Metody pro predikci protruze nosu – podle Gerasimova (metoda 1), Krogmana (metoda 2), Prokopce a Ubelakera (metoda 3), George (metoda 4) (čerpáno ze Stephan et al. 2003).

2.3.2 Postavení a velikost oka

Predikce oka z kosterních struktur je zaměřena především na umístění očních koutků, postavení oční koule v orbitě a velikost oka (Wilkinson 2010). Rekonstrukce oka je velmi důležitá z hlediska rozpoznání obličeje (Stephan a Davidson 2008). Umístění oční koule v orbitě bylo některými autory určeno přímo do středu orbity, tj. střed zornice ve středu orbity (např. Snow et al. 1970). Přesnější a více užívané je ale tvrzení, že střed oka směřuje více k laterálnímu a hornímu okraji očnice. Podle studie Stephana a Davidsona (2008) je určeno umístění středu oka 16,2 mm od horního okraje, 18,3 mm od dolního okraje, 14,8 mm od laterálního okraje a 17,8 mm od mediálního okraje orbity. Guyomarc'h et al. (2012) zase predikují vzdálenost polohy oka v očnici na základě její výšky a šířky. Konkrétně umisťují střed oka od horního okraje ve vzdálenosti 44,1% celkové výšky očnice a od bodu dakryon ve vzdálenosti 57,6% celkové šířky očnice.

Vertikální poloha očních koutků se odhaduje u mediálního koutku na 4-5 mm pod bod dakryon a u laterálního koutku odpovídá umístění 10 mm pod sutura frontozygomatica (Fedosyutkin a Nainys 1993). Stephan a Davidson (2008) definovali umístění vnitřního koutku 4,8 mm laterálně od mediální stěny očnice a vnější koutek 4,5 mm od laterální stěny očnice. Vzdálenost mezi koutky odpovídá 74% šířky orbity (Stephan a Davidson 2008).

Sforza et al. (2005) měřili ve své rozsáhlé studii několik landmarků v oblasti oka – exocanthion (ex), endocanthion (en), orbitale (or), orbitale superius (os) a tragion (t). Na základě těchto bodů určovali opět vzdálenosti (meziorbitální šířku, výšku a šířku každého oka), indexy ($os-or/en-ex \times 100$), úhly (postavení orbity a oka), plochu oka atd. Opět zjistili, že všechny lineární vzdálenosti byly větší u mužů než u žen. Signifikantní byl také rozdíl mezi plochou mužského a ženského oka, která byla opět větší u mužů. Sexuální dimorfismus nebyl nalezen u indexu oka. Signifikantní rozdíly jsou nalézány jak v postnatálním období tak už při narození. Lineární vzdálenosti se zvětšují se zvyšujícím se věkem. Měkké tkáně oka se obecně modifikují až do osmé dekády života.



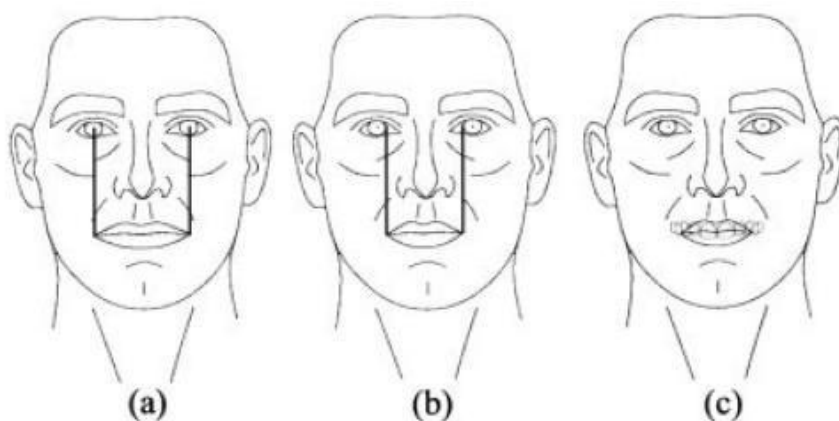
Obr. 11. Umístění landmarků v oblasti oka (čerpáno ze Sforza et al. 2010)

2.3.3 Tvar a velikost rtů

Důležitou oblastí rekonstrukce obličeje je také predikce tvaru a polohy ústní štěrbiny. Šířka úst je určena hranicí mezi špičáky a prvními premoláry (Wilkinson 2010) nebo šířkou 6 předních zubů (Starbuck a Ward 2007), případně je dávána do souvislosti se vzdálenostmi mezi foramina infraorbitalia, foramina mentalia, zornicemi či okraji duhovek. Někdy se uvádí, že vzdálenost mezi špičáky odpovídá 75% šířky úst (Stephan a Murphy 2008).

Stephan (2003) testoval šířku rtů podle tří predikčních pravidel. První určovalo šířku rtů jako vzdálenost mezi zornicemi. Podle Stephana je toto tvrzení velmi nepřesné, neboť vzdálenost mezi zornicemi je v průměru větší o celých 11 mm než skutečná šířka rtů ve

studovaném vzorku. Druhé predikční pravidlo definuje šířku rtů jako vzdálenost mezi mediálními okraji duhovek. Toto pravidlo vykazuje nejlepší korelaci, i přesto je ale v průměru vzdálenost mezi okraji duhovek menší o 2 mm. Podle třetího pravidla je šířka rtů rovna nejlatelárnějšímu spojení mezi špičáky a prvními premoláry. Toto pravidlo vykazuje také poměrně velkou nepřesnost, neboť šířka rtů je větší až o 13 mm (Stephan 2003). Když vezmeme ještě v úvahu určení šířky rtů podle vzdálenosti mezi foramina infraorbitalia, je tato vzdálenost menší o 3,3 mm než šíře rtů. Vzdálenost mezi foramina mentalia je rozdílná až o 12,9 mm (Stephan a Murphy 2008).



Obr. 12. Šířka rtů definovaná pomocí tradičních metod: podle umístění zornic (a), podle mediálního okraje duhovky (b), podle nejlaterálnějšího okraje špičáků (c) (čerpáno ze Stephan 2003).

Ústní štěrbina je umisťována do poloviny korunek horních řezáků (Wilkinson 2010). Podle George (1987) je ústní štěrbina umístěna v jedné třetině (odspodu) korunek horních řezáků u žen, zatímco u mužů je v jedné čtvrtině. Existuje také pozitivní korelace mezi výškou rtů a výškou zubní skloviny řezáků (Starbuck a Ward 2007, George 1987).

Sforza et al. (2010) ve své studii využili landmarky subnasale (sn), labrale superior (ls), stomion (sto), labrale inferior (li) a sublabiale (sl). Z párových landmarků pak body na dolním okraji filtra (crista philtri, cph) a cheilion (ch)). Na jejich základě pak měřili lineární vzdálenosti: šířku úst, šířku filtra, výšku horního a dolního rtu a výšku celé oblasti úst. Dále sledovali poměr šířky a výšky úst, plochu horního a dolního rtu a jejich objem. Z jejich výsledků vyplývá, že veškeré objemy a plochy rtů byly větší u mužů než u žen. Pohlavní

dimorfismus byl také nalezen v šířce úst a filtra a v celkové výšce rtů. Poměr výšky k šířce úst byl nalezen větší u dívek a dospělých žen, u adolescentních jedinců byl naopak větší u mužů.

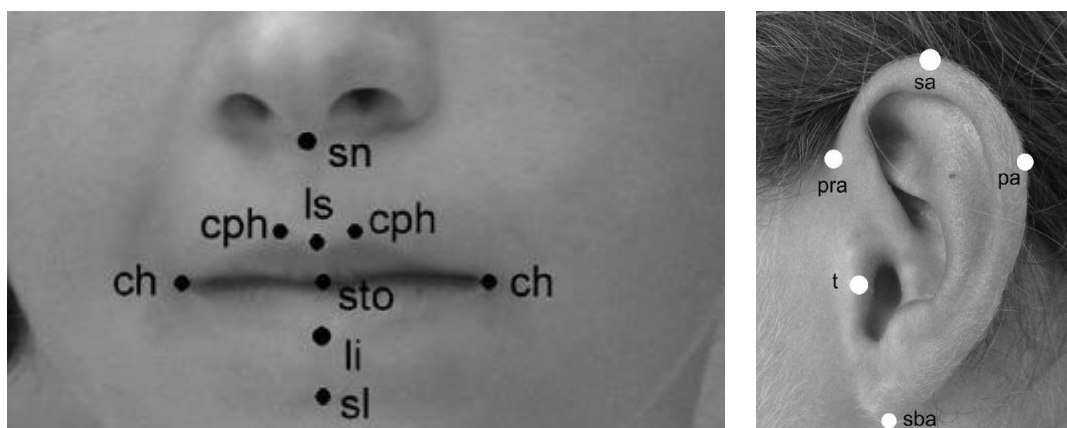
Dále bylo zjištěno, že šířka úst a objem rtů se zvyšuje s věkem. S věkem se zvyšuje také celková výška rtů a šířka filtra. Některé rozměry, jako např. plocha rtů či výška spodního rtu se zvyšují až do pozdní dospělosti a poté jejich rozměr klesá.

2.3.4 Tvar a postavení ucha

V oblasti predikce tvaru a velikosti ucha se zaměříme pouze na výsledky Sforzovy studie, neboť ucho nemá v kraniofaciální rekonstrukci tak zásadní význam a jeho tvar je nutné do velké míry konstruovat intuitivně.

Sforza et al. (2009) využili ve své studii opět několika landmarků – trigion (t), preaurale (pra), supraaurale (sa), postaurale (pa), subaurale (sba). Měřili šířku a výšku ucha, jejich poměr, plochu ucha a rozdíl v symetrii levého a pravého trigionu. Opět byl nalezen pohlavní dimorfismus v rozměrech ucha. Naopak nebyl nalezen dimorfismus v symetrii či vzájemném poměru šířky a výšky. Všechny rozměry se u obou pohlaví s věkem zvyšují.

Ferrario et al. (2003) poukázal na to, že se velikost ucha zvyšuje hlavně po 30. roce a je obecně větší u mužů než u žen. S tím souhlasí také Brucker et al. (2003), který definuje mužské ucho jako delší a větší.



Obr. 13. Umístění landmarků v oblasti úst a ucha (Sforza et al. 2010).

3. CÍLE

Hlavním cílem této práce je na základě CT snímků analyzovat tloušťku měkkých tkání obličeje dospělé české populace za účelem faciálních rekonstrukcí v oblasti forenzní antropologie a estetické medicíny.

V práci budeme postupně řešit následující cíle:

- 1) Sledovat variabilitu a průměrnou tloušťku měkkých tkání obličeje s ohledem na pohlavní dimorfismus
- 2) Sledovat věkové rozdíly tloušťky měkkých tkání obličeje
- 3) Sledovat asymetrii v tloušťce měkkých tkání u bilaterálních bodů obličeje
- 4) Sledovat vztah tvrdého a měkkého profilu za účelem faciální rekonstrukce

4. MATERIÁL

V této práci byl využit soubor 107 dospělých jedinců české populace, z toho 48 žen a 59 mužů. Jedná se o snímky pacientů pořízené z terapeutických důvodů metodou počítačové tomografie na oddělení radiologie v pražské Nemocnici Na Homolce (Bejdová et al. 2013). Data byla anonymizována, pracovali jsme s pořadovým číslem jedince, uvedeným věkem a pohlavím. Četnost souboru se snížila kvůli vyřazení snímků špatné kvality na 102 jedinců, z toho 46 žen a 56 mužů.

Věkové rozmezí souboru je 21 až 83 let. Část diplomové práce je zaměřena na sledování věkových změn, a tak byly vytvořeny 3 věkové intervaly, a to:

- věkový interval 21 až 39 let (11 žen a 24 mužů)
- věkový interval 40 až 59 let (24 žen a 18 mužů)
- věkový interval nad 60 let (11 žen a 14 mužů)

Při hodnocení variability tloušťky měkkých tkání obličeje s ohledem na pohlavní dimorfismus a věk jsme rozdělili hodnoty měkkých tkání na tři množiny – pro celý obličej, horní polovinu obličeje a dolní polovinu obličeje. Rozdělení dat pro horní a dolní polovinu obličeje je znázorněno na obrázku 14. Soubor pro hodnocení celého obličeje obsahoval 54 jedinců, z toho 31 mužů a 23 žen. Na každém jedinci bylo analyzováno všech 40 lineárních rozměrů tloušťky měkkých tkání mezi korespondujícími body. Soubor pro hodnocení horní poloviny obličeje obsahoval 100 jedinců, z toho 55 mužů a 45 žen. Na každém jedinci bylo hodnoceno 18 tlouštěk měkkých tkání. Soubor pro hodnocení dolní poloviny obličeje obsahoval 55 jedinců, z toho 32 mužů a 23 žen. Na každém jedinci bylo analyzováno 22 tlouštěk měkkých tkání na dolní polovině obličeje.

Věkové zastoupení u jednotlivých souborů je uvedeno v tabulce 1-3.

Tabulka 1. Věkové zastoupení pro celý obličej

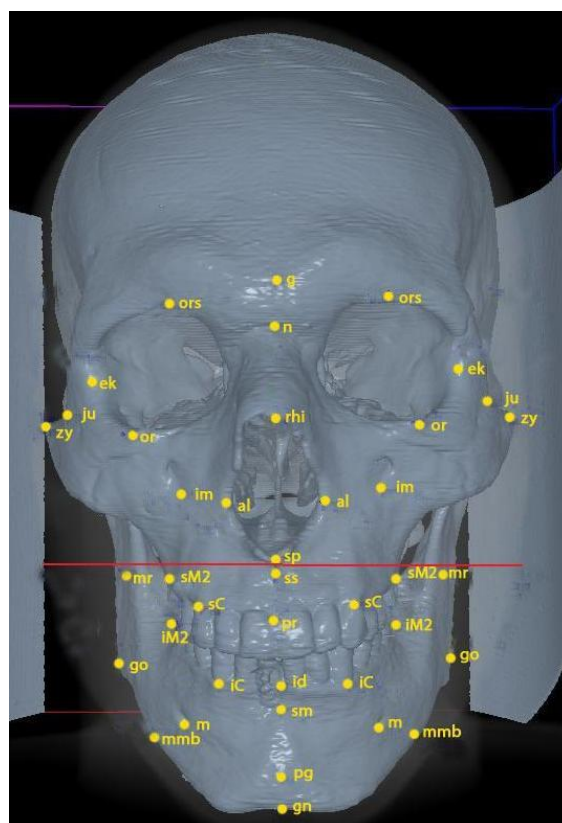
Kompletní sada landmarků – 54 jedinců			
	< 39 let	40 – 59 let	> 60 let
Muži	18	10	3
Ženy	6	13	4

Tabulka 2. Věkové zastoupení pro oblast horní poloviny obličeje

Horní polovina obličeje – 100 jedinců			
	< 39 let	40 – 59 let	> 60 let
Muži	23	18	14
Ženy	10	24	11

Tabulka 3. Věkové zastoupení pro oblast dolní poloviny obličeje

Dolní polovina obličeje – 55 jedinců			
	< 39 let	40 – 59 let	> 60 let
Muži	18	10	4
Ženy	6	13	4



Obr. 14. Rozdělení horní a dolní poloviny obličeje.

5. METODY

5.1 Získání dat metodou počítačové tomografie

Počítačová tomografie (computer tomography, CT) je medicínská zobrazovací metoda, jejímž principem je využití rentgenových paprsků k zobrazení jednotlivých částí těla v tenkých řezech. Snímky, které jsou v práci využity, byly získány přístrojem Siemens Somatom Definition Flash 2x128, který se využívá zejména k vyšetření mozku. (<http://www.homolka.cz/cs-CZ/oddeleni/radiodiagnosticke-oddeleni-rdg/vysetrovaci-a-intervencni-metody/ct-vypocetni-pocitacova-tomografie.html>)

5.2 Měření tloušťky měkkých tkání

Při výběru landmarků jsme vycházeli převážně ze studie Stephan a Simpson (2008). Z této studie bylo vybráno celkem 59 landmarků. Další body byly doplněny ze studie Tilotta et al. (2009).

Body v mediánní rovině jsme definovali zvlášť na měkkém a tvrdém profilu a v případě bilaterálních bodů jsme body na měkkém profilu definovali na transverzálních řezech kolmo k bodům kranio-metrickým (s výjimkou bodu alare, který byl definován zvlášť na tvrdém a měkkém profilu).

5.2.1 Zvolené landmarky a jejich zadávání

5.2.1.1 Zvolené landmarky pro měření tloušťky měkkých tkání

V této práci byly využity následující landmarky:

Body v mediánní rovině:

Glabella (g) – bod na čelní kosti nejvíce vpředu nad nosním kořenem. (Stephan a Simpson 2008)

Glabella´(g´) – bod na měkkém profilu je také v místě největšího vyklenutí čelní kosti nad nosním kořenem.

Nasion (n) – bod leží v průsečíku mediánní roviny lebky se sutura frontonasalis. (Martin a Saller 1957)

Nasion´(n´) – bod na měkkém profilu je v místě největší konkavity přechodu čela a nosu.

Rhinion (rhi) – bod nejnižší na sutura internasalis v mediální rovině. (Martin a Saller 1957)

Rhinion´(rhi´) – bod na měkkém profilu je zadáván kolmo k bodu rhinion.

Spinale (sp) - bod spinale leží na spina nasalis anterior nejvíce vpředu (anterior nasal spine, Phulari 2011).

Subnasale (sn) - bod subnasale leží na měkkém profilu v místě, kde nos přechází v horní ret. (Stephan a Simpson 2008)

Subspinale (ss) - bod leží v místě největší konkavity, v mediální rovině lebky v místě, kde přední dolní hrana spina nasalis anterior přechází na přední stranu alveolárního výběžku horní čelisti. (point A, Phulari 2011)

Subspinale´(ss´) - bod na měkkém profilu leží v místě největší konkavity horního rtu.

Prosthion (pr) – bod prosthion leží na alveolárním výběžku horní čelisti, v místě kde v mediální rovině kostěný výběžek mezi středními řezáky vyčnívá nejvíce dopředu. (Martin a Saller 1957)

Labrale superius (ls) - bod leží na horní hranici červeně horního rtu v mediální rovině nejvíce vpředu. (Stephan a Simpson 2008)

Infradentale (id) - bod na alveolárním výběžku dolní čelisti v mediální rovině mezi středními řezáky. (Martin a Saller 1957)

Labrale inferius (li) - bod leží na hranici červeně spodního rtu v mediální rovině nejvíce vpředu. (Stephan a Simpson 2008)

Supramentale (sm) - bod největší konkavity v mediální rovině na těle mandibuly (Phulari 2013).

