

UNIVERSITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA ANTROPOLOGIE A GENETIKY ČLOVĚKA



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Geometricko-morfometrická analýza pohlavního dimorfismu lebky člověka
a populační specifita metod odhadu pohlaví: srovnání dvou populačních
vzorků

Geometric morphometrics of cranio-facial sexual dimorphism and population
specificity of methodological sex estimation: comparison of two population
samples

Bc. ADAM PEŠEK

ŠKOLITEL: RNDr. JANA VELEMÍNSKÁ, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím citované odborné literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Řeži, 27. 8. 2012

Adam Pešek

Rád bych poděkoval RNDr. Janě Velemínské, Ph.D. za odborné konzultace, rady a trpělivý přístup při vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat kolektivu 3D laboratoře za poskytnuté odborné rady, zvláště Mgr. Veronice Cagáňové za podnětné připomínky k obsahové stránce diplomové práce.

Obsah

Abstrakt	5
Abstract.....	6
Seznam zkratek a pojmů.....	7
1. Úvod	8
2. Lidská lebka	9
2.1. Růst lebky.....	10
2.2. Obecné teorie růstu	11
2.3. Úvod k pohlavnímu dimorfismu.....	12
2.4. Pohlavní dimorfismus lebky.....	14
2.4.1. Klenba lebeční	15
2.4.2. Týlní otvor a týlní kondyly	16
2.4.3. Processus mastoideus	16
2.4.4. Lícní kost	17
2.4.5. Oblast horní čelisti a tvrdého patra	18
2.4.6. Oblast nosu	18
2.4.7. Očnice.....	19
2.4.8. Dolní čelist.....	19
2.5. Sekulární trend.....	20
2.6. Odhad pohlaví.....	21
2.6.1. Pánevní kosti.....	22
2.6.2. Lebka	23
3. Cíle práce	27
4. Materiál a metody.....	28
4.1. Materiál	28
4.2. Metody	30
4.2.1. Pořízení sad fotografií	30
4.2.2. PhotoModeler Scanner	30
4.2.3. Význačné body.....	34
4.2.4. Reliabilita měření.....	37
4.2.5. Analyzované oblasti lebky.....	39
4.2.6. Analýza získaných dat.....	39
4.2.6.1. Prokrustovská analýza.....	40
4.2.6.2. Analýza hlavních komponent	42
4.2.6.3. Diskriminační analýza	44
4.2.6.4. Hotelling T2 test.....	45
4.2.6.5. Thin-plate spline.....	45
5. Výsledky	47
5.1. Reliabilita měření.....	47
5.2. Odhad pohlaví.....	47
5.2.1. Výsledky PCA	48
5.2.2. Diskriminační analýza podle tvaru a velikosti lebky	49
5.2.3. Diskriminační analýza podle tvaru lebky	50
5.3. Analýza pohlavního dimorfismu	52

5.3.1.	Horní obličej	52
5.3.2.	Lebeční klenba	54
5.3.3.	Oblast nosu	55
5.3.4.	Očnice.....	56
5.3.5.	Oblast patra.....	57
5.3.6.	Týlní otvor	57
6.	Diskuze	59
6.1.	Odhad pohlaví.....	59
6.2.	Porovnání a hodnocení tvarové variability mezi populacemi	61
6.3.	Získávání dat	64
7.	Závěr	66
8.	Seznam citované literatury.....	68
9.	Přílohy.....	79

Abstrakt

Geometricko-morfometrická analýza pohlavního dimorfismu lebky člověka a populační specifita metod odhadu pohlaví: srovnání dvou populačních vzorků

Náplní diplomové práce je analýza pohlavního dimorfismu recentní kolekce lebek euroamerické populace z Maxwellova muzea v Albuquerque a porovnání získaných výsledků se studií pohlavního dimorfismu střeoevropské populace. Podle našeho předpokladu je tvar lebky populačně méně specifický než velikost. Domníváme se tedy, že využití tvaru lebky pro diskriminaci podle pohlaví, v oblasti bioarcheologie a forenzní antropologie, bude spolehlivější v porovnání s diskriminací na základě pohlavního dimorfismu velikosti lebky. Jako materiál bylo použito 62 sad fotografií zobrazujících každou lebku z 16 různých pozic. Nejprve byly z fotografií získány 3D souřadnice souboru význačných bodů, které byly dále rozděleny do analyzovaných oblastí lebky. Tyto konfigurace bodů byly standardizovány Prokrustovskou analýzou a následně podrobeny PCA analýze, z níž byla získána později potřebná skóre hlavních komponent. Dalším krokem byl odhad pohlaví diskriminačními analýzami podle velikosti a tvaru a dále podle samotného tvaru lebek a jejich částí.