Supramentale´(sm´) – bod na měkkém profilu leží v místě největší konkavity spodního rtu.

Pogonion (pg) – bod nejvíce vystupující dopředu na bradové vyvýšenině dolní čelisti. (Stephan a Simpson 2008)

Pogonion´(pg´) – bod na měkkém profilu leží také na nejvíce vystupujícím místě brady v mediální rovině.

Gnathion (gn) – nejnižší položený bod na dolním okraji dolní čelisti v mediální rovině. (menton, Stephan a Simpson 2008)

Gnathion´ (gn´) – nejnižší položený bod na bradě v mediální rovině.

Bilaterální body:

Mentale (m) – nejnižší bod na okraji foramen mentale. (Martin a Saller 1957)

Mentale (m') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu mentale.

Gonion (go) – bod leží na úhlu dolní čelisti a zde vytvořených drsnatinách pro svaly žvýkací v místech, kde se stýkají dolní okraje těla čelistí se zadními okraji větví. (Martin a Saller 1957)

Gonion (go') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu gonion.

Supra canine (sC) – bod na alveolárním výběžku horního špičáku. (Stephan a Simpson 2008)

Supra canine (sC') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu supra canine.

Infra canine (iC) – bod na alveolárním výběžku spodního špičáku. (Stephan a Simpson 2008)

Infra canine (iC') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu infra canine.

Supra M2 (sM2) – bod na alveolárním výběžku druhého horního moláru. (Stephan a Simpson 2008)

Supra M2 (sM2') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu supra M2.

Infra M2 (iM2) – bod na alveolárním výběžku druhého spodního moláru. (Stephan a Simpson 2008)

Infra M2 (iM2') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu infra M2.

Alare (al) – bod ležící nejvíce laterálně na apertura piriformis. (Alar curvature point, Kolar a Salter 1996)

Alare (al') – bod na měkkém profilu leží na laterálním okraji nosu, v místě kde nosní křídla přechází ve tváře.

Orbitale (or) – nejnižší položené body na dolních okrajích očníce. (Martin a Saller 1957)

Orbitale (or') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu orbitale.

Zygion (zy) – bod leží nejvíce laterálně na jařmových obloucích. (Martin a Saller 1957)

Zygion (zy') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu zygion.

Jugale (ju) – bod na horním okraji os zygomaticum v úhlu, který tvoří zadní okraj proc. frontalis a horní okraj proc. temporalis této kosti. (Martin a Saller 1957)

Jugale (ju') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu jugale

Ektokonchion (ek) – bod ležící nejvíce laterálně na laterálním okraji očníce (Tilotta et al. 2009)

Ektokonchion (ek') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu ektokonchion.

Orbitale superius (ors) – bod ležící nejvíce superiorně na horním okraji očníce. (Panenková et al. 2012)

Orbitale superius' (ors') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu orbitale superius.

Inferior malar (im) - nejhlubší bod ve fossa canina. (Panenková et al. 2012)

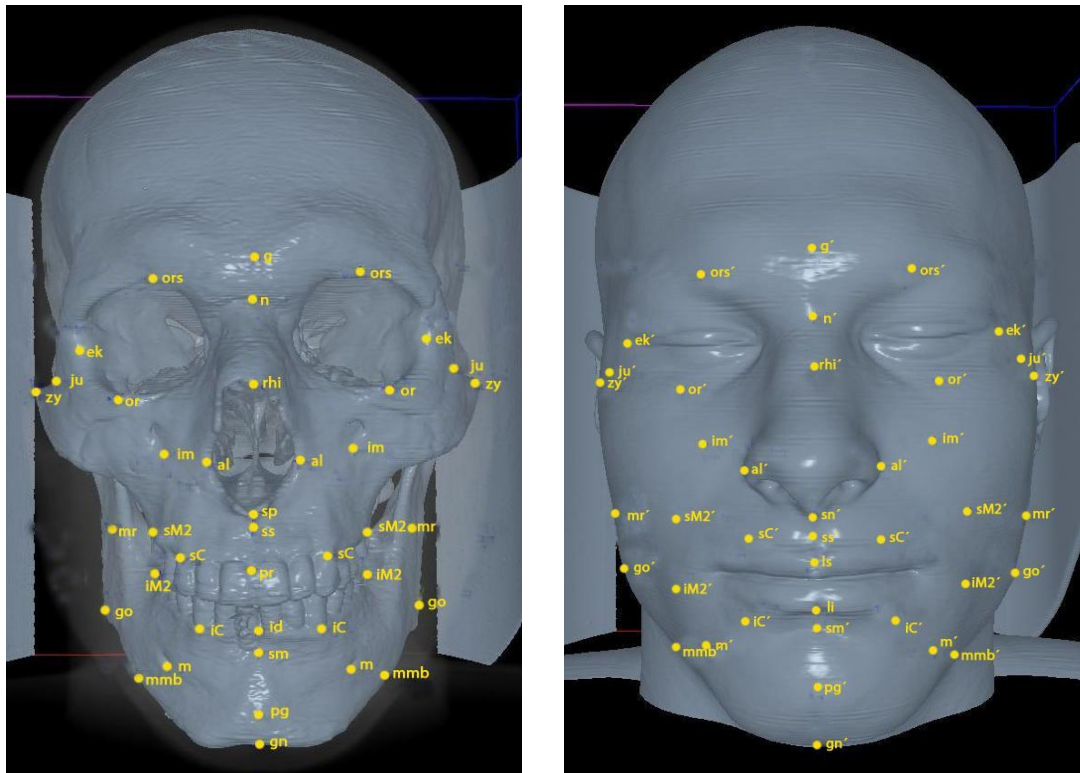
Inferior malar'(im') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu inferior malar.

Mid-ramus (mr) – bod ve středu ramene mandibuly. (Stephan a Simpson 2008)

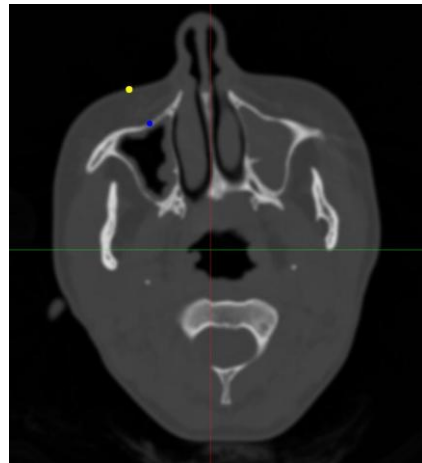
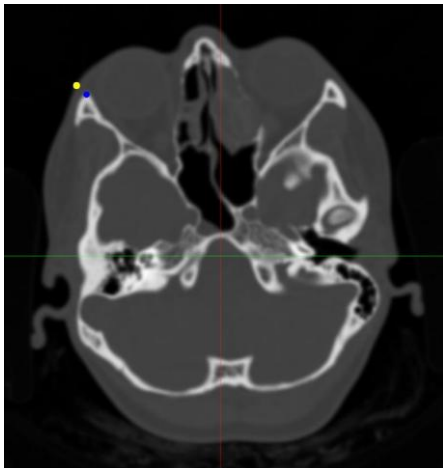
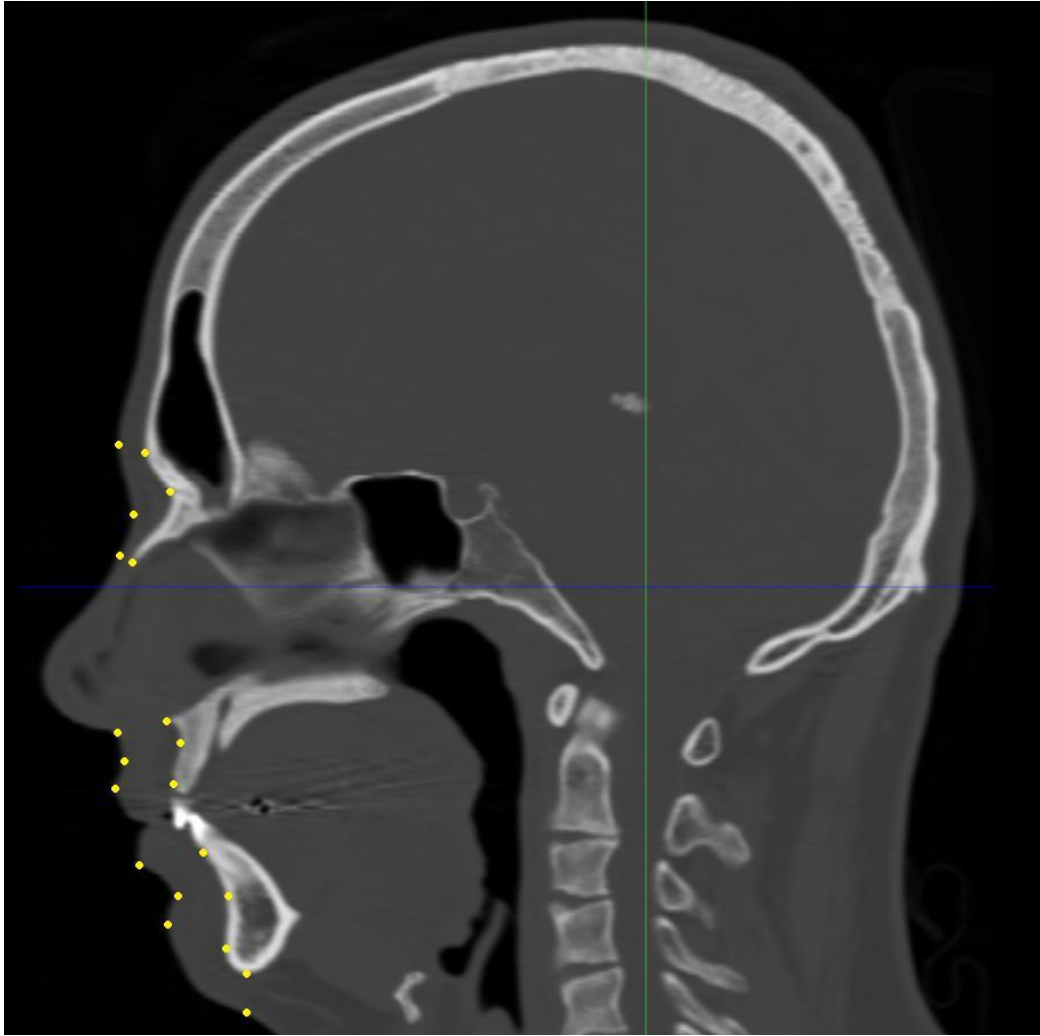
Mid-ramus'(mr') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu mid-ramus.

Mid-mandibular border (mmb) – bod ležící na spodním okraji těla mandibuly uprostřed mezi body pogonion a gonion. (Stephan a Simpson 2008)

Mid-mandibular border'(mmb') – bod na měkkém profilu leží kolmo k bodu mid-mandibular border.



Obr. 15-16. Landmarky na tvrdém a měkkém profilu obličeje využité v této práci.



Obr. 17-19. Nahoře snímek s definovanými body v mediální rovině. Dole ukázka dvou transverzálních řezů (body ektokonchion a inferior malar)

5.2.1.2 Zadávání landmarků

Pro zadávání landmarků byl využit program Morphome3cs. Jedná se o počítačový software pro zpracování 2D a 3D objektů pomocí metod geometrické morfometrie a metod statistických. Software byl vytvořen na Matematicko-fyzikální fakultě Karlovy univerzity v Praze v roce 2009, druhá verze pak v roce 2011 tamtéž (<http://cgg.mff.cuni.cz/trac/morpho/raw-attachment/wiki/WikiStart/1-project-overview.pdf>).

V této diplomové práci byl program Morphome3cs využit pro práci s objemovými daty, konkrétně tedy s CT snímky. V programu jsme pracovali ve Volume Landmark Editor s tzv. izoplochami, vrstvami, kdy jsou zobrazeny body o určité denzitě. Landmarky byly nanášeny na izoplochu o denzitě kosti. Kefalometrické body v mediánní rovině byly definovány na podélném řezu. Bilaterální kefalometrické body byly nanášeny na transverzálních řezech kolmo ke korespondujícím kranio-metrickým bodům. Pro každý bod jsme tímto způsobem získaly souřadnice x,y,z , které jsme použili k další analýze. Pro každého jedince jsme tedy získaly 240 souřadnic jednotlivých landmarků.

Kompletní sada landmarků byla nakonec definována pouze na 54 jedincích a to z důvodu problematického definování některých bodů na konkrétních snímcích. Největším problémem byly zubní výplně pacientů, které znemožňovaly zadávání bodů v oblasti horní a dolní čelisti. U těchto snímků byly využity rozměry pouze na horní polovině obličeje. Také mezi snímky pořízenými v roce 2011 se často objevovaly takové, které nebyly zcela kompletní a na nichž chyběla oblast pro definování bodu gnathion, což zařadilo tyto snímky také pouze do analýzy horní poloviny obličeje.

5.2.2 Měření lineární vzdálenosti mezi korespondujícími landmarky

Měření probíhalo na základě získaných souřadnic bodů. Pro každé dva korespondující landmarky byla definována v programu Morphome3cs lineární vzdálenost v milimetrech. Na těchto naměřených hodnotách probíhala další analýza. Pro každého jedince jsme tímto postupem získali 40 hodnot tloušťky měkkých tkání. Naměřené hodnoty, včetně průměrných hodnot a směrodatné odchylky pro obě pohlaví a všechny věkové skupiny jsou uvedeny v tabulce 5 a 6.

5.3 Metody použité při analýze dat

5.3.1 Analýza hlavních komponent (PCA)

Principem analýzy hlavních komponent (principal component analysis, PCA) je redukce počtu proměnných pomocí tzv. hlavních komponent. Hlavní komponenty jsou lineární kombinace původních proměnných. Vysvětlují variabilitu souboru a závislost původních proměnných. Také vysvětlují maximum jejich celkového rozptylu. Původní soubor je tedy nahrazen novými hypotetickými proměnnými, které sumarizují rozptyly původních hodnot. Při další analýze jsou využívány pouze tyto hlavní komponenty. Je pravidlem, že první komponenty popisují nejvíce variability, vysvětlují největší část rozptylu (Haruštiaková et al. 2012).

U tohoto druhu analýzy nerozlišujeme závislé a nezávislé proměnné. Veškeré proměnné mají stejný status. K zobrazení závislosti vysvětlené variability dat na počtu vybraných hlavních komponent se využívá tzv. suťový graf (scree plot). Na vybraných hlavních komponentách, které nesou největší podíl variability souboru, se poté sestavují rozptylové grafy (tzv. scatter plot) (Haruštiaková et al. 2012).

Předpokladem této statistické metody je normální rozdělení dat a kvantitativnost proměnných (Haruštiaková et al. 2012).

Analýzu hlavních komponent jsme využili při hodnocení vlivu pohlaví a věku na tloušťky měkkých tkání obličeje. Pomocí této metody jsme dosáhli redukce dat získáním hlavních komponent. První tři hlavní komponenty byly využity pro další testování. Analýzu PCA jsme dále využili při sledování vztahu tvrdého a měkkého profilu obličeje. Analýza hlavních komponent byla provedena v programu Morphome3cs.

5.3.2 Hotellingův T2 test

Hotellingův T2 test je parametrický dvouvýběrový test (obdoba Studentova T-testu). Předpokladem je normální rozdělení dat, které je v této práci testováno pomocí Shapiro-Wilkova testu normality. Dvouvýběrové testy se používají pro testování dvou navzájem nezávislých náhodných výběrů. Test hodnotí to, zda se hodnoty náhodné veličiny v jedné populaci statisticky významně liší od hodnot v druhé populaci (Pavlík a Dušek 2012).

Hotellingův T2 test byl v této diplomové práci využit pro hodnocení statistické významnosti vlivu pohlaví na tloušťku měkkých tkání obličeje. Tento test byl proveden v programu Morphome3cs.

5.3.3 Shapiro-Wilkův test normality

Shapiro-Wilkův W test je využíván pro hodnocení normality u menších souborů (kdy n je 3-50 jedinců) i větších souborů (n do 2000 jedinců). Principem testu je proložení seřazených hodnot regresní přímkou vzhledem k očekávaným hodnotám normálního rozdělení. Test se využívá především v situacích, kdy máme k dispozici pouze omezený počet pozorování. Výsledkem testu normality je p-hodnota, která udává, zda přijmout či odmítnout nulovou hypotézu. Nulovou hypotézou je v tomto případě normální rozdělení dat. Pokud je tedy p-hodnota větší než 0,05, můžeme očekávat normalitu souboru (Pavlík a Dušek 2012).

Shapiro-Wilkův test normality jsme využili pro hodnocení normality jako předpokladu Hotellingova testu, Kolmogorova-Smirnova testu a Kruskal-Wallisova testu. Pro Shapiro-Wilkův test normality jsme využili software PAST 1.99 (<http://folk.uio.no/ohammer/past>).

5.3.4 Lineární diskriminační analýza (LDA)

Diskriminační analýza je jednou z metod mnohorozměrné statistiky. Dochází během ní k zařazení nového objektu do příslušné skupiny nebo interpretaci skupin. Zabývá se závislostí kvalitativní proměnné (ta určuje zařazení objektů do skupin) na kvantitativních proměnných. Vstupními daty jsou objekty vyjádřené sadou kvantitativních proměnných a jednou proměnnou kategoriální. Metoda vytváří klasifikační funkce, které jsou sestavené na základě tzv. trénovací množiny objektů. Na základě těchto funkcí jsou nové objekty řazeny do skupin, kterými mohou být např. pohlaví či věk. Každá skupina je definována lineární klasifikační funkcí. Objekty jsou zařazeny do skupiny, pro kterou klasifikační skóre dosáhne vyšší hodnoty (Haruštiaková et al. 2012).

Předpokladem diskriminační analýzy je normalita dat. Také žádná z proměnných nesmí být kombinací jiných proměnných. Skupiny objektů musí být minimálně dvě a v každé skupině musí být zařazeny minimálně 2 objekty. Jedním z důležitých předpokladů je fakt, že

počet proměnných nesmí být menší než počet objektů zmenšený o počet skupin (Haruštiaková et al. 2012).

Výsledkem diskriminační analýzy je odhad pravděpodobnosti správné klasifikace. Existuje tzv. základní odhad, kdy pravděpodobnost správného zařazení získáme aplikací sestaveného rozhodovacího pravidla na všech n objektech trénovací množiny. Druhý odhadem je tzv. odhad křížový (tzv. cross-validation) nebo také křížové ověření. Při něm dochází k tomu, že ze souboru n vybereme $n-1$ objektů (trénovací soubor) a z něho je odvozeno klasifikační kritérium. Toto kritérium je následně aplikováno na 1 vypuštěný objekt. Postup se opakuje n -krát (Haruštiaková et al. 2012).