Přesnost odhadu pohlaví byla vždy vyšší u analýz tvaru spolu s velikostí. Nejvyšší přesnost odhadu pohlaví byla získána pro souřadnicová data (až 100%), menší přesnost umožnily přímé diskriminační analýzy PC skóre. Nejmenší přesnost, nicméně nejobektivnější výsledky byly zaznamenány u diskriminačních analýz s crossvalidací provedené na PC skóre (do 85%). V další části práce byla metodou TPS zkoumána tvarová variabilita mezi pohlavími na jednotlivých částech lebky. Pozorován byl například mohutnější jařmový oblouk u mužů, vyšší a užší vstup do dutiny nosní u mužů nebo relativně vyšší šířka klenby u žen.

Při porovnání pohlavního dimorfismu tvaru lebky byla pozorována značná shoda mezi analyzovanou severoamerickou a referenční střeoevropskou populací. Použití metod geometrické morfometrie pro diskriminaci pohlaví podle lebky se tak na základě našich výsledků jeví jako robustní metodika, kterou je po dalším ověření možné využívat v osteologické praxi.

Klíčová slova: lebka, pohlavní dimorfismus, odhad pohlaví, geometrická morfometrie

Abstract

Geometric morphometrics of cranio-facial sexual dimorphism and population specificity of methodological sex estimation: comparison of two population samples.

The aim of this thesis is to analyse sexual dimorphism of a recent collection of human skulls of Euroamerican population which is housed in the Maxwell museum in Albuquerque and to compare our data with data of sexual dimorphism observed in the Central European population. We presume that a shape of the skull is less population specific than its size. Thus, the use of a shape of the skull for a discriminant analysis related to sex in bioarchaeology and in forensic science will be more reliable in a comparison with a discriminant function of the sex based on a sexual dimorphism of a size of the skull.

As material we used 62 sets of photographs which display each human skull in 16 different positions. At first we obtained 3D coordinates of landmarks and then we divided them into six independently analyzed regions of the skull. These point-configurations were standardized by the Procrustes superimposition and subsequently analyzed by the PCA. PCA gained us the PC score needed later in the discriminant function. In our next step we used the discriminant analysis for sex estimation from size and shape of the skull or just from size of the skull.

Accuracy of sex estimation was always higher for an analysis from both, size and shape. We got the highest accuracy in sex estimation for coordinates data (up to 100 %). Less accuracy was gained by a direct discriminant analysis of the PC score. The lowest accuracy but most objective results were obtained by a discriminant analysis with cross-validation performed on the PC score (up to 85 %). After that we investigated a sexual dimorphism of shape by the TPS analysis. We observed more robust zygomatic arch in men, higher and relatively narrower nasal aperture also in men and relatively wider cranial vault in women.

We observed a significant match between Euroamerican population and the Central European reference population according to a sexual dimorphism of a shape of the skull. The use of geometric-morphometrics for a discriminant analysis of the skull related to sex seems to be a robust method, which can be used in an osteology after a further verification.