Pomocí lineární diskriminační analýzy, která byla provedena v programu Morphome3cs, jsme klasifikovali tloušťky měkkých tkání podle pohlaví.

5.3.5 Kolmogorovův-Smirnovův test

Tento test je jednou z nejběžnějších neparametrických metod porovnání dvou výběrů. Hodnotí shodu výběrového rozdělení s teoretickým rozdělením pravděpodobnosti. Rozdělení pravděpodobnosti je založeno na srovnání výběrové distribuční funkce s teoretickou distribuční funkcí (např. normální rozdělení). Test hodnotí maximální vzdálenost mezi těmito funkcemi (Pavlík a Dušek 2012).

V této práci byl Kolmogorovův-Smirnovův test využit pro hodnocení významnosti vlivu pohlaví na jednotlivé hodnoty tloušťky měkkých tkání obličeje. Pro Kolmogorovův-Smirnovův test jsme využili software PAST 1.99.

5.3.6 Multifaktorová analýza rozptylu (MANOVA)

Analýza rozptylu (ANOVA) pracuje s tzv. faktory (nezávislé proměnné) a kategoriemi (hodnoty úrovně faktorů). Principem metody je posouzení efektů nezávislých proměnných na závisle proměnnou kvantitativního typu. Variacemi analýzy rozptylu je tzv. analýza kovariance (ANCOVA), kdy jsou mezi nezávisle proměnné řazeny také intervalové proměnné, a MANOVA (multiple analysis of variance), kdy se analyzuje vliv více nezávislých proměnných (Hendl 2004).

Při analýze rozptylu, se stejně jako u Hotellingova T2 testu, srovnávají dvě skupiny na základě lineárních kombinací původních hodnot. Výsledkem metody je p-hodnota, která udává významný vliv faktorů na závisle proměnnou. Pokud je hodnota vyšší než hladina významnosti (v našem případě 0,05), očekáváme, že faktory nemají na závisle proměnnou vliv.

Výpočet vychází z F-testovací statistiky rozdílnosti skupinových průměrů:

$$F = \frac{\text{vážený rozptyl mezi průměry skupin}}{\text{rozptyl mezi jedinci ve stejné skupině}}$$

Za použití multifaktorové analýzy rozptylu můžeme sledovat vliv více faktorů na závisle proměnnou, v našem případě se bude jednat o vliv pohlaví a věku a jejich vzájemnou interakci. Pro multifaktorovou analýzu rozptylu jsme využili software Morphome3cs.

5.3.7 Kruskal-Wallisův test

Jedná se o neparametrickou alternativu k analýze rozptylu. Nevyžaduje normalitu hodnot. Využívá se k hodnocení více než 2 skupin. Testuje se shoda výběrových distribučních funkcí skupin. Předpokladem je nezávislost sledovaných hodnot (Pavlík a Dušek 2012).

Kruskal-Wallisův test byl proveden v programu PAST 1.99 a byl využit pro hodnocení vlivu věku na tloušťku měkkých tkání na jednotlivých landmarcích.

5.3.8 Wilcoxonův párový test

Jedná se o neparametrickou alternativu t-testu pro jeden výběr. Používá se v případě, kdy není splněna normalita dat a pracuje s hodnotou mediánu. Pokud je rozdělení souboru symetrické, nachází se polovina proměnných v záporných a polovina proměnných v kladných hodnotách. Test je více robustní k odlehlým hodnotám než jeho parametrická alternativa (Pavlík a Dušek 2012).

Wilcoxonovým párovým testem jsme hodnotili asymetrii tloušťky měkkých tkání na jednotlivých landmarcích. Pro hodnocení jsme využili software PAST 1.99.

5.3.9 Prokrústovská analýza a metoda TPS

Prokrústovská analýza (Generalized Procrustes Analysis, GPA) a metoda TPS (thin-plate spline) jsou metodami geometrické morfometrie. Při prokrústovské analýze je analyzovaný soubor objektů překládán na sebe tak, aby mezi odpovídajícími body vznikla co nejmenší vzdálenost. Po takovém uspořádání objektů zbude pro každý landmark zbytková vzdálenost (tj. vzdálenost od příslušného landmarku průměrného objektu). Tato zbytková vzdálenost obsahuje informaci o tvaru daného objektu.

Informace o změně polohy každého landmarku je využita pro morfometrickou metodu, která umožňuje modelovat změnu tvaru objektu a znázornit rozdíl mezi dvěma objekty pomocí transformační mřížky. Výsledkem je informace o vzájemné tvarové změně mezi objekty.

Na soubor tvarových objektů lze aplikovat tzv. analýzu relativních warp (deformací), která vymezuje prostorové osy podle toho, kolik procent celkové variability souboru vysvětlují. Každý objekt je definován svou polohou na jednotlivých osách. Pomocí těchto metod lze nalézt a definovat vzájemné tvarové rozdíly mezi objekty (Neustupa 2006).

Obě metody jsme využili při sledování vztahu tvrdého a měkkého profilu obličeje k deformaci lebky na povrch obličeje, dále k deformaci průměrné lebky a také k deformaci nově nalezené lebky za účelem faciální rekonstrukce. Metoda byla provedena v programu R 2.13.0.

5.3.10 Mnohorozměrná lineární regrese

Metoda se používá pro statistické vyhodnocení modelu s jednou závislou proměnnou a více proměnnými nezávislými. Je vhodná při hodnocení efektu změn ovlivňujících parametrů na cílovou proměnnou či při predikci hodnoty závisle proměnné pro budoucí hodnoty nezávislých proměnných. Pro nezávisle proměnné se proto využívá termín prediktor či regresor.

Při hledání hodnot parametrů se využívá metoda nejmenších čtverců, kdy se vychází ze součtu čtverců rozdílů změřených hodnot a hodnot vypočítaných pomocí regresní funkce, do níž jsou dosazeny nezávisle proměnných. Výsledkem metody je to, že predikční funkce bude mít pro soubor měření mezi všemi lineárními prediktory největší korelační koeficient se závisle proměnnou, tzv. mnohonásobný korelační koeficient mezi závisle proměnnou a množinou prediktorů. Jeho rozsah je 0 až 1, kdy hodnoty blíže k 0 znamenají statistickou nezávislost závisle proměnné na množině nezávisle proměnných. Hodnota 1 znamená dokonalou lineární vazbu danou regresní funkcí.

Metoda mnohorozměrné lineární regrese byla v práci využita pro modelaci deformované průměrné lebky podle věku a pohlaví. Analýza byla zpracována v programu R 2.13.0.

5.4 Sledování vztahu tvrdého a měkkého profilu obličeje: faciální rekonstrukce

Pro predikci umístění landmarků na měkkém profilu byla nejprve provedena na celém souboru prokrústovská transformace u všech landmarků. Následně byla na kranio-metrické body aplikována analýza PCA s ohledem na věk a pohlaví jedince. V dalším kroku byla spočítána průměrná lebka (tj. průměrné landmarky na lebce). Pro každého jedince byla vypočítána TPS deformace kranio-metrických landmarků do polohy landmarků umístěných na měkkém profilu. Stejnou deformací byla deformována průměrná lebka. Na takto zdeformovanou průměrnou lebku byla aplikována mnohorozměrná lineární regrese, která modelovala lebku podle stanovených parametrů (hlavních komponent, věku a pohlaví).

Při faciální rekonstrukci byly nejprve pro novou lebku spočítány parametry pomocí analýzy PCA (transformace hlavními komponentami), kterými byly násobeny prediktory získané při mnohorozměrné lineární regresi. Na takto transformovanou lebku byla deformována průměrná lebka pomocí metody TPS a stejná deformace byla využita při deformaci nové lebky, čímž bylo dosaženo polohy bodů na měkkém profilu obličeje.

Pro aplikaci této metody byl využit software R 2.13.0 a postup metody je inspirován studií Claes et al. (2006).

6. VÝSLEDKY

6.1 Intraindividuální chyba měření

U pěti jedinců, na nichž bylo možné naměřit kompletní sadu landmarků, bylo provedeno pět opakovaných měření, aby mohla být definována intraindividuální chyba měření. Ta byla vypočítána podle vzorce (Von Cranon-Taubadel et al. 2007):

$$\bar{P}_{ij} = \frac{j}{K} \sum_{k=1}^K P_{ijk}$$
$$E = \frac{1}{NMK} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \|P_{ijk} - \bar{P}_{ij}\|$$

kde P je pozice landmarku (i = jedinec, j = landmark, k = měření) a E chyba měření (N = počet jedinců, M = počet landmarků, K = počet měření).

Výsledné hodnoty chyby měření jsou uvedeny v tabulce 4.

Hodnota 0,778 mm odpovídá 0,1% celkové variability souboru, která byla stanovena na základě centroid size všech objektů.

Tabulka 4. Výpočet intraindividuální chyby měření

Q1 (mm)	Průměr (mm)	Q3 (mm)
0,511	0,778	0,867

(Q = kvartil)

6.2 Hodnocení tloušťek měkkých tkání obličeje: referenční hodnoty pro současnou českou populaci

Jedním z hlavních cílů této práce je definování hodnot pro tloušťky měkkých tkání obličeje u dospělé české populace. Tyto hodnoty jsou základem každé počítačové i manuální rekonstrukce obličeje. Modelování měkkého profilu obličeje probíhá vždy s ohledem na tloušťky měkkých tkání na daných antropometrických bodech. Zjištěné hodnoty v této diplomové práci mohou posloužit jako referenční hodnoty pro českou dospělou populaci a přispět tak k zpřesnění metody kraniofaciální rekonstrukce. Tato práce byla navržena pro potřeby Kriminálního ústavu Praha.

Na celém obličeji bylo měřeno 40 lineární rozměrů pro tloušťky měkkých tkání obličeje (viz kap. 5). U každého z nich byla stanovena minimální a maximální hodnota, průměrná hodnota a směrodatná odchylka. To vše s ohledem na pohlavní dimorfismus a věk. Na jednotlivých tloušťkách měkkých tkání jsme nejprve testovali normalitu pomocí Shapiro-Wilkova W testu. Vzhledem k tomu, že některé hodnoty nevykazovali normální rozložení dat, a to především u mužské populace, využili jsme k testování vlivu pohlavního dimorfismu Kolmogorovův-Smirnovův test a k testování vlivu věku Kruskal-Wallisův test. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5 a 6.

Tabulka 5. Přehled variability tloušťky měkkých tkání pro českou dospělou populaci s ohledem na pohlavní dimorfismus

Landmark	Ženy					Muži					K-S test (p-hodnota)	
	Počet jedinců (n)	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	S-W test (p-hodnota)	Počet jedinců (n)	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)		SD
Glabella	46	3,662	9,505	6,019	1,315	0,506	56	3,991	9,659	6,298	1,165	0,022
Nasion	46	5,173	14,595	8,255	1,868	0,082	56	3,831	12,900	9,416	1,905	0,125
Rhinion	46	1,587	4,766	2,618	0,627	0,009	56	2,168	4,690	3,115	0,633	0,001
Spinale-	46	6,723	14,458	9,848	1,947	0,022	56	7,206	19,019	11,518	2,255	0,013
Subnasale	46	9,867	16,838	12,765	1,773	0,325	56	11,792	19,825	15,655	1,803	0,311
Subspinale	43	7,462	17,335	11,128	1,966	0,230	47	4,312	20,638	13,707	2,689	0,216
Prosthion-Labrale superius	43	9,716	18,215	14,151	1,962	0,773	49	12,24	23,871	16,351	2,104	0,096
Infradentale-	46	8,513	14,642	10,939	1,420	0,049	56	10,061	16,602	12,514	1,559	0,004
Labrale inferius	46	7,309	17,384	11,767	2,197	0,671	56	7,510	22,995	13,542	2,641	0,004
Supramentale	41	4,942	13,526	7,978	2,155	0,106	52	4,921	13,512	9,148	1,876	0,132
Pogonion	46	6,063	18,029	12,053	2,430	0,925	56	9,988	19,193	14,170	2,081	0,177
Gnathion	46	6,057	16,885	11,560	2,386	0,668	56	8,891	17,737	13,342	2,229	0,060
Mentale (R)	46	5,401	28,492	15,948	6,224	0,123	56	6,861	33,597	17,941	6,206	0,064
Mentale (L)	46	4,804	31,534	16,152	6,808	0,344	56	7,476	34,858	17,998	6,170	0,019
Gonion (R)	40	5,318	12,725	8,438	1,762	0,323	47	7,417	15,657	11,035	1,679	0,641
Gonion (L)	41	5,943	13,278	8,640	1,632	0,150	47	7,530	15,595	10,844	1,841	0,301
Supra canine (R)	43	5,898	13,672	9,316	1,724	0,022	50	6,701	14,846	10,476	1,913	0,142
Supra canine (L)	43	6,215	13,394	8,943	1,713	0,003	50	6,845	15,208	9,947	1,825	0,018
Infra canine (R)	34	21,535	45,605	29,626	5,965	0,016	39	25,815	42,700	33,530	4,988	0,009
Infra canine (L)	34	19,707	40,365	29,414	4,823	0,657	39	24,638	46,431	32,162	4,765	0,071
Supra M2 (R)	31	21,535	36,852	25,519	6,096	0,071	37	19,111	36,551	27,107	4,979	0,088
Supra M2 (L)	30	14,859	37,853	24,838	6,346	0,030	37	18,784	37,776	26,793	4,478	0,111
Alare (R)	46	8,498	14,724	10,623	1,282	0,075	56	8,776	19,821	12,02	1,668	0,000
Alare (L)	46	7,681	14,778	10,690	1,401	0,812	56	8,667	21,929	12,357	1,985	0,000
Orbitale (R)	46	3,022	12,953	7,229	2,301	0,237	56	3,677	15,007	8,350	3,005	0,001
Orbitale (L)	46	2,897	12,648	7,479	2,547	0,133	56	3,596	16,169	8,370	3,204	0,000

(pokračování tabulky 5)

Landmark	Ženy					Muži					K-S test (p-hodnota)	
	Počet jedinců (n)	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	S-W test (p-hodnota)	Počet jedinců (n)	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)		SD
Zygion (R)	46	4,556	14,586	9,174	2,882	0,016	56	4,315	17,680	8,491	2,440	0,002
Zygion (L)	46	4,718	16,839	9,197	3,164	0,024	56	4,934	16,300	8,770	2,874	0,000
Jugale (R)	46	6,555	16,489	10,565	2,458	0,026	56	6,048	15,095	10,367	2,372	0,001
Jugale (L)	46	6,007	16,630	10,270	2,554	0,061	56	5,128	16,134	9,721	2,532	0,005
Ektokochlion (R)	46	2,558	10,134	5,879	1,752	0,704	56	3,109	9,740	5,847	1,684	0,003
Ektokochlion (L)	46	3,244	9,858	5,857	1,560	0,026	56	3,262	9,946	5,856	1,767	0,000
Orbitale superius (R)	46	5,444	12,588	8,935	1,587	0,975	56	5,924	13,974	10,221	1,693	0,078
Orbitale superius (L)	46	4,878	12,032	8,911	1,776	0,338	56	5,224	13,433	9,996	1,716	0,106
Inferior malar (R)	46	11,826	35,187	17,460	3,826	0,000	56	10,794	26,948	18,060	3,123	0,023
Inferior malar (L)	46	13,577	25,723	17,913	2,651	0,090	56	11,898	25,769	18,200	2,864	0,068
Mid-ramus (R)	46	14,448	40,158	23,040	4,809	0,013	56	17,468	36,164	25,892	4,230	0,722
Mid-ramus (L)	46	14,706	37,477	22,824	4,689	0,045	56	18,432	33,714	25,441	3,877	0,168
Mid-mandibular border (R)	46	7,253	23,101	13,149	3,804	0,319	56	6,164	23,029	13,220	3,740	0,073
Mid-mandibular border (L)	46	7,166	26,409	14,215	4,091	0,128	56	6,763	22,444	13,566	3,738	0,336

(S-W test = Shapiro-Wilkův test normality, K-S test = Kolmogorovův-Smirnovův test)

* p < 0,05

Tabulka 6. Přehled variability tloušťky měkkých tkání pro českou dospělou populaci s ohledem na věk

Landmark	Pohlaví	Věk												K-W test (p-hodnota)			
		<39						40-59							>60		
		n	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	n	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	n	Min (mm)		Max (mm)	Průměr (mm)	SD
Glabella	F	11	4,070	7,068	5,125	0,900	24	3,662	8,349	6,162	1,125	11	3,693	9,505	6,601	1,572	0,026 *
	M	24	3,991	8,918	6,190	1,012	18	4,652	9,659	6,411	1,206	14	4,441	9,595	6,336	1,329	0,928
Nasion	F	11	5,731	10,249	7,332	1,310	24	5,173	14,595	8,364	2,005	11	5,608	11,256	8,940	1,660	0,071
	M	24	5,900	12,259	9,372	1,606	18	7,125	12,890	9,570	1,583	14	3,831	12,855	9,294	2,612	0,993
Rhinion	F	11	1,587	2,969	2,469	0,350	24	1,591	4,766	2,651	0,746	11	1,799	3,509	2,695	0,527	0,597
	M	24	2,211	4,020	2,946	0,532	18	2,168	4,690	3,199	0,696	14	2,329	4,347	3,286	0,632	0,445
Spinale/ Subnasale	F	11	7,657	13,816	10,106	1,694	24	6,723	14,458	12,801	2,151	11	7,211	13,409	9,459	1,606	0,653
	M	24	7,583	19,019	11,758	2,465	18	9,432	16,107	12,044	1,829	14	7,206	14,756	10,432	1,996	0,110
Subspinale	F	11	10,425	14,723	12,300	1,368	24	9,867	16,838	12,802	2,005	11	10,700	15,559	13,190	1,423	0,000 *
	M	24	12,691	19,325	15,826	1,662	18	12,259	19,825	15,677	1,969	14	11,792	17,821	15,335	1,769	0,763
Prosthion/ Labrale superius	F	11	8,593	14,505	11,332	1,635	22	8,641	15,523	11,079	1,698	10	7,462	17,335	10,991	2,747	0,847
	M	22	8,811	20,638	13,738	2,650	18	11,377	17,215	14,312	1,721	9	4,312	16,420	12,568	3,650	0,584
Infradentale/ Labrale inferius	F	11	12,281	17,205	14,281	1,449	22	11,238	18,215	14,406	1,898	10	9,716	17,233	13,472	2,383	0,633
	M	23	12,240	20,263	15,972	2,650	18	12,667	23,871	16,667	2,323	8	13,824	19,046	16,785	1,513	0,521
Supramentale	F	11	8,513	12,286	10,280	1,048	24	8,586	14,642	11,184	1,533	11	9,321	13,831	11,062	1,277	0,296
	M	24	10,061	13,867	11,767	1,100	18	10,291	15,946	12,887	1,554	14	11,032	16,602	13,314	1,665	0,009 *
Pogonion	F	11	9,462	12,977	11,144	1,243	24	7,309	17,384	12,050	2,532	11	8,796	15,734	11,775	2,022	0,544
	M	24	7,510	20,634	13,194	2,823	18	10,379	22,995	14,207	2,829	14	10,061	15,296	13,284	1,761	0,583
Gnathion	F	9	5,108	11,487	7,359	1,864	21	5,027	13,526	8,379	2,342	11	4,942	10,115	7,718	1,817	0,535
	M	22	4,921	13,245	8,885	1,946	17	6,178	12,466	9,298	1,825	13	6,247	13,512	9,397	1,761	0,626
Mentale (R)	F	11	8,385	14,941	11,284	1,726	24	8,310	18,029	12,538	2,413	11	6,063	16,098	11,765	2,799	0,383
	M	24	9,988	19,193	14,025	2,499	18	10,507	17,422	14,200	1,950	14	12,553	16,855	14,381	1,283	0,789
Mentale (L)	F	11	8,414	15,274	11,075	2,079	24	8,268	16,885	12,076	2,358	11	6,057	16,947	11,086	2,513	0,450
	M	24	8,891	17,737	12,698	2,627	18	10,643	16,908	13,751	1,628	14	10,866	17,298	13,920	1,835	0,196
Gonion (R)	F	11	5,401	26,827	12,303	5,154	24	5,743	27,489	16,492	6,126	11	8,524	28,492	18,406	5,795	0,040 *
	M	24	6,861	30,040	18,050	6,259	18	7,335	33,597	17,581	6,805	14	8,479	25,606	18,219	5,205	0,754
Gonion (L)	F	11	4,804	24,375	12,243	5,082	24	4,933	29,701	16,684	6,871	11	10,020	31,534	18,546	6,549	0,040 *
	M	24	8,012	25,349	16,604	5,467	18	7,476	34,858	18,854	7,496	14	9,136	27,724	19,289	4,781	0,361

(pokračování tabulky 6)

Landmark	Pohlaví	Věk												K-W test (p-hodnota)			
		<39				40-59				>60							
		n	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	n	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	n	Min (mm)		Max (mm)	Průměr (mm)	SD
Supra canine (R)	F	11	6,908	12,725	9,237	1,734	22	5,318	12,366	8,005	1,766	7	6,229	10,433	8,358	1,301	0,216
Supra canine (L)	M	21	7,417	15,190	11,254	1,609	17	8,335	15,657	10,818	1,873	9	8,874	12,637	10,901	1,247	0,561
Infra canine (R)	F	11	6,559	12,114	8,944	1,701	23	5,943	13,278	8,591	1,687	7	6,521	10,086	8,314	1,215	0,746
Infra canine (L)	M	21	7,896	14,575	10,971	1,611	17	7,882	15,595	10,812	2,113	9	7,530	12,770	10,543	1,737	0,901
Infra canine (R)	F	11	7,146	13,672	9,643	1,748	23	5,898	13,661	9,353	1,892	9	6,901	10,448	8,828	1,007	0,714
Infra canine (L)	M	24	7,250	14,846	10,414	1,997	18	6,701	14,392	10,706	1,957	8	8,519	13,278	10,144	1,430	0,703
Supra M2 (R)	F	11	6,834	13,014	8,995	1,591	23	6,215	13,394	9,058	1,906	9	7,181	10,246	8,513	1,119	0,853
Supra M2 (L)	M	24	6,845	15,208	10,135	1,876	18	7,403	14,340	9,931	1,831	8	8,021	13,066	9,441	1,541	0,572
Infra M2 (R)	F	10	21,842	35,566	26,676	4,237	18	21,535	45,605	30,602	6,253	6	25,942	40,741	32,843	5,446	0,336
Infra M2 (L)	M	20	25,815	42,700	33,728	5,412	13	27,078	40,189	33,896	4,315	6	27,201	38,536	32,416	4,210	0,618
Alare (R)	F	10	22,436	33,060	27,852	3,490	18	19,707	40,365	30,416	5,529	6	24,648	37,491	29,423	4,101	0,256
Alare (L)	M	19	26,350	40,709	31,527	4,440	13	24,638	38,323	32,511	3,949	7	28,417	46,431	33,709	6,153	0,356
Orbitale (R)	F	8	19,164	31,811	23,228	3,864	16	15,865	35,274	24,753	6,289	7	26,430	36,852	31,637	4,613	0,362
Orbitale (L)	M	22	19,111	36,551	27,490	4,917	11	21,217	36,449	27,034	5,226	4	20,524	26,462	23,493	2,969	0,776
Orbitale (R)	F	8	17,378	30,416	22,070	4,303	16	14,859	36,605	25,018	6,638	6	26,252	37,853	30,698	5,109	0,349
Orbitale (L)	M	22	18,784	37,776	26,883	5,036	11	20,794	30,201	26,610	3,362	5	23,393	29,732	26,657	2,591	0,718
Orbitale (R)	F	11	8,640	11,832	10,224	0,950	24	8,498	13,040	10,480	1,208	11	8,635	14,724	11,333	1,442	0,174
Orbitale (L)	M	24	8,788	14,076	11,914	1,278	18	9,616	19,821	12,352	2,185	14	8,776	14,111	11,774	1,404	0,884
Orbitale (R)	F	11	9,357	12,282	10,778	1,043	24	7,681	13,101	10,399	1,433	11	9,373	14,778	11,238	1,467	0,468
Orbitale (L)	M	24	8,667	14,673	12,010	1,570	18	10,246	21,929	13,008	2,628	14	9,962	14,680	12,162	1,451	0,530
Zygion (R)	F	11	3,022	8,378	5,282	1,315	24	4,365	12,953	7,913	2,327	11	3,493	10,427	7,684	1,890	0,003 *
Zygion (L)	M	24	3,677	10,963	6,744	2,103	18	3,792	14,645	8,702	3,052	14	6,018	15,007	10,651	2,583	0,000 *
Zygion (R)	F	11	2,897	7,957	5,185	1,548	24	4,935	12,648	8,267	2,390	11	3,236	11,021	8,052	2,310	0,003 *
Zygion (L)	M	24	3,596	11,109	6,851	2,094	18	4,984	16,169	8,810	3,224	14	5,275	15,997	10,406	3,441	0,004 *
Zygion (R)	F	11	4,556	11,904	7,091	1,962	24	5,098	14,588	9,498	2,790	11	6,023	14,263	10,549	2,729	0,013 *
Zygion (L)	M	24	4,315	13,856	8,426	2,390	18	6,028	17,680	8,667	2,912	14	5,168	11,444	8,376	1,748	0,913
Jugale (R)	F	11	5,273	10,834	6,771	1,609	24	4,718	13,295	9,460	2,915	11	7,602	16,839	11,236	3,319	0,006 *
Jugale (L)	M	24	4,934	15,079	8,473	2,882	18	4,971	16,300	8,762	3,304	14	5,403	12,843	9,288	2,083	0,336
Jugale (R)	F	11	6,555	10,853	8,671	1,370	24	7,222	16,489	11,261	2,577	11	7,775	15,725	10,942	2,032	0,015 *
Jugale (L)	M	24	6,048	13,589	9,804	2,060	18	6,234	14,916	10,420	2,538	14	6,345	15,095	11,262	2,365	0,238

(pokračování tabulky 6)

Landmark	Pohlaví	Věk												K-W test (p-hodnota)						
		<39						40-59							>60					
		n	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	n	Min (mm)	Max (mm)	Průměr (mm)	SD	n	Min (mm)		Max (mm)	Průměr (mm)	SD			
Jugale (L)	F	11	6,007	10,522	8,274	1,417	24	6,770	16,630	11,014	2,617	11	7,968	15,969	10,646	2,233	0,009 *			
	M	24	5,128	12,138	8,891	2,012	18	5,571	13,949	9,861	2,488	14	7,787	16,134	10,962	2,827	0,075			
Ektoknochion (R)	F	11	3,299	8,391	5,027	1,496	24	2,558	9,615	6,096	1,643	11	2,798	10,134	6,257	1,938	0,140			
	M	24	3,109	9,740	5,682	1,725	18	3,737	9,623	6,602	1,519	14	3,725	9,185	6,445	1,668	0,271			
Ektoknochion (L)	F	11	3,933	7,863	5,318	1,016	24	3,433	9,858	5,939	1,636	11	3,244	9,352	6,217	1,694	0,396			
	M	24	3,262	8,692	5,139	1,532	18	3,494	8,410	5,692	1,510	14	4,474	9,946	7,297	1,591	0,001 *			
Orbitale superius (R)	F	11	5,444	10,644	8,257	1,430	24	6,194	11,947	9,010	1,310	11	6,308	12,588	9,449	2,003	0,255			
	M	24	7,902	13,605	10,801	1,492	18	5,924	12,625	9,752	1,648	14	6,004	13,974	9,872	1,776	0,208			
Orbitale superius (L)	F	11	4,878	9,896	7,918	1,360	24	6,316	12,032	9,389	1,550	11	4,955	11,678	8,862	2,149	0,058			
	M	24	7,141	13,433	10,282	1,519	18	5,224	12,321	9,879	1,797	14	7,032	13,050	9,676	1,835	0,659			
Inferior malar (R)	F	11	12,921	19,479	15,357	1,775	24	12,696	35,187	18,571	4,463	11	11,826	20,776	17,138	2,717	0,026 *			
	M	24	13,752	26,948	17,338	2,753	18	10,794	21,848	17,785	3,045	14	16,124	25,752	19,650	3,255	0,072			
Inferior malar (L)	F	11	13,577	21,860	16,746	2,086	24	13,914	22,589	18,337	2,629	11	14,968	25,723	18,153	2,853	0,188			
	M	24	14,459	24,194	18,112	2,447	18	11,898	23,456	17,349	3,069	14	15,254	25,769	19,446	2,818	0,187			
Mid-ramus (R)	F	11	14,448	28,075	20,072	3,253	24	17,227	40,158	23,912	5,057	11	17,694	31,350	24,185	4,341	0,061			
	M	24	18,132	34,373	25,301	4,112	18	17,468	36,164	25,757	4,669	14	19,421	33,521	27,077	3,520	0,248			
Mid-ramus (L)	F	11	14,706	25,582	19,608	3,244	24	17,795	37,477	24,012	4,735	11	18,887	32,716	23,556	4,325	0,020 *			
	M	24	18,432	32,643	23,924	3,592	18	19,776	33,714	26,518	3,528	14	19,502	32,931	26,653	3,887	0,030 *			
Mid-mand. border (R)	F	11	7,253	16,011	10,789	2,460	24	7,627	18,618	13,430	3,371	11	8,029	23,101	14,895	4,568	0,049 *			
	M	24	6,164	23,029	13,175	4,172	18	8,301	22,188	13,256	3,932	14	8,725	18,451	13,253	2,518	0,828			
Mid-mand. border (L)	F	11	7,166	15,366	10,879	2,361	24	8,685	20,913	14,892	3,305	11	8,602	26,409	16,075	4,999	0,004 *			
	M	24	6,763	21,119	12,834	4,025	18	8,628	22,444	13,746	3,801	14	10,060	19,626	14,602	2,746	0,297			

(K-W test = Kruskal-Wallis test)

* p < 0,05

6.2.1 Analýza tloušťky měkkých tkání obličeje

Tloušťky měkkých tkání jsme analyzovali s ohledem na pohlaví, věk a asymetrii.

Vliv pohlaví a věku jsme určovali nejprve na souboru 54 jedinců, na nichž bylo možné definovat kompletní sadu landmarků. Druhým souborem bylo 100 jedinců, na nichž jsme analyzovali horní polovinu obličeje. Třetí soubor obsahoval 55 jedinců, na kterém jsme analyzovali tloušťky měkkých tkání dolní poloviny obličeje (viz kap. 4). Všechny skupiny jsme testovali pomocí identických statistických metod.

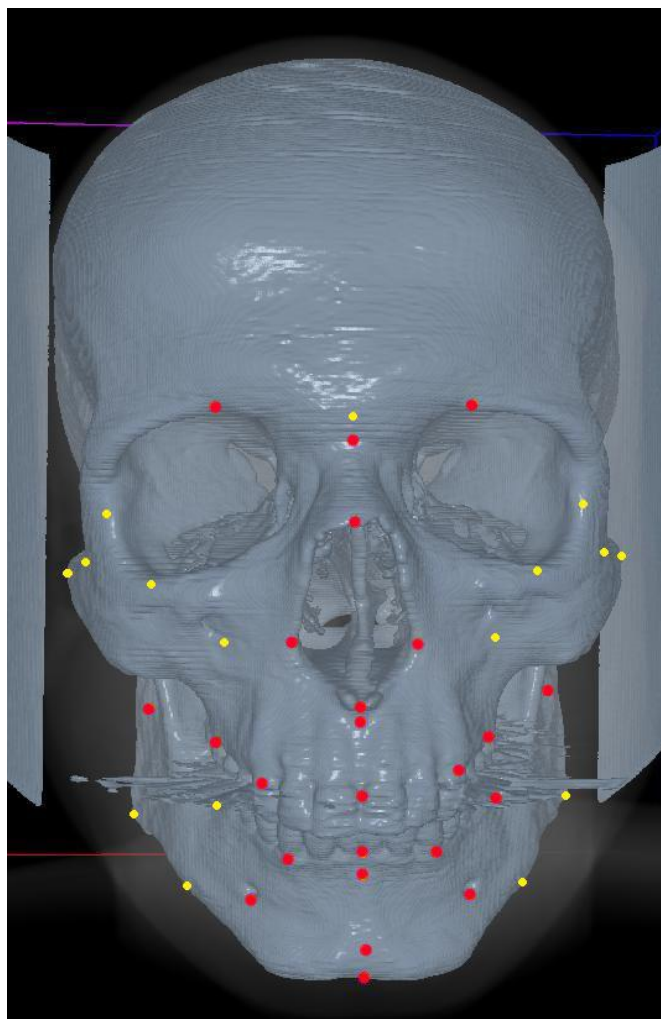
Variabilitu tloušťky měkkých tkání s ohledem na pohlavní dimorfismus jsme testovali nejprve pomocí Shapiro-Wilkova W testu normality a poté pomocí Kolmogorova-Smirnova testu. Dále jsme všechny tři soubory podrobili analýze hlavních komponent a na prvních třech hlavních komponentách provedli Shapiro-Wilkův test normality, Hotellingův test a lineární diskriminační analýzu.

Vliv věku jsme hodnotili pomocí Kruskal-Wallisova testu na všech tloušťkách měkkých tkání obličeje a pomocí multifaktorové analýzy rozptylu (MANOVA) opět na prvních třech hlavních komponentách.

Pro testování asymetrie tloušťky měkkých tkání jsme využili Wilcoxonův párový test.

6.2.1.1 Hodnocení variability obličeje s ohledem na pohlavní dimorfismus

Pomocí Kolmogorova-Smirnova testu byl prokázán signifikantní vliv pohlaví téměř na všech tloušťkách měkkých tkání v mediánní rovině, konkrétně v oblasti bodů nasion, rhinion, spinale/subnasale, subspinale, prosthion/labrale superius, infradentale/labrale inferius, supramentale, pogonion a gnathion. Z bilaterálních bodů se významnost prokázala u tlouštěk měkkých tkání v oblasti bodů mentale, supra canine, infra canine, supra M2, infra M2 (pouze na levé straně), alare, orbitale, orbitale superius a mid-ramus. Všechny signifikantní hodnoty jsou vyšší u mužů než u žen. Kompletní výsledky Kolmogorova-Smirnova testu jsou zobrazeny v tabulce 5 a na obrázku 20.



Obr. 20. Na obrázku jsou červeně zobrazeny kranio-metrické body, na nichž jsou tloušťky měkkých tkání významně ovlivněné pohlavím

Z výsledků je patrné, že pohlavím ovlivněné tloušťky měkkých tkání se nacházejí především v oblasti dolní poloviny obličeje. Abychom mohli tyto výsledky potvrdit, testovali jsme následně tři množiny tlouštěk měkkých tkání – na celém obličeji a dále na jeho horní a dolní polovině.

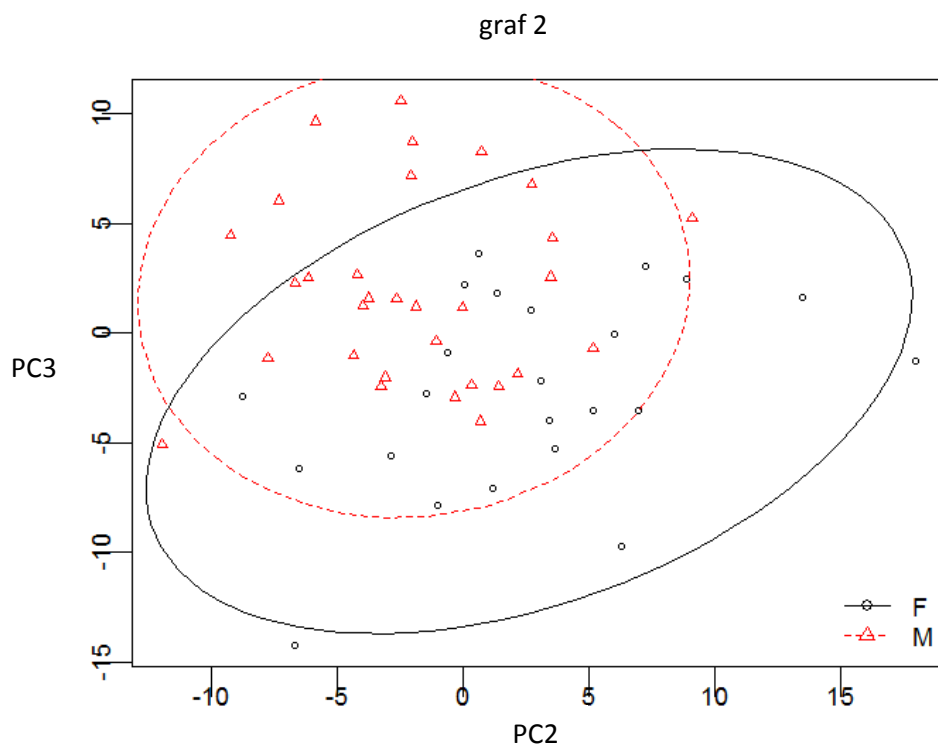
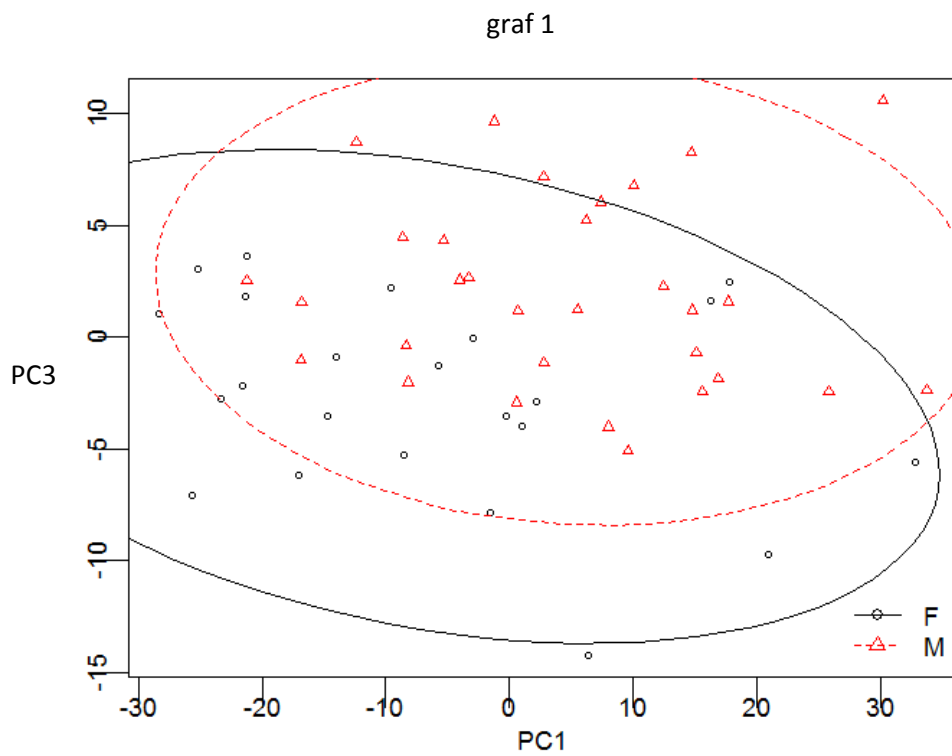
6.2.1.1.1 Hodnocení pohlavního dimorfismu na celém obličejí

Nejprve jsme soubor podrobili analýze hlavních komponent a k dalšímu testování využili tři první hlavní komponenty. Tyto tři hlavní komponenty vysvětlují 72,4 % celkové variability. V tabulce 7 vidíme prvních deset komponent a jejich variabilitu vyjádřenou v procentech.