Key words: skull, sexual dimorphism, sex estimation, geometric morphometrics

Seznam zkratek a pojmů

anteriorní	přední
dx	pravý (dexter)
DSP	Diagnose Sexuelle Probabiliste (Probabilistic Sex Diagnosis)
frontální	čelní
GPA	Prokrustovská analýza (General Procrustes Analysis)
inferiorní	dolní
kraniálně	směrem k hlavě, lebce
landmark	význačný bod
lat.	latinsky
laterální	zevní, vnější
MANOVA	vícerozměrná analýza rozptylu (Multivariate ANalysis Of VAriance)
mediánní	vnitřní, střední
mediánní rovina	svislá osa těla
Morphome3cs	program pro potřeby katedry antropologie PřF UK
např.	například
PAST	PAleontological STatistic
PC skóre	skóre hlavních komponent
PCA	analýza hlavních komponent (Principal Component Analysis)
popř.	popřípadě
posteriorní	zadní
processus	výběžek
saeculum	lat věk, století
sagitální	rovnoběžný s mediánní rovinou
semilandmark	pomocný bod
sin	levý (sinister)
superiorní	horní
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvaný
viz.	z lat.videre licet, doslova: lze vidět

1. Úvod

Kosterní nálezy člověka jsou často, kromě artefaktů, jedním z mála zdrojů informací v oblasti bioarcheologie a forenzní antropologie. Lze z nich vyčíst základní demografické ukazatele jako je pohlaví, věk, výška, popř. etnická příslušnost jedince, jehož byly součástí. Přesný odhad pohlaví, který je velice důležitý při forenzním vyšetřování, demografických studiích nebo identifikaci obětí hromadných neštěstí, by nebyl možný bez přítomnosti pohlavního dimorfismu. Ten je v jisté míře přítomen na všech částech lidského skeletu (Asala et al., 2004; Kranioti et al., 2005; Barrier a Abbé, 2008; Rissech et al., 2008; Rejtarová et al., 2009; Robinson et al., 2009; Dabbs a Moore-Jansen, 2010; Scholtz et al., 2010; Mastrangelo et al., 2011; Franklin et al., 2012_b; Harris a Case 2012; Papaioannou et al., 2012). Pouze u pánevních kostí je však pohlavní dimorfismus přítomen v takové míře, aby mohl být použit k odhadu pohlaví u všech populací (Steyn et al., 2000; Patriquin et al., 2003; Brůžek a Murail, 2006; Kurki, 2011; Bilfeld et al., 2012).

I za pomoci lebky lze dosáhnout velmi přesného odhadu pohlaví ($\geq 90\%$), (Franklin et al., 2006; Robinson a Bidmos, 2009). Častým problémem je populační specifita těchto metod, nejčastěji daná vlivem velikosti (Hennessy a Stringer, 2002; Badawi-Fayad a Cabanis, 2007; Bastir et al., 2011) Studium pohlavního dimorfismu lebky se proto stále čím dál více zaměřuje na odhalování tvarové složky pohlavního dimorfismu. Za předpokladu, že existuje signifikantní pohlavní dimorfismus tvaru lebky, bude po jeho nalezení možný populačně nespecifický odhad pohlaví podle morfologie lidské lebky. Tato zjištění byla hlavním důvodem, proč se tato práce zabývá analýzou pohlavního dimorfismu tvaru lebky a porovnáním dvou populačních vzorků.

2. Lidská lebka

Lebka je součástí osového skeletu a její struktura vytváří dva funkčně odlišné oddíly, neurocranium a splanchnocranium. Neurocranium tvoří ochranný obal pro mozek a smyslové orgány (statoakustický, zrakový, čichový), zatímco splanchnocranium je tvořeno kostmi obklopujícími počáteční struktury trávicí soustavy (např. Borovanský et al., 1967; Fetter et al., 1967). Lebka je souborem kostí s dvojitou osifikací. Prvním typem je osifikace chondrogenní, tedy náhrada chrupavčité tkáně, druhým typem je osifikace vazivového původu, tedy desmogenní (např. Šmahel, 2001).

Neurocranium bylo původně chrupavčité s funkcí pouzdra mozku, navíc obklopeno vrstvou desmogenních, krycích kostí. Vzárostající objem mozku v průběhu evoluce zapříčinil rozevření chrupavčitého neurocrania, které dnes tvoří pouze lebeční bazi (např. Gray, 1918; Čihák, 2011). Mezi chondrogenní kosti neurocrania patří tělo, postranní části a přilehlá část šupiny kosti týlní, kost skalní, většina kosti klínové, kost čichová a dolní skořepa nosní (např. Gray, 1918).

Funkci lebeční klenby převzaly krycí kosti vazivového původu. Klenba lebeční, tvořená desmogenními kostmi je tvořena kraniální částí šupiny kosti týlní, temenními kostmi, šupinami kostí spánkových, kostmi bubínkovými, vnitřními lamelami křídlových výběžků kosti klínové, čelní kostí, nosními kostmi, slzními kostmi a kostí radličnou (např. Gray, 1918).

Splanchnocranium je téměř celé tvořené kostmi desmogenního původu, ale jeho vývoj je spojen s žaberními oblouky, jejichž pozůstatky osifikují chondrogenně (Sinelnikov, 1990). Chondrogenně osifikující zbytky žaberních oblouků tvoří vnitroušní kůstky, jazyku, bodcovitý výběžek kosti spánkové a část dolní čelisti. Splanchnocranium tvořené desmogenně osifikujícími kostmi se skládá z párových kostí horní čelisti, z kostí lícních, kostí patrových a z dolní čelisti¹ (Gray, 1918).

Jednotlivé části, kterými je lebka tvořena, podléhají odlišným růstovým tendencím. Postupem vývoje jedince se mění poměr velikosti mozkové a obličejové části lebky (např. Dokládál a Páč, 1991).

¹ Dolní čelist má dvojitou osifikaci, na zkoumaném materiálu však nebyla přítomna, proto ve výzkumu není zahrnuta.

2.1. Růst lebky

Růst je obecně dán exogenními a endogenními faktory. Mezi vnější, exogenní, faktory řadíme environmentální vlivy. Pojmem endogenní faktory označujeme genetickou výbavu jedince a schopnost buněk se opakovaně a dlouhodobě dělit (proliferační schopnost). Vnější vlivy ve vysoké míře stimulují produkci hormonů, a tím významně ovlivňují kartilaginózní růst. Jelikož primární struktura a funkčnost hormonů je dána geneticky, je hormonální působení hodnoceno jako epigenetické. Kartilaginózní růst se uplatňuje v chrupavčitých růstových zónách, které se na lebce nacházejí především na lebeční bazi. Většina lebky však roste ve švech, tzv. pasivním růstem neboli posunem (např. Šmahel 2001).

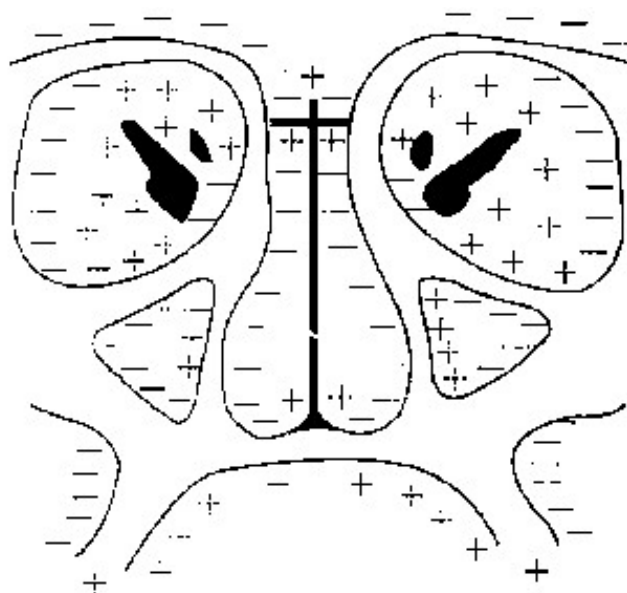
Po narození je obličejová část dětské lebky relativně široká a nízká. Je to dáno úrovní vývoje růstových oblastí, které lze rozdělit na mozkovnu, dýchací cesty a oblast ústní dutiny. Přestože jsou propojeny v jeden celek, mají tyto regiony odlišné etapy vývoje. Vývoj oblasti dýchacích cest závisí na růstu celé dýchací soustavy (koreluje s velikostí plic) a oblast ústní dutiny je ovlivněna erupcí zubů a rozvojem žvýkacích svalů (např. Enlow a Hans, 1996).