Klasifikace skupin na základě prvních tří komponent je znázorněna na následujících grafech (graf 1 a 2). Z grafů je patrné, že první komponenta nemá na diskriminaci skupin podle pohlaví významnější vliv. Výrazné oddělení obou skupin je více patrné na grafu 2, kde jsou obě pohlaví oddělena v oblasti druhé a především třetí hlavní komponenty.

Tabulka 7. Přehled variability v prvních 10 komponentách

Variabilita hlavních komponent (%)	
PC1	59.164993346355
PC2	7.71152583501935
PC3	5.6820908708196
PC4	4.05537123268411
PC5	3.54387991077501
PC6	2.31303192504743
PC7	2.24926433131932
PC8	1.85564221050793
PC9	1.73632505158022
PC10	1.57694133231187



Graf 1-2. Grafy rozptylu zobrazují vliv jednotlivých komponent na diskriminaci mužů a žen podle tloušťky měkkých tkání obličeje (F = ženy, M = muži). Graf 1 zobrazuje vliv PC1 a PC3, graf 2 vliv PC2 a PC3.

Normalita souboru byla testována pomocí Shapiro-Wilkova testu. Výsledek tohoto testu dokládá normální rozdělení dat pro obě pohlaví. Kompletní výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.

Na základě výsledků Shapiro-Wilkova testu jsme hodnotili variabilitu měkkých tkání obličeje s ohledem na pohlavní dimorfismus pomocí Hotellingova testu. Výsledek Hotellingova testu na prvních třech hlavních komponentách ukazuje významný vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání obličeje (**p-hodnota = 1.164e-07**).

Kromě tohoto hodnocení byla data analyzována také pomocí lineární diskriminační analýzy. Úspěšnost klasifikace s ohledem na pohlaví byla stanovena na 85,19 %, úspěšnost diskriminační analýzy s cross-validací na 81,48 %. Mužské a ženské pohlaví lze tedy na základě tlouštěk měkkých tkání celého obličeje úspěšně klasifikovat u 85 resp. 81 % jedinců. Kompletní výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 8. Výsledky Shapiro-Wilkova testu

S-W test	Celý obličej		Horní polovina obličeje		Dolní polovina obličeje	
	Muži	Ženy	Muži	Ženy	Muži	Ženy
W	0.955	0.9467	0.9298	0.979	0.9435	0.925
p-hodnota	0.2143	0.2491	0.003226	0.5808	0.09397	0.08521

6.2.1.1.2 Hodnocení pohlavního dimorfismu na horní polovině obličeje

Při statistickém vyhodnocení množiny hodnot pro horní polovinu obličeje pomocí analýzy hlavních komponent bylo zjištěno, že první tři hlavní komponenty, se kterými jsme dále pracovali, vyjadřují celkem 65,4 % celkové variability. V tabulce 10 je uvedeno prvních deset komponent a jejich variabilita vyjádřená v procentech.

Grafy 3 a 4 ukazují výrazné překrývání všech tří komponent při klasifikaci skupin s ohledem na pohlavní dimorfismus. Nejvýraznější vliv můžeme pozorovat v případě druhé komponenty, kde je variabilita mužských tlouštěk měkkých tkání větší. V případě PC3 nabývají jedinci ženského pohlaví častěji kladnějších hodnot.

Shapiro-Wilkův test normality dokládá normální rozložení pouze u žen (viz tabulka 8). Proto byl při hodnocení vlivu pohlavního dimorfismu využito místo Hotellingova testu výsledek permutačního testu. Pohlaví má na tloušťky měkkých tkání v oblasti horní poloviny obličeje významný vliv (**p-hodnota = 0,0035**).

I přes statistickou významnost vlivu pohlaví na tloušťky měkkých tkání horní poloviny obličeje, klasifikační úspěšnost je zde pouze 65 %, u křížového ověření klesá na 62 % (viz tabulka 9). Tento fakt jen potvrzuje výsledek Kolmogorova-Smirnova testu, který ukázal, že významný vliv pohlaví převažuje na tloušťkách měkkých tkání v oblasti dolní poloviny obličeje.

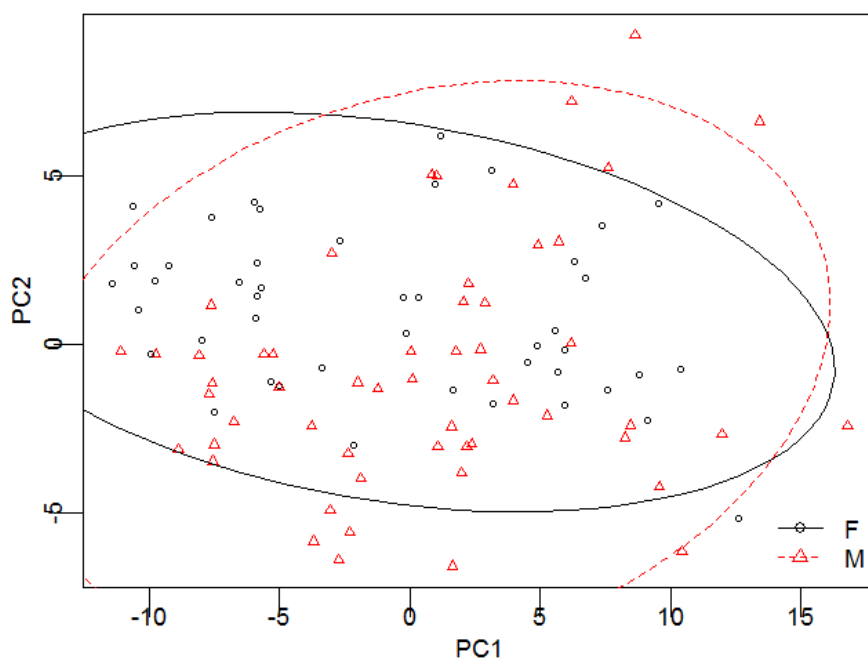
Tabulka 9. Kompletní výsledky lineární diskriminační analýzy

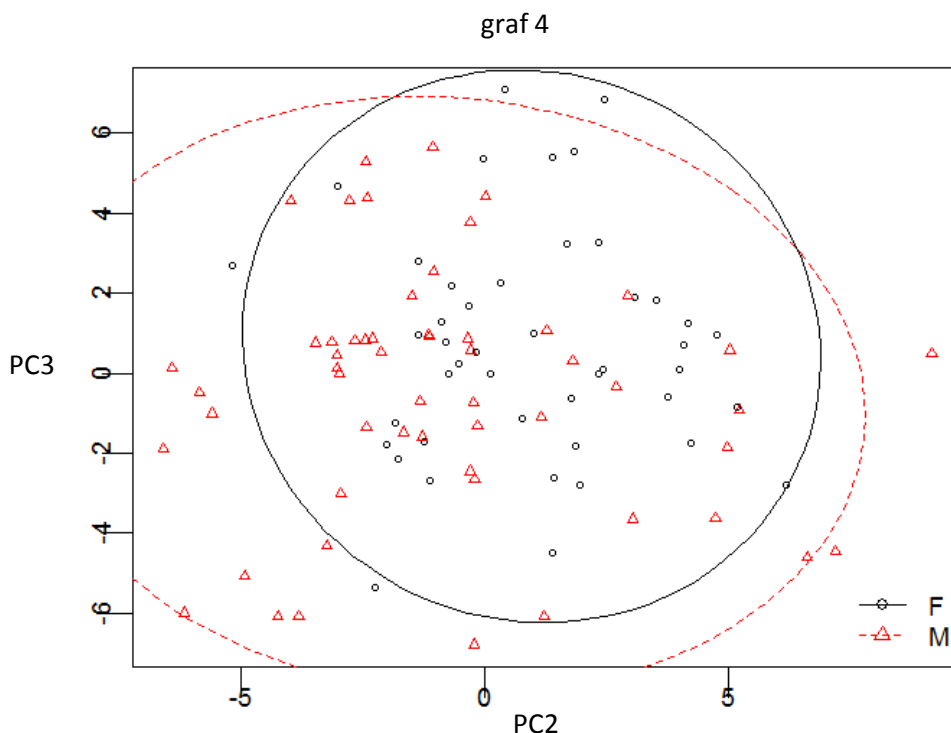
Oblast obličej	Úspěšnost klasifikace		Počet úspěšně klasifikovaných		Počet neúspěšně klasifikovaných		Úspěšnost klasifikace s cross-validation		Počet úspěšně klasifikovaných		Počet neúspěšně klasifikovaných	
	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n
Celý obličej	85,19	19 + 27	82,61 + 87,10	4 + 4	17,39 + 12,90		81,48	18 + 25	78,26 + 80,65	5 + 6	21,74 + 19,35	
Horní polovina obličej	65,00	26 + 39	57,78 + 70,91	19 + 16	42,22 + 29,09		62,00	26 + 36	57,78 + 65,45	19 + 19	42,22 + 34,55	
Dolní polovina obličej	87,27	18 + 30	78,26 + 93,75	5 + 2	21,74 + 6,25		80,00	17 + 27	73,91 + 84,38	6 + 5	26,09 + 15,62	

Tabulka 10. Přehled variability v prvních 10 komponentách

Variabilita hlavních komponent (%)	
PC1	45.6454332680409
PC2	10.5521249215895
PC3	9.37466841303073
PC4	8.37363566572702
PC5	5.51934392989888
PC6	3.80329916003017
PC7	3.45282921927202
PC8	2.7983003578406
PC9	2.49008417702418
PC10	1.82036178934309

graf 3





Graf 3-4. Grafy rozptylu zobrazují vliv jednotlivých komponent na diskriminaci mužů a žen podle tloušťky měkkých tkání obličeje (F = ženy, M = muži). Graf 3 zobrazuje první a druhou komponentu, graf 4 vliv komponenty druhé a třetí.

6.2.1.1.3 Hodnocení pohlavního dimorfismu na dolní polovině obličeje

První tři hlavní komponenty souboru vysvětlují 80,3 % celkové variability. Variabilita prvních deseti komponent je uvedena v tabulce 11.

Z grafů 5 a 6 je patrné, že se obě skupiny v případě první a druhé komponenty prakticky překrývají. Naopak výrazný vliv na diskriminaci obou skupin můžeme pozorovat u třetí komponenty, kdy jedinci mužského pohlaví dosahují v průměru nižších hodnot.

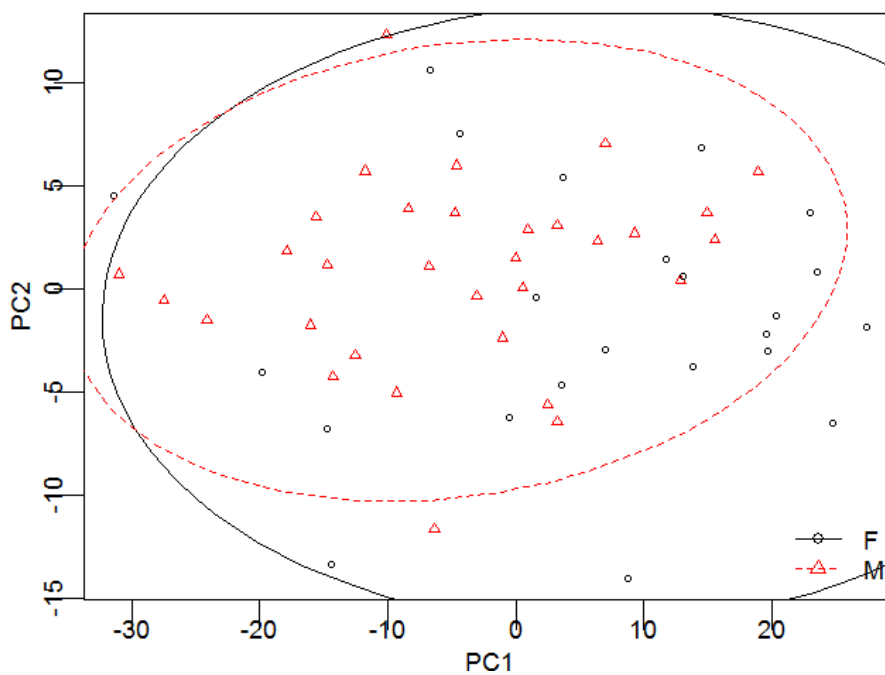
Shapiro-Wilkovým testem normality jsme zjistili normální rozdělení u obou pohlaví (viz tabulka 8). Výsledek Hotellingova testu dokládá signifikantní vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání obličeje (**p-hodnota = 5.514e-08**). Významný vliv pohlaví dokládá i výsledek lineární diskriminační analýzy. U dolní poloviny obličeje byla úspěšnost klasifikace pomocí lineární diskriminační analýzy stanovena na 87,27%. Úspěšnost křížového ověření je 80,00%.

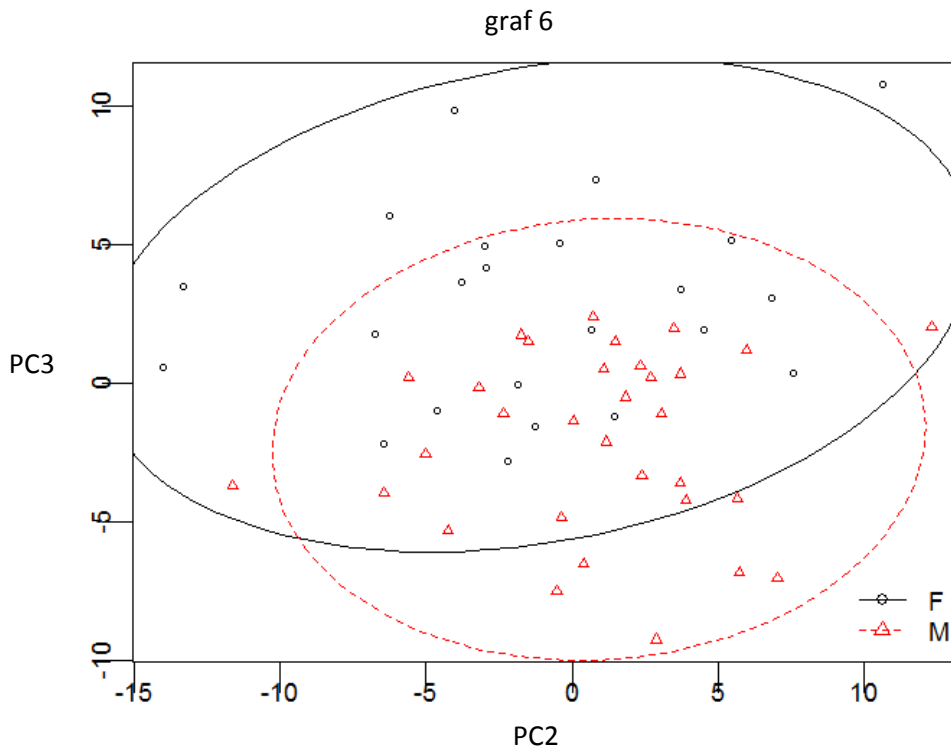
Jedná se tedy o srovnatelné výsledky jako v případě celého obličeje. Kompletní výsledky diskriminační analýzy jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 11. Přehled variability u prvních deseti komponent

Variabilita hlavních komponent (%)	
PC1	66.4048761606732
PC2	8.691013826402
PC3	5.23813667437111
PC4	4.55501101318106
PC5	3.32399332814511
PC6	2.07937354113796
PC7	1.61708908855523
PC8	1.38992354553245
PC9	1.16784600496102
PC10	1.13034957363837

graf 5

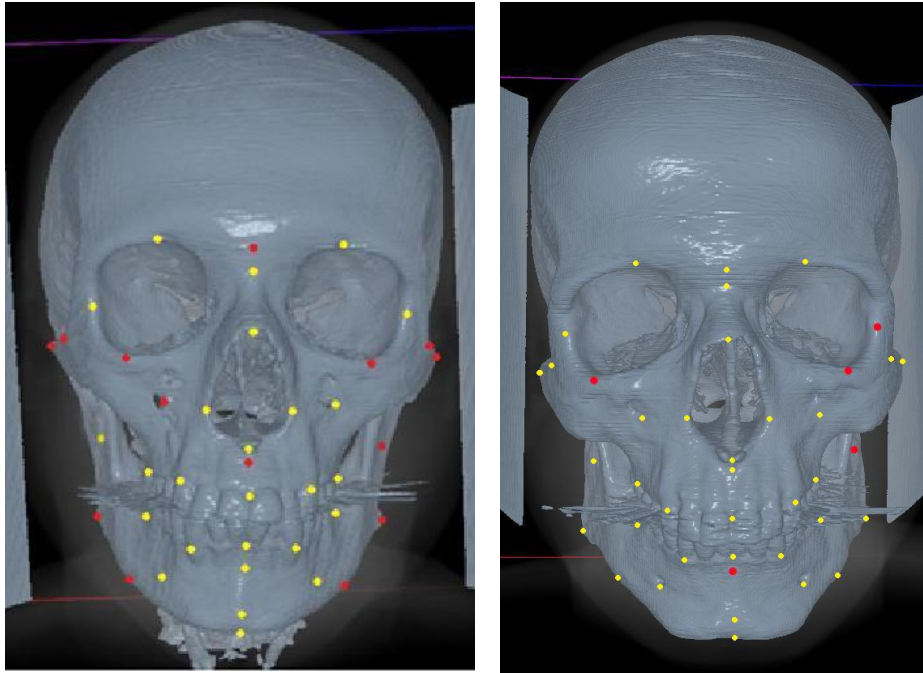




Graf 5-6. Grafy rozptylu zobrazují vliv jednotlivých komponent na diskriminaci mužů a žen podle tloušťky měkkých tkání obličeje (F = ženy, M = muži). Na grafu 5 je zobrazen vliv první a druhé komponenty, na grafu 6 vliv komponenty druhé a třetí.

6.2.1.3 Hodnocení variability obličeje s ohledem na vliv věku

Nejprve jsme hodnotili variabilitu tloušťky měkkých tkání obličeje s ohledem na vliv věku pomocí Kruskal-Wallisova testu. Výsledek prokázal, že více hodnot ovlivněných věkem se nachází u žen. U mužů byl signifikantní vliv prokázán pouze na tloušťkách měkkých tkání v oblasti bodů supramentale, orbitale, ektokonchion levé strany a mid-ramus levé strany. U žen se významný vliv věku prokázal na tloušťce měkkých tkání v oblasti bodů glabella, subspinale, gonion, orbitale, zygion, jugale, inferior malar pravé strany, mid-ramus levé strany a obou bodech mid-mandibular border. Většina zmíněných hodnot roste spolu s věkem. Pouze u žen hodnoty v oblasti bodů orbitale, jugale, inferior malar pravé strany a mid-ramus levé strany stoupají od první ke druhé věkové skupině a ve třetí věkové skupině můžeme sledovat jejich pokles. Kompletní výsledky tohoto testu jsou uvedeny v tabulce 6 a na obrázku 21 a 22. Z výsledků je zřejmé, že více měkkých tkání ovlivněných věkem se nachází v oblasti horní poloviny obličeje, což dokládají i výsledky z analýzy rozptylu.



Obr. 21-22. Oba obrázky zachycují výsledky Kruskal-Wallisova testu – body, na nichž jsou tloušťky měkkých tkání významně ovlivněné pohlavím, jsou zobrazeny červeně. Nalevo jsou zobrazeny výsledky pro ženy, napravo pro muže.

V případě hodnocení celého obličeje pomocí metody MANOVA byl doložen významný vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání. Zároveň ale tato metoda nedokládá statisticky významný vliv věku na tloušťku měkkých tkání obličeje, ani významný vliv vzájemné interakce pohlaví a věku (viz tabulka 12).

Na horní polovině obličeje dokládají výsledky analýzy rozptylu významný vliv pohlaví i věku na hodnoty tloušťky měkkých tkání. Signifikantní je i vliv vzájemné interakce obou komponent (viz tabulka 12).

Výsledky analýzy rozptylu na dolní polovině obličeje dokládají významný vliv pohlaví na hodnoty tloušťky měkkých tkání. Na rozdíl od horní poloviny obličeje zde není prokázán vliv věku na tloušťky měkkých tkání. Signifikantní není ani vliv vzájemné interakce obou komponent (viz tabulka 12).

Tabulka 12. Přehled výsledných p-hodnot z analýzy rozptylu

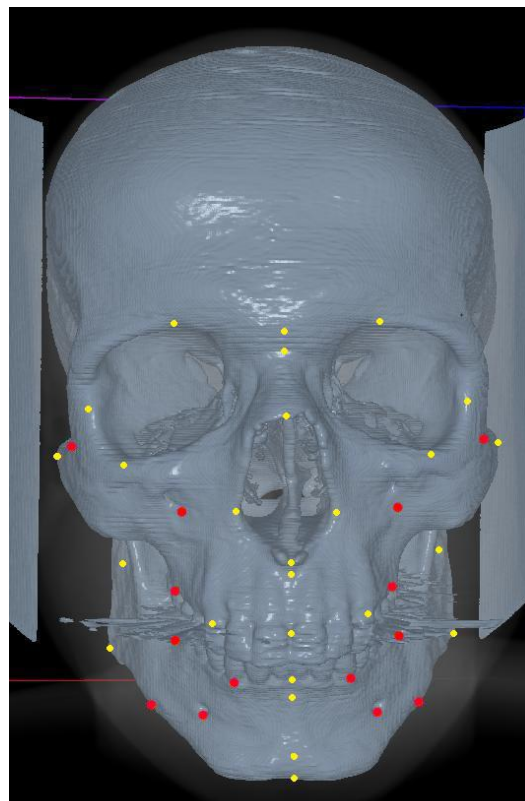
Oblast obličeje	Vliv pohlaví p-hodnota	Vliv věku p-hodnota	Vzájemná interakce pohlaví a věku p-hodnota
Celý obličej	4,056527e-05*	1.740602e-01	4.702088e-01
Horní polovina	0.0459384423*	0.0005724775*	0.0113474614*
Dolní polovina	3,968775e-05*	3,754378e-01	6,643542e-01

* $p < 0,05$

6.2.1.4 Hodnocení asymetrie měkkých tkání obličeje

Hodnoty tloušťky měkkých tkání v oblasti bilaterálních landmarků jsme testovali pomocí Wilcoxonova párového testu, kterým byl zjištěn signifikantní vliv asymetrie u sedmi hodnot měkkých tkání v oblasti bodů jugale, inferior malar, supra M2, infra M2, infra canine, mentale a mid-mandibular border. Hodnoty v oblasti bodů jugale, supra M2, infra M2, infra canine a mentale jsou vyšší na pravé straně u obou pohlaví. Naopak u bodů inferior malar a mid-mandibular border jsou hodnoty u obou pohlaví vyšší na straně levé. Kompletní výsledky Wilcoxonova párového testu jsou uvedeny v tabulce 13 a obrázku 23.

Obr. 23. Na obrázku jsou červeně zobrazeny body, na nichž jsou tloušťky měkkých signifikantní z hlediska asymetrie.



Tabulka 13. Výsledky párového t-testu

Landmark	Počet jedinců (n)	Wilk. párový test (p-hodnota)
Mentale	102	0,000*
Gonion	102	0,673
Supra canine	87	0,498
Infra canine	93	0,000*
Supra M2	71	0,009*
Infra M2	66	0,042*
Alare	102	0,088
Orbitale	102	0,420
Zygion	102	0,702
Jugale	102	0,000*
Ektokonchion	102	0,680
Orbitale superius	102	0,090
Inferior malar	101	0,042*
Mid-ramus	102	0,077
Mid-mandibular border	102	0,003*

* $p < 0,05$

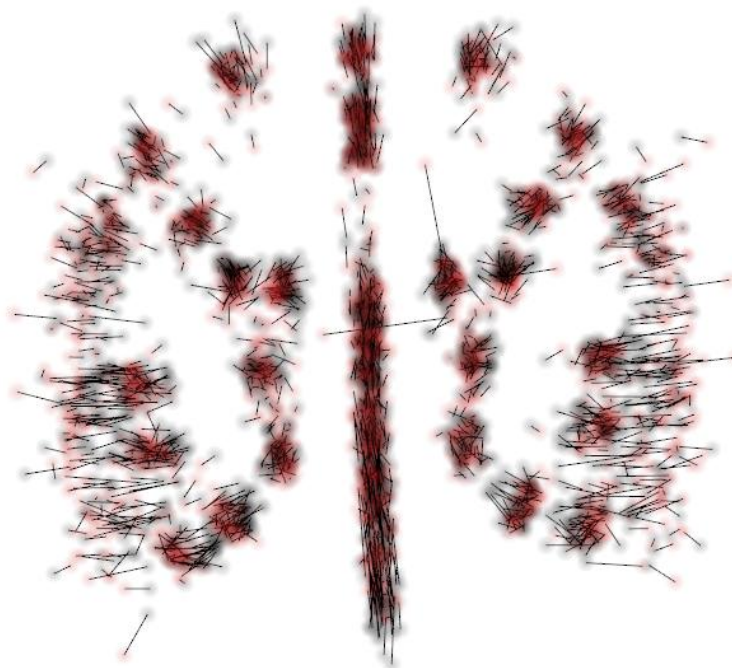
6.3 Vztah měkkého a tvrdého profilu obličeje: faciální rekonstrukce

Pro predikci umístění landmarků na měkkém profilu na základě polohy kranio-metrických landmarků jsme vycházeli z metody popsané v kapitole 5.4. Tímto postupem byla u souboru jedinců s kompletní sadou landmarků stanovena průměrná chyba umístění landmarků na měkkém profilu obličeje na 5,994 mm. Kompletní výsledky jsou zobrazeny v tabulce 14. Výsledky jsou také vizualizovány na obrázku 24, kde lze vidět predikované (červené) a očekávané (černé) hodnoty.

Tabulka 14. Výpočet chyby u predikovaných landmarků na měkkém profilu obličeje

Min (mm)	Průměr (mm)	Max (mm)
4,067	5,994	8,580

(Min = minimum, Max = maximum)



Obr. 24. Na obrázku jsou znázorněny predikované (červené) a očekávané (černé) hodnoty landmarků na měkkém profilu obličeje.

7. DISKUSE

Tato diplomová práce byla zaměřena na hodnocení tloušťky měkkých tkání obličeje dospělé české populace za účelem zpřesnění metody kraniofaciální rekonstrukce ve forenzní antropologii. V práci bylo hodnoceno 102 CT snímků hlav dospělé české populace, z toho 46 žen a 56 mužů, ve věkovém intervalu 21 až 83 let. Tloušťky měkkých tkání byly měřeny mezi 40 korespondujícími landmarky na lebce a obličeji a hodnoceny s ohledem na pohlaví, věk a vliv asymetrie v návaznosti na studie Panenková et al. (2012), De Greef et al. (2006).

Sledování variability hodnot tloušťky měkkých tkání u české dospělé populace

V této práci byly definovány hodnoty pro tloušťky měkkých tkání obličeje u české dospělé populace a to s ohledem na pohlavní dimorfismus a věk. Naměřené hodnoty jsou obvykle vyšší než průměrné hodnoty uvedené v jiných studiích. Jedním z hlavních důvodů může být velikost a rozdílnost vzorků či odlišné metody využití při sběru dat (např. ultrazvuk ve studii De Greef et al. 2006 a Manhein et al. 2000 či jehličková metoda ve studii Simpson a Henneberg 2002). Příčinou může být ale i rozdílná tělesná konstituce jedinců či velká variabilita hodnot měkkých tkání na některých landmarkích (Tilotta et al. 2009). Velká variabilita je známá např. pro body prosthion, gonion či jugale.

V oblasti bodu **glabela** byly zjištěny nižší hodnoty tloušťky měkkých tkání ve studii De Greef et al. (2006), Panenková et al. (2012), Manhein et al. (2000), Simpson a Henneberg (2002), kteří pracovali s euroamerickou populací. Ke stejnému závěru dospěli také Domaracki a Stephan (2006) u australské populace, de Almeida et al. (2013) a Tedeschi-Oliveira et al. (2009) u jihoamerických populací, Dong et al. (2012) a Hwang et al. (2012) u asijských populací či Sahní et al. (2008) u severoamerických indiánů. Vyšší hodnoty tloušťky měkkých tkání v bodě glabela u žen byly zaznamenány pouze v práci Sipahioğlu et al. (2012) u turecké populace a v práci Guyomarc'h et al. (2013) u populace francouzské. U mužů byly vyšší hodnoty zjištěny také ve studii Domaracki a Stephan (2006) či Simpson a Henneberg (2002).

V **oblasti očí** (orbitale superius, orbitale a ektokonchion) byly zjištěny vyšší hodnoty měkkých tkání než ve výše zmíněných studiích, s výjimkou bodu orbitale, který vykazuje velkou variabilitu v tloušťce měkkých tkání, jak dokládá i Tilotta et al. 2009.

V **oblasti nosu** (nasion, rhinion, alare a spinale/subnasale) dosahují výsledky v této diplomové práci opět vyšších hodnot než výsledky v uvedených studiích. V bodě nasion a rhinion je náš výsledek srovnatelný s dalšími euroamerickými populacemi (Guyomarc'h et al. 2013, De Greef et al. 2006, Simpson a Henneberg 2002), v bodě rhinion pak i s prací Dong et al. (2012), Ruiz (2013) a Domaracki a Stephan (2006). Vyšší výsledky pro bod rhinion uvádí jihoamerické studie (Tedeschi-Oliveira et al. 2009, De Almeida et al. 2013) a Sipahioglu et al. (2012). Hodnoty pro bod alare byly porovnány se studií Simpson a Henneberg (2002), která opět uvádí vyšší hodnoty, a se studií de Almeida et al. (2013), kde jsou naopak průměrné hodnoty nižší. I v oblasti tohoto bodu je známa velká variabilita v tloušťkách měkkých tkání (Tilotta et al. 2009).

Tato diplomová práce byla zaměřena také na hodnocení měkkých tkání v **oblasti tváří** (jugale, zygion a inferior malar). Pro bod jugale bylo využito pouze srovnání s prací Guyomarc'h et al. (2013), kde byly zjištěny vyšší průměrné hodnoty u mužů i žen. Pro bod zygion byly u žen zjištěny srovnatelné výsledky s dalšími euroamerickými populacemi (Simpson a Henneberg 2002 a Panenková et al. 2012). Vyšší hodnoty byly naměřeny pouze v práci Guyomarc'h et al. (2013) a de Almeida et al. (2013). U mužů byly prokázány vyšší hodnoty v bodě zygion také v práci Simpson a Henneberg (2002), Tedeschi-Oliveira et al. (2009) a Panenková et al. (2012). V bodě inferior malar převyšují průměrné hodnoty této diplomové práce všechny zmiňované studie, a to s výjimkou práce Hwang et al. (2012). V oblasti tváří byla zaznamenána velká variabilita v tloušťkách měkkých tkání, na což poukazuje také De Greef et al. (2006).

V **oblasti zubů** (subspinale, prosthion/labrale superius, supra canine, supra M2, infradentale/labrale inferius, infra canine a infra M2) byly v této diplomové práci zaznamenány vyšší průměrné hodnoty tloušťky měkkých tkání než ve zmiňovaných studiích. Pouze práce Guyomarc'h et al. (2013) vykazuje vyšší hodnoty téměř na všech landmarcích v oblasti zubů. V bodě subspinale byly zaznamenány vyšší hodnoty také v práci Hwang et al. (2012) a Ruiz (2013), v bodě prosthion v práci Sipahioglu et al (2012), Ruiz (2013) a Panenková et al. (2012), v bodě supra canine v práci de Almeida et al. (2013), Hwang et al. (2012), v bodě infra canine v práci De Greef et al. (2006), Hwang et al. (2012) a de Almeida et al. (2013).

V **oblasti dolní čelisti** (supramentale, pogonion, gnathion, mentale, mid-mandibular border, gonion a mid-ramus) byly naměřeny vyšší hodnoty tloušťky měkkých tkání.

Výjimkou je opět studie Guyomarc'h et al. (2013). V bodě supramentale byly zaznamenány vyšší hodnoty u jihoamerických populací (Tedeschi-Oliveira et al. 2009, de Almeida et al. 2013 a Ruiz 2013). Tyto populace vykazují vyšší hodnoty i v bodě gnathion. Landmarky v oblasti dolní a horní čelisti jsou spojeny s velkou variabilitou měkkých tkání, protože rozdílné postavení zubů může hrát významnou roli při jejich měření. Další rozdíly mohou být způsobené různým postavením a tvarem rtů či variabilní morfologií v oblasti mandibulárního úhlu (Tilotta et al. 2009).

Při srovnání výsledků jednotlivých studií byla zjištěna velká variabilita hodnot pro tloušťky měkkých tkání obličeje a nelze říci, že by se populace vzájemně významně odlišovaly. Jak upozorňují Stephan a Simpson (2008), větší variabilitu nalezneme spíše v rámci studií zaměřených na stejnou populaci. Důvodem je jednak právě rozdílné složení vzorků ale i rozdílné techniky využití při měření tloušťky měkkých tkání. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že není žádoucí vytvářet standardy pro každou populaci zvlášť, ale spíše se pokusit o syntézu existujících databází.

Sledování variability tloušťky měkkých tkání obličeje s ohledem na pohlavní dimorfismus

V této práci byla hodnocena variabilita tloušťky měkkých tkání s ohledem na pohlavní dimorfismus a věk na třech oblastech obličeje. Byla zvolena množina hodnot pro celý obličej, horní polovinu obličeje a dolní polovinu obličeje. Hlavním cílem bylo jednak definovat průměrné hodnoty a variabilitu tloušťky měkkých tkání, a jednak zjistit, zda určitá klasifikační komponenta ovlivňuje hodnoty tloušťky měkkých tkání na celém obličejí či některé jeho oblasti. Signifikantní rozdíl mezi muži a ženami byl prokázán na celém obličejí, stejně tak na jeho horní i dolní polovině. Výsledek klasifikace byl ale na horní polovině obličeje výrazně nižší. Naopak na dolní polovině obličeje dosahovala klasifikace podle pohlaví úspěšnosti až 87%. Po vyhodnocení vlivu pohlaví na jednotlivé tloušťky měkkých tkání pomocí Kolmogorova-Smirnovova testu bylo prokázáno, že nejvíce je pohlavím ovlivněna oblast glabelly, nosu a horní a dolní čelisti. Podobné výsledky jsou uvedeny v práci Shrimpton et al. (2014), kde byl prokázán signifikantní vliv pohlaví v oblasti glabely, nosu, mandibuly a také oblasti krku. V mediánní rovině byly významně ovlivněné pohlavím tloušťky měkkých tkání téměř na všech landmarcích. Stejný výsledek uvádí také Codinha (2009) u portugalské populace.