Klenba lebeční roste pasivně, posunem v suturách podle vzrůstající velikosti mozku. Na povrchu kostí probíhá endokraniálně i exokraniálně apozice kostní tkáně, jejímž důsledkem je vyšší mocnost kostí lebeční klenby (Enlow a Hans, 1996). Závislost růstu neurocrania na rostoucím mozku je patrná zejména u poruch růstu mozku (např. mikrocephalie), jež jsou spojeny s poruchami růstu mozkovny (např. Borovanský et al., 1967).

Na přední části lebeční baze zanikají synchondrosy brzy, tj. do 6 let. *Synchondrosis sphenoccipitalis* umožňuje anteroposteriorní prodlužování baze podle rostoucího mozku až do ukončení puberty (Arat et al., 2001). Chondrogenní růst lebeční baze probíhá jen v jednom směru a neumožňuje zvětšování lebečních jam. Posunu baze napomáhají remodelační procesy. Povrch lebeční baze je endokraniálně resorpční, s výjimkou vyvýšenin, oddělujících od sebe jednotlivé lebeční jámy, např. *crista galli*, *crista occipitalis interna*, oblast pod *sella tursica*² a *pyramis ossis tempovalis*, které jsou apoziční (např. Enlow a Hans, 1996).

² Aktivita kostní tkáně okolo sella tursica klínové kosti je variabilní, proto se apoziční a resorpční oblasti mohou lišit.

Nasozygomatikomaxilární komplex, se na základě apozičně-resorpčních procesů, posouvá jako celek anteroinferiorně. Jeho růst závisí zejména na vývoji žvýkacího aparátu (zuby, žvýkací svaly). Důkazem je redukce velikosti čelistí spojená se ztrátou chrupu. I očníce bez oka zpomaluje růst (např. Borovanský et al., 1967). Apoziční (označené znaménkem +) a resorpce (označené jako -) probíhají na obličejovém skeletu, jak je naznačeno na obrázku 1. *Maxilla* apozičně přibývá dorsálně na *tuber maxillae*, do šířky roste na laterálních stranách a do výšky v alveolárním výběžku. Resorpce probíhá především na ventrální ploše horní čelisti. Inferiorním směrem se posouvá tvrdé patro a to díky apoziční na orální straně a resorpci na straně nasální. Nosní dutina na základě posunu okolních struktur celkově roste. (např. Enlow a Hans, 1996). Zvětšují se i vedlejší nosní dutiny, jejichž vývoj je značně variabilní (O'Higgins et al., 2006). Pod vlivem růstu okolních struktur dochází k posunu a růstu očníce (např. Enlow a Hans, 1996).



Obrázek 1: Apozičně-resorpční procesy nasomaxilárního komplexu (Enlow a Hans, 1996).

2.2. Obecné teorie růstu

Růst chondrogeně osifikující lebeční baze v předozadním směru je regulován hormonálně. Formování zbývajících částí lebky, tedy klenby a splanchnocrania, dobře vysvětluje teorie funkční matrix. Tato idea předpokládá řízení růstu funkcí tkáně, která je spjatá s dotyčnou kostní strukturou (skeletální jednotkou). Jedna kost může tvořit více skeletálních jednotek nebo naopak jedna skeletální jednotka může být tvořena více kostmi.

Funkční matrix (tkáň) se dělí na dva typy: periostální a kapsulární. Jako periostální funkční matrix fungují především svaly (upínají se k periostu). Těm skeletální jednotka poskytuje oporu. U periostální funkční matrix probíhá růst apozicí, umožňující změnu formy tkáně. Kapsulární funkční matrix je skeletální jednotkou zcela nebo alespoň částečně obklopená, tedy chráněná. Příklad takové funkční matrix jsou oči nebo mozek, jenž svým růstem řídí posun (translaci) kostí tvořících mozkovnu a tím její zvětšení. Ztráta funkční matrix vede k redukci skeletální jednotky a opětovné obnovení funkce k jejímu kompenzačnímu růstu. Důkaz těchto vztahů je redukce *processus coronoideus mandibulae* při ztrátě funkce *musculus temporalis*, resorpce alveolárního výběžku dolní čelisti po ztrátě dentice a zachování jeho velikosti při použití zubních implantátů nebo odpovídající zmenšení mozkovny u mikrocefalie. U periostální funkční matrix neexistuje plně vyhovující