Přesto, že byl prokázán pohlavní dimorfismus u některých hodnot tloušťky měkkých tkání obličej, větší variabilitu nalezneme spíše v rámci jednoho pohlaví než mezi oběma pohlavími (Stephan et al. 2005). Muži převyšují v průměrných tloušťkách měkkých tkání ženy a to téměř na všech landmarcích. Stejný výsledek potvrzují i další studie, např. Simpson a Henneberg (2002), Tedeschi-Oliveira et al. (2009), Panenková et al. (2012) či Manhein et al. (2000). Toto pravidlo ale nepotvrzuje např. novější práce de Almeida et al. (2013), v níž ženy mají na mnoha bodech vyšší hodnoty než muži. V této diplomové práci se vyšší hodnoty u žen prokázali pouze v bodech zygion (Hwang et al. 2012) a jugale, přičemž tloušťky měkkých tkání v oblasti bodů ektokonchion a mid-mandibular border jsou u obou pohlaví srovnatelné. Rozdíly mezi pohlavími se ale pohybují u většiny bodů pouze v rozmezí 1-2 mm a tato skutečnost nemá v praxi na výslednou podobu významný vliv. S tímto tvrzením souhlasí také např. de Almeida et al. (2013) či De Greef et al. (2009).

V oblasti bodu **glabella** nebyl v této diplomové práci zjištěn signifikantní rozdíl v tloušťce měkkých tkání s ohledem na pohlavní dimorfismus. Stejný výsledek dokládá také většina studií (de Almeida et al. 2013, Dong et al. 2012, Hwang et al. 2012, Sipahioglu et al. 2012, Simpson a Henneberg 2002, Domaracki a Stephan 2006, Ruiz 2013, Panenková et al. 2012). Na signifikantní vliv pohlaví v tomto bodě naopak upozorňuje Tedeschi-Oliveira et al. (2009), Sahni et al. (2008) a Manhein et al. (2000). Muži mají v tomto bodě vyšší hodnoty než ženy.

V **oblasti očí** byl zjištěn signifikantní vliv pohlaví pouze v bodě orbitale superius, což potvrzuje také Hwang et al. (2012), Panenková et al. (2012), Manhein et al. (2000) a Sahni et al. (2008). Naopak vliv pohlaví neprokázali studie u některých mimoevropských populací (de Almeida et al. 2013, Domaracki a Stephan 2006 a Dong et al. 2012). Významný vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání v bodě orbitale byl doložen pouze u asijské populace (Dong et al. 2012).

V **oblasti nosu** byl prokázán signifikantní vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání u všech definovaných bodů. Tento výsledek nepotvrzuje ani jedna ze zmiňovaných studií. Nejčastěji byl vliv pohlaví prokázán v bodě nasion (Simpson a Henneberg 2002, Manhein et al. 2000, Dong et al. 2012, Hwang et al. 2012, Panenková et al. 2012, Guyomarc'h et al. 2013), dále v bodě rhinion (Ruiz 2013, Manhein et al. 2000 a Guyomarc'h et al. 2013) a v bodě subnasale (Simpson a Henneberg 2002). Naopak u některých mimoevropských

populací (de Almeida et al. 2013, Sahni et al. 2008 a Domaracki a Stephan 2006) nebyl prokázán signifikantní vliv pohlaví ani v jednom bodě v oblasti nosu.

V **oblasti tváří** nebyl prokázán signifikantní vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání ani na jednom definovaném landmarku (Simpson a Henneberg 2002, Dong et al. 2012, Hwang et al. 2012, Tedeschi-Oliveira et al. 2009 a Ruiz 2013). Vliv pohlaví prokázali pouze de Almeida et al. (2013) na inferior malar pravé strany, Panenková et al. (2012) v bodě inferior malar, Guyomarc'h et al. (2013) v bodě jugale a Tilotta et al. (2009) v bodech jugale a ektokonchion.

V **oblasti zubů** byl prokázán významný vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání u všech definovaných bodů s výjimkou bodu infra M2 pravé strany. Významný vliv pohlaví téměř na všech bodech nebyl v této oblasti potvrzen v žádné studii. Nejčastěji potvrzuje signifikantní vliv Hwang et al. (2012) a to s výjimkou bodů supra M2 a infra M2. Studie zaměřené na euroamerické populace poukazují nejčastěji na vliv pohlaví v bodě subspinale (Guyomarc'h et al. 2013, Manhein et al. 2000, Panenková et al. 2012), dále také v bodě prosthion/labrale superius (Guyomarc'h et al. 2013, Simpson a Henneberg 2002) a supra canine (Guyomarc'h et al. 2013, Manhein et al. 2000). Signifikantní vliv pohlaví v bodech subspinale a prosthion/labrale superius byl potvrzen také u jihoamerických populací (de Almeida et al. 2013, Tedeschi-Oliveira et al. 2013, Ruiz 2013).

V **oblasti dolní čelisti** byl prokázán vliv pohlaví na tloušťky měkkých tkání v bodech supramentale (Dong et al. 2012, Ruiz 2013, Manhein et al. 2000, Hwang et al. 2012), pogonion (Guyomarc'h et al. 2013, Manhein et al. 2000), gnathion (Manhein et al. 2000, Dong et al. 2012, Ruiz 2013, Hwang et al. 2012), mentale (Tilotta et al. 2009, Guyomarc'h et al. 2013) a mid-ramus (Guyomarc'h et al. 2013, Simpson a Henneberg 2002). Zároveň nebyl prokázán významný vliv pohlaví v oblasti bodů mid mandibular border a gonion, což se potvrdilo i v zahraničních studiích, s výjimkou studií Sahni et al. (2008) a Manhein et al. (2000), které potvrdily vliv pohlaví v bodě gonion.

Hodnocení variability tloušťky měkkých tkání obličeje s ohledem na vliv věku

Významný vliv věku v oblasti bodu **glabella** byl prokázán pouze u žen, kde hodnota tloušťky měkkých tkání roste spolu s věkem. Stejný výsledek dokládá také studie Panenková et al. (2012).

Je známo, že v **oblasti očí** se tloušťky měkkých tkání zvyšují s věkem (Wilkinson 2004). V této diplomové práci byl významný vliv věku prokázán v bodě orbitale u obou pohlaví a v bodě ektokonchion u mužů. U žen hodnoty v bodě orbitale narůstají od první ke druhé věkové skupině a poté klesají, u mužů hodnoty narůstají s věkem. Stejný výsledek byl také publikován v práci Panenková et al. (2012) v bodě orbitale u žen. Ve stejné práci byl potvrzen i signifikantní vliv v bodě orbitale superius u žen, což dokládá také Sahni et al. (2008).

V **oblasti nosu** nebyl prokázán signifikantní vliv věku v žádném z definovaných landmarků. Ke stejnému výsledku dospěli také Panenková et al. (2012). Signifikantní vliv věku byl zjištěn pouze v práci Sipahioğlu et al. (2012) v bodě nasion u mužů, kde hodnota tloušťky měkkých tkání stoupá s věkem a klesá v poslední věkové skupině. Věk je v této studii členěn na čtyři skupiny (18-34 let, 35-45 let, 45-55 let, > 55 let).

V **oblasti tváří** byl zjištěn signifikantní vliv věku pouze u žen a to v bodech jugale, kde hodnoty měkkých tkání rostou s věkem, zygion levé strany a inferior malar pravé strany, kde hodnoty narůstají u druhé věkové skupiny a poté klesají. Vliv věku na tloušťku měkkých tkání v těchto bodech nebyl potvrzen v žádné další studii.

V **oblasti zubů** jsme potvrdili vliv věku v bodě subspinale u žen, kde tloušťka měkkých tkání roste spolu s věkem. Tato skutečnost je v rozporu s tvrzením, že se tloušťka měkkých tkání u landmarků v oblasti úst (subspinale, labrale superius a supra canine) snižuje s věkem (De Greef et al. 2009, Wilkinson 2004). Většina studií potvrzuje pokles hodnot pouze u poslední věkové skupiny (Sipahioğlu et al. 2012, Panenková et al. 2012, Sahni et al. 2008).

V **oblasti dolní čelisti** jsme prokázali významný vliv věku u mužů v bodě supramentale a mid-ramus levé strany, kde hodnoty tloušťky měkkých tkání rostou s věkem. Vliv věku u žen byl potvrzen v bodě mid-ramus, kde hodnoty stoupají u druhé věkové skupiny a poté klesají, v bodě mid mandibular border pravé strany a gonion, kde hodnoty rostou s věkem. Signifikantní vliv věku byl prokázán pouze v bodě gnathion u žen v práci Sahni et al. (2008) a v bodě supramentale v práci Guyomarc'h et al. (2013).

Hodnocení vlivu asymetrie u hodnot měkkých tkání na bilaterálních bodech

V této diplomové práci byl prokázán vliv asymetrie na tloušťky měkkých tkání v oblasti více landmarků než v jiných studiích (Ruiz 2013, Tedeschi-Oliveira et al. 2009, Sahni et al. 2008, Hwang et al. 2012, Domaracki a Stephan 2006). Konkrétně se jednalo o sedm bilaterálních bodů. Pouze De Greef et al. (2006) zaznamenali významný vliv asymetrie u 12 z 24 sledovaných landmarků. Pomocí Wilcoxonova párového testu byl v této diplomové práci prokázán signifikantní vliv asymetrie v oblasti bodů jugale, inferior malar, supra M2, infra M2, infra canine, mentale a mid-mandibular border. V mnoha studiích zaměřených na tloušťku měkkých tkání nebyly zjištěny žádné významné rozdíly mezi pravou a levou stranou obličeje (Sahni et al. 2008, Domaracki a Stephan 2006, Hwang et al. 2012). Ve studii De Greef et al. (2006) byl, stejně jako v této diplomové práci, prokázán významný vliv asymetrie v bodě inferior malar, supra canine a infra M2. Významný vliv asymetrie v bodě infra M2 dokládá i Ruiz (2013). V této studii byl potvrzen i vliv asymetrie na hodnoty tloušťky měkkých tkání v bodě zygion. Tedeschi-Oliveira et al. (2009) poukazuje na významný vliv asymetrie v bodě gonion, což potvrzuje i De Greef et al. (2006). V této diplomové práci byla na pěti signifikantních tloušťkách měkkých tkání prokázána vyšší hodnota na pravé straně, na ostatních bodech (inferior malar a mid mandibular border) na straně levé. Hodnoty ve studii Ruiz (2013) byly vyšší na levé straně. Taktéž Sahni et al. (2008) poukazuje na vyšší hodnoty na levé straně, i když nedokládá signifikantní vliv asymetrie. Naopak v práci De Greef et al. (2006) dosahují tloušťky měkkých tkání vyšších hodnot většinou na pravé straně.

Sledování vztahu měkkého a tvrdého profilu: faciální rekonstrukce

Část diplomová práce byla zaměřena na predikci rekonstrukce měkkých tkání obličeje pomocí metod geometrické morfometrie a metod statistických. Na základě metody PCA, TPS a mnohorozměrné lineární regrese byla stanovena průměrná chyba polohy landmarků na 5,994 mm. Navržená metoda je tedy pro kraniofaciální rekonstrukci v tuto chvíli nedostatečně spolehlivá. Výsledek může být ovlivněn nízkým zastoupením jedinců v souboru, který byl k testování této metody využit. Důvodem může být také skutečnost, že pohlaví a věk, které byly využity jako prediktory, nemají dostatečně významný vliv na výslednou podobu obličeje (Stephan et al. 2005, de Almeida et al. 2013, De Greef et al. 2006). Pro porovnání uvádíme

metodu Claes et al. (2006) a Vandermeulen et al. (2006). Obě metody využívají CT snímky jedinců a vytváří kraniofaciální rekonstrukce na základě landmarkových metod.

Metoda Claese et al. (2006), která využívá analýzu PCA a TPS deformace, dosahuje průměrné chyby 1,14 mm. Přesnost rekonstrukce obličeje dokládá i 100% úspěšnost identifikace při použití této metody (Claes et al. 2006). Tato studie využívá 118 jedinců a jedním z důvodů úspěšnosti metody může být zohlednění BMI jakožto jednoho z prediktorů při tvorbě obličeje. BMI zohledňuje také studie Vandermeulen et al. (2006), která dosahuje chyby v predikci 1,9 mm. Vyšší chybu vykazuje pouze oblast tváří a nosu, kde se chyba pohybuje mezi 2-3 mm. Naopak metoda Claese et al. (2006) uvádí, že vyšší chyba v predikci landmarků je zachycena v oblasti očí a brady.

Také landmarková metoda rekonstrukce obličeje v práci Vanezis et al. (2000), která pracuje především s deformací pomocí TPS, zaznamenala vysokou úspěšnost při identifikaci jedince. Úspěšnost rekonstrukce podoby nemusí ale nutně znamenat úspěšnou identifikaci a naopak. Úspěšnost identifikace ovlivňuje kromě přesnosti rekonstrukce i počet hledaných osob, velikost populace či stáří nalezené osoby (Vanezis et al. 2000). Méně přesná rekonstrukce může ale na druhou stranu přispět k nesprávné identifikaci. Rozpoznání obličeje může být ovlivněno použitím nesprávných doplňujících prvků (např. typ účesu, barva vlasů, očí, pokožky apod.) (Vanezis et al. 2000).

Při porovnání výsledků této diplomové práce s výsledky studií Claes et al. (2006) a Vandermeulen et al. (2006) lze předpokládat, že je možné chybu v predikci polohy landmarků zmenšit zohledněním BMI komponenty. Otázkou zůstává, zda má tato komponenta tak významný vliv na polohu jednotlivých bodů při rekonstrukci obličeje nebo spíše ovlivňuje úspěšné rozpoznání osoby (Starbuck a Ward 2007). Dalším postupem pro minimalizaci chyby predikovaných landmarků by mohlo být vytipování některých méně přesných landmarků a jejich následné vynechání při samotné rekonstrukci obličeje.

Přesnost počítačové rekonstrukce obličeje je velmi kontroverzním tématem (Stephan 2005, Wilkinson 2005). Podle některých autorů (např. Vandermeulen et al. 2006) je metoda založena především na měření tloušťky měkkých tkání, které mohou být ovlivněny zejména rozdílným zastoupením jedinců v jednotlivých souborech či rozdílnými technikami využitými při sběru dat. Využívání průměrných hodnot pro tloušťky měkkých tkání nemusí ale vždy odpovídat hodnotám u daného jedince (Nelson a Michael 1998). Problémem přesnosti

rekonstrukce mohou být samy landmarkové metody, neboť je velmi těžké predikovat celé obrysy obličeje z několika málo bodů (Nelson a Michael 1998). V tomto ohledu by lepších výsledků mohly dosahovat spíše metody rekonstrukce založené na obrysech (Qautrehomme et al. 1997) či na polygonálních sítích (Turner et al. 2005).

8. ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na hodnocení tloušťky měkkých tkání obličeje u dospělé české populace s ohledem na pohlaví a věk, popř. vliv asymetrie u bilaterálních ladnmarků. Výsledky diplomové práce je možné shrnout do následujících bodů:

1. Byly vytvořeny standardy průměrných hodnot i variability celkem 40 tlouštěk měkkých tkání pro českou populaci.
2. Pohlavní dimorfismus tlouštěk měkkých tkání byl výraznější v dolní polovině obličeje než v horní polovině obličeje.
3. Klasifikace pohlaví na základě tlouštěk měkkých tkání obličeje (81,48 % s cross-validací) je srovnatelná s výsledky klasifikace pro dolní polovinu obličeje (80,00 % s cross-validací).
4. Klasifikace pohlaví na základě tlouštěk měkkých tkání horní poloviny obličeje je podstatně nižší (62,00 % s cross-validací).
5. Byl prokázán vliv věku na tloušťky měkkých tkání v oblasti horní poloviny obličeje.
6. Byla prokázána asymetrie u sedmi bilaterálních bodů (tj. jugale, infra canine, supra M2, infra M2, infra canine, mentale a mid-mandibular border) a to ve prospěch pravé strany, s výjimkou bodů inferior malar a mid-mandibular border, jejichž hodnoty byly vyšší na straně levé.
7. Na základě množiny bodů na povrchu lebky a odpovídající množiny bodů na měkkém povrchu obličeje byla metodami geometrické morfometrie modelovány predikce rekonstrukce měkkých tkání. Jedná se o pilotní studii, kdy přesnost modelu je prozatím 5,994 mm. Daný algoritmus je pro forenzní účely tedy v současné době nedostatečně spolehlivý a bude dále vyvíjen a testován.

9. LITERATURA

Albert AM, Ricanek K, Patterson E. 2007. A review of the literature on the aging adult skull and face: Implications for forensic science research and applications. *Forensic Science International* 172: 1–9.

Attardi G, Betr  M, Forte M, Gori R, Guidazzoli A, Imboden S, Mallegni F. 2000. 3D facial reconstruction and visualization of ancient Egyptian mummies using spiral CT data. Soft tissues reconstruction and textures application. *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH*. (<http://medialab.di.unipi.it/Project/Mummia/SIGGRAPH99/>)

Aulsebrook WA, Iscan MY, Slabbert JH, Becker P. 1995. Superimposition and reconstruction in forensic facial identification: a survey. *Forensic Science International* 75:101–120.

Bejdov Š, Krajicek V, Velemnsk J, Horak M, Velemnsk P. 2013. Changes in the sexual dimorphism of the human mandible during the last 1200 years in Central Europe. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology* 64:437–453.

Berar M, Tilotta FM, Glaunes JA, Rozenholc Y. 2011. Craniofacial reconstruction as a predictin problem using a Latent Root Regression model. *Forensic Science International* 210:228–236.

Blanz V, Vetter T. 1999. A morphable model for the synthesis of 3D faces. *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH*. (<http://www.cs.ucf.edu/courses/cap6412/fall2008/papers/p187-blanz.pdf>)

Brucker MJ, Patel J, Sullivan PK. 2003. A morphometric study of the external ear: age- and sex-related differences. *Plastic and Reconstructive Surgery* 112: 647–652.

Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, Suetens P. 2006. Craniofacial reconstruction using a combined statistical model of face shape and soft tissue depths: Methodology and validation. *Forensic Science International* 159:147–158.

Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, Clement JG., Suetens P. 2010. Bayesian estimation of optimal craniofacial reconstructions. *Forensic Science International* 201:146–152.

Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, Clement JG, Suetens P. 2010. Computerized craniofacial reconstruction: Conceptual framework and review. *Forensic Science International* 201: 138–145.

Clement JG, Marks MK. 2005. Computer-graphic facial reconstruction. Oxford: Elsevier Academic Press.

Codinha S. 2009. Facial soft tissue thicknesses for the Portuguese adult population. *Forensic Science International* 184:80.e1–80.e7.

Davy SL, Gilbert T, Schofield D, Evison MP. 2005. Forensic facial reconstruction using computer modelling software, In: Clement JG, Marks MK, editors. *Computer-Graphic Facial Reconstruction*. Oxford: Elsevier Academic Press. p. 183–196.

de Almeida NH, Michel-Crosato E, de Paiva LAS., Biazevic MGH. 2013. Facial soft tissue thickness in the Brazilian population: New reference data and anatomical landmarks. *Forensic Science International* 231: 404.e1–404.e7.

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 Science International* 159:126–146.

De Greef S, Claes P, Vandermeulen D, Suetens P, Willems G. 2009. The influence of sex, age and body mass index on facial soft tissue depths. *Journal of Forensic Science, Medicine and Pathology* 5:60–65.

DeCarlos D, Metaxas D, Stone M. 1998. An anthropometric face model using variational techniques, *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH '98*:67–74.

Domaracki M, Stephan CN. 2006. Facial soft tissue thicknesses in Australian Adult Cadavers. *Journal of Forensic Sciences* 51:5–10.

Dong Y, Huang L, Feng Z, Bai S, Wu G, Zhao Y. 2012. Influence of sex and body mass index on facial soft tissue thickness measurements of the northern Chinese adult population. *Forensic Science International* 222:396.e1–396.e7.

Doual JM, Ferri J, Laude M. 1998. The influence of senescence on craniofacial and cervical morphology in humans. *Surgical and Radiologic Anatomy*. 19:246–258.

Evans MBEJ, Copp L. 1986. The histology of tendon attachments to bone in man. *Journal of Anatomy* 149:89–100.

Farrar F. 1977. From skull to visage: a forensic technique for facial reconstruction, *Police Chief* 44:78–80.

Fedysyutkin BA, Nainys JV. 1993. The relationship of skull morphology to facial features. In: Iscan MY, Helmer HP, editors. *Forensic analysis of the skull*. New York:Wiley-Liss. p. 199–213.

Ferrario VF, Sforza C, Serrao G, Ciusa V, Dellavia C. 2003. Growth and aging of facial soft tissues: a computerized three-dimensional mesh diagram analysis. *Clinical Anatomy* 16:420–433.

George RM. 1987. The lateral craniographic method of facial reconstruction. *Journal of Forensic Sciences* 32:1305–1330.

Goodall C. 1991. Procrustes methods in the statistical analysis of shape. *Journal of the Royal Statistical Society* 53:285–339.

Guyomarc'h P, Dutailly B, Couture Ch, Coqueugniot H. 2012. Anatomical placement of the human eyeball in the orbit – validation using CT scans of living adults and prediction for facial approximation. *Journal of Forensic Sciences* 57:1271–1275.

Guyomarc'h P, Santos F, Dutailly B, Coqueugniot H. 2013. Facial soft tissue depths in French adults: Variability, specificity and estimation, *Forensic Science International* 231:411.e1–411.e10.

Haruštiaková D, Jarkovský J, Littnerová S, Dušek L. 2012. *Vícerozměrné statistické metody v biologii*. Brno: Akademické nakladatelství CERM.

Hayes S, Taylor R, Paterson A. 2005. Forensic facial approximation: an overview of current methods used at the victorian institute of forensic medicine/victoria police criminal identification squad. *The journal of forensic odonto-stomatology* 23:45–50.

Hendl J. 2004. *Přehled statistických metod zpracování dat*. Praha: Portál.

Hwang HS, Kim K, Moon DN, Kim JH, Wilkinson C. 2012. Reproducibility of facial soft tissue thicknesses for craniofacial reconstruction using cone-beam CT images. *Journal of Forensic Sciences* 57:443–448.

Cha KS. 2013. Soft-tissue thickness of South Korean adults with normal facial profiles. *The Korean journal of Orthodontics* 43:178–185.

Jones MW. 2001. Facial Reconstruction using volumetric data. *Proceedings of the Vision Modeling and Visualization Conference '01*:135–150.

Kim DI, Lee UY, Park SO, Kwak DS, Han SH. 2012. Identification using frontal sinus by three-dimensional reconstruction from computed tomography. *Journal of Forensic Sciences* 58:5–12.

Kolar JC, Salter EM. 1996. *Craniofacial anthropometry*. Springfield: C.C.Thomas.

Lebedinskaya GU, Balueva TS, Veselovskaya EB. 1993. Development of methodological principles for reconstruction of the face on the basis of skull material. In: Iscan MY, Helmer RP, editors. *Forensic Analysis of the Skull*. New York: Wiley-Liss. p.183–198.

Lee WJ, Wilkinson CM, Hwang HS. 2012. An accuracy assessment of forensic computerized facial reconstruction employing cone-beam computed tomography from live subjects. *Journal of Forensic Sciences* 57:318–327.

Leopold D, Hammer HJ, Greil H. 1993. Determination of body constitution of facial reconstruction. In: Iscan MY, Helmer RP, editors. *Forensic analysis of the skull*. New York: Wiley-Liss. p.47–56.

Lewis MB, Johanson RA. 1997. Familiarity, target set and false positives in face recognition, *European Journal of cognitive psychology* 9:437–459.

Lorensen WE, Cline HE. 1987. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm, *Computer Graphics* 21:163–169.

Manhein MH, Barsley RE, Listi GA. 2000. In vivo facial tissue depth measurements for children and adults. *Journal of Forensic Sciences* 45:48–60.

Marcus LF, Corti M, Loy A. 1996, *Advances in Morphometrics*. New York and London: Plenum Press.

Martin R, Saller K. 1957. *Lehrbuch der Anthropologie, in systematischer Darstellung*. Stuttgart: G. Fisher.

Mitteroecker P, Gunz P. 2009. *Advances in Geometric Morphometrics*. *Evolutionary Biology* 36:235–247.

Miyasaka S, Yoshino M, Imaizumi K, Seta S. 1995. The computer-aided facial reconstruction system. *Forensic Science International* 74:155–165.

Nelson LA, Michael SD. 1998. The application of volume deformation to three-dimensional facial reconstruction: A comparison with previous techniques. *Forensic Science International* 94:167–181.

Neustupa J. 2006. Co je to geometrická morfometrika aneb morfologie znovu na scéně. *Živa* 2:54–55.

O'Hare PM, Fleischer AB, D'Agostino JR, Feldman SR, Hinds MA, Rassette SA. 1999. Tobacco smoking contributes little to facial wrinkling. *Journal of European Academy of Dermatology and Venereology* 12:133–139.

Omstead J. 2002. Facial reconstruction. *Totem: The University of Western Ontario Journal of Anthropology* 10:37–46.

Panenková P, Beňuš R, Masnicová S, Obertová Z, Grunt J. 2012. Facial soft tissue thicknesses of the mid-face for Slovak population. *Forensic Science International* 220:293.e1–293.e6.

Pavlík T, Dušek L. 2012. *Biostatistika*, Brno: Akademické nakladatelství CERM.

Phillips VM, Smuts NA. 1996. Facial reconstruction, utilisation of computerised tomography to measure facial tissue thickness in a mixed population. *Forensic Science International* 83:51–59.

Phulari BS. 2011. *Orthodontics: Principles and practice*. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers.

Phulari BS. 2013. *An atlas of cephalometric landmarks*. London: Jaypee Brothers Medical Publishers.

Pithon MM, Ribeiro DLR, dos Santos RL, de Santana CL, Cruz JPP. 2014. Soft tissue thickness in young north eastern Brazilian individuals with different skeletal classes. *Journal of Forensic and Legal Medicine* 22:115–120.

Prokopec M, Ubelaker DH. 2002. Reconstructiong the shape of the nose according to the skull. *Forensic science communications* 4. (<http://www.fbi.gov/about-us/lab/forensic-science-communications/fsc/jan2002/prokopec.htm>)

Quatrehomme G, Cotin S, Subsol G, Delingette H, Garidel Y, Grévin G, Fidrich M, Baillet P, Ollier A. 1997. A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models. *Journal of Forensic Sciences* 42:649–652.

Quatrehomme G, Subsol G. 2005. Classical Non Computer-Assisted Craniofacial Reconstruction. In: Clement JG, Marks MK, editors. Computer-Graphic Facial Reconstruction. Oxford: Elsevier Academic Press. p. 15–32.

Quatrehomme G, Subsol G. 2005. Automatic 3D facial reconstruction by feature-based registration of a reference head. In: Clement JG, Marks MK, editors. Computer-Graphic Facial Reconstruction. Oxford: Elsevier Academic Press. p. 79–102.

Quatrehomme G, Balaguer T, Staccini P, Alunnie-Perret V. 2007. Assessment of the accuracy of three-dimensional manual craniofacial reconstruction: a series of 25 controlled cases. *International Journal of Legal Medicine* 121:469–475.

Rohlf FJ. 1990. Morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics* 21:299–316.

Ruiz NAP. 2013. Facial soft tissue thickness of Colombian adults. *Forensic Science International* 229:160e1–160e9.

Rynn Ch, Wilkinson CM. 2006. Appraisal of traditional and recently proposed relationships between the hard and soft dimensions of the nose in profile. *American Journal of Physical Anthropology* 130:364–373.

Rynn Ch, Wilkinson CM, Peters HL. 2010. Prediction of nasal morphology from the skull. *Forensic Science, Medicine and Pathology* 6:20–34.

Sahni D, Sanjeev, Singh G, Jit I, Singh P. 2008. Facial soft tissue thickness in northwest Indian adults. *Forensic Science International* 176:137–146.

Sakuma A, Ishii M, Yamamoto S, Shimofusa R, Kobayahi K, Motani H, Hayakawa M, Yajima D, Takeichi H, Iwase H. 2010. Application of postmortem 3D-CT facial reconstruction of personal identification. *Journal of Forensic Sciences* 55:1624–1629.

Sforza Ch, Grandi G, Catti F, Tommasi DG, Ugolini A, Ferrario VF. 2009. Age- and sex-related changes in the soft tissues of the orbital region. *Forensic Science International* 185:e1–115.e8.

Sforza Ch, Grandi G, Binelli M, Tommasi DG, Rosati R, Ferrario VF. 2009. Age- and sex-related changes in the normal human ear. *Forensic Science International* 187:110.e1–110.e7.

Sforza Ch, Grandi G, Binelli M, Dolci C, De Menezes M, Ferrario VF. 2010. Age- and sex-related changes in three-dimensional lip morphology. *Forensic Science International* 200:182.e1–182.e7.

Sforza Ch, Grandi G, De Menezes M, Tartaglia GM, Ferrario VF. 2011. Age- and sex-related changes in the normal human external nose. *Forensic Science International* 204:205.e1–205.e9.

Shaham D, Sosna J, Makori A, Slasky B, Bar-Ziv J, Donchin Y. 2000. Post mortem CT-scan: An alternative method in forensic medicine and trauma research. *The internet journal of rescue and disaster medicine* 2. (<http://ispub.com/IJRDM/2/1/4044>)

Shahrom AW, Vanezis P, Chapman RC, Gonzales A, Blenkisop C, Rossi ML. 1996. Techniques in facial identification: computer-aided facial reconstruction using a laser scanner and video superimposition. *International Journal of Legal Medicine* 108:194–200.

Shrimpton S, Daniels K, de Greef S, Tilotta F, Willems G, Vandermeulen D, Suetens P, Claes P. 2014. A spatially-dense regression study of facial form and tissue depth: Towards an interactive tool for craniofacial reconstruction. *Forensic Science International* 234:103–110.

Simpson E, Henneberg M. 2002. Variation in soft-tissue thicknesses on the human face and their relation to craniometric dimensions. *American Journal of Physical Anthropology* 118:121–133.

Sipahioglu S, Ulubay H, Baris Diren H. 2012. Midline facial soft tissue thickness database of Turkish population: MRI study. *Forensic Science International* 219:282.e1–282.e8.

Slice DE. 2007. Geometric Morphometrics. *Annual Review of Anthropology* 36:261–281.

Smith LS, Throckmorton GS. 2006. Comparability of Radiographic and 3D-ultrasound measurements of facial Midline tissue depths. *Journal of Forensic Sciences* 51:244–247.

Snow CC, Gatliff BP, McWilliams KR. 1970. Reconstruction of Facial Features from the Skull: An Evaluation of its Usefulness in Forensic Anthropology. *American Journal of physical Anthropology* 33:221–228.

Starbuck JM, Ward RE. 2007. The affect of tissue depth variation on craniofacial reconstructions. *Forensic Science International* 3:130–136.

Stephan C, Henneberg M. 2001. Building faces from dry skulls: are they recognised above chance rates?. *Journal of Forensic Sciences* 46:432–440.

Stephan CN. 2002. Facial approximation: globe projection guidelines falsified by exophthalmometry literature. *Journal of Forensic Sciences* 47:730–735.

Stephan CN. 2003. Facial approximation: an evaluation of mouth-width determination. *American journal of physical anthropology* 121:48–57.

Stephan CN, Henneberg M, Simpson W. 2003. Predicting nose projection and nasale position in facial approximation: a test of published methods and proposal of new guidelines. *American journal of physical anthropology* 122:240–250.

Stephan CN. 2005. Anthropological facial reconstruction – recognizing the fallacies, embracing errors and realizing method limits. *Science and justice* 43:193–200.

Stephan CN, Norris RM, Henneberg M. 2005. Does sexual dimorphism in facial soft tissue depths justify sex distinction in craniofacial identification?. *Journal of Forensic Sciences* 50:1–6.

Stephan CN, Davidson PL. 2008. The placement of the human eyeball and canthi in craniofacial identification. *Journal of Forensic Sciences* 53:612–619.

Stephan CN, Murphy SJ. 2008. Mouth width prediction in craniofacial identification: cadaver tests of four recent methods, including two techniques for edentulous skulls. *Journal of Forensic Odontostomatology* 27:2–7.

Stephan CN, Simpson EK. 2008. Facial Soft Tissue Depths in Craniofacial Identification (Part I): An Analytical Review of the Published Adult Data. *Journal of Forensic Sciences* 53:1257–1272.

Stoney MB, Koelmeyer T. 1999. Facial Reconstruction: A case report and review of development of techniques. *Medicine, Science and the Law* 39:49–60.

Taister MA, Holliday SD, Borrman HIM. 2000. Comments on facial aging in law enforcement investigation. *Forensic Science Communications* 2. (<http://www.fbi.gov/about-us/lab/forensic-science-communications/fsc/april2000/index.htm/taister.htm>)

Taylor KT. 2001. *Forensic Art and Illustration*. Boca Raton: CRC Press.

Tedeschi-Oliveira SV, Melani RFH, de Almeida NH, de Paiva LAS. 2009. Facial soft tissue thickness of Brazilian adults. *Forensic Science International* 193:127.e1–127.e7.

Tillota F, Richard F, Glaunés J, Berar M, Gey S, Verdeille S, Rozenholc Y, Gaudy JF. 2009. Construction and analysis of a head CT-scan database for craniofacial reconstruction. *Forensic Science International* 191:112.e1–112.e12.

Tilotta FM, Glaunés JA, Richard FJP, Rozenholc Y. 2010. A local technique based on vectorized surfaces for craniofacial reconstruction. *Forensic Science International* 200:50–59.

Thirion JP, Gourdon A. 1992. The 3D marching lines algorithm and its application to crest lines extraction. *INRIA* 4:3–32.

Tu P, Book R, Liu X, Krahnstoever N. 2007. Automatic Face recognition from Skeletal Remains. *Computer Vision and Pattern Recognition*:1–7.

Tyrell AG, Evison MP, Chamberlain AT, Green MA. 1997. Forensic three-dimensional facial reconstruction: historical review and contemporary developments. *Journal of Forensic Sciences*, 42:653–661.

Ubelaker DH, Bubniak E, O'Donnell G. 1992. Computer-assisted photographic superimposition. *Journal of Forensic Sciences* 37:750–762.

Ullrich H, Stephan CN. 2011. On Gerasimov's Plastic Facial Reconstruction Technique: New Insights to Facilitate Repeatability. *Journal of Forensic Sciences* 56:470–474.

Utsuno H, Kageyama T, Uchida K, Kibayashi K. 2014. Facial soft tissue thickness differences among three skeletal classes in Japanese population. *Forensic Science International* 236:175–180.

Vanezis M, Vanezis P. 2000. Cranio-Facial Reconstruction in Forensic Identification – Historical development and a Review of Current Practice. *Medicine, Science and the Law* 40:197–205.

Vanezis P, Vanezis M, McCombe G, Niblett T. 2000. Facial reconstruction using 3D computer graphics. *Forensic Science International* 108:81–95.

Verzé L. 2009. History of facial reconstruction. *Acta Biomedica* 80:5–12.

Von Cranon-Taubadel N, Frazick BC, Lahr MM. 2007. The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods and modifications. *American Journal of Physical Anthropology* 134:23–35.

Wilhelms J, Van Gelder A. 1997. Anatomically based modelling. *Computer Graphics* 31:173–180.

Wilkinson CM. 2002. In vivo facial tissue depth measurements fo White British children. *Journal of Forensic Science* 47:459–465.

Wilkinson C. 2004. Forensic Facial Reconstruction. Cambridge: Cambridge University Press.

Wilkinson C. 2005. Computerized Forensic Facial Reconstruction. A review of Current Systems. Forensic Science, Medicine and Pathology 1-3:173–177

Wilkinson C, Rynn C, Peters H, Taister M, Kau ChH, Richmond S. 2006. A blind accuracy assessment of computer-modeled forensic facial reconstruction using computed tomography data from live subjects. Forensic Science, Medicine and Pathology 2:179–187.

Wilkinson C. 2010. Facial reconstruction – anatomical art or artistic anatomy?. Journal of Anatomy 216:235–250.

Wittwer-Backofen U. 2011. Facial reconstructions by a combined 2D/3D method – different techniques meet requirements in the identification process. Bulletin der Schweizerischen Gesellschaft für Anthropologie 17:77–85.

Wright DB, Sladden B. 2003. An own gender bias and the importance of hair in face recognition. Acta Psychologica 114:101–114.

Internetové odkazy

[http://cahid.dundee.ac.uk/facilities-services/forensic-services/craniofacial-superimposition\)](http://cahid.dundee.ac.uk/facilities-services/forensic-services/craniofacial-superimposition)

[http://www.homolka.cz/cs-CZ/oddeleni/radiodiagnosticke-oddeleni-rdg/vysetrovaci-a-intervencni-metody/ct-vypocetni-pocitacova-tomografie.html\)](http://www.homolka.cz/cs-CZ/oddeleni/radiodiagnosticke-oddeleni-rdg/vysetrovaci-a-intervencni-metody/ct-vypocetni-pocitacova-tomografie.html)

<http://cgg.mff.cuni.cz/trac/morpho/raw-attachment/wiki/WikiStart/1-project-overview.pdf>

<http://folk.uio.no/ohammer/past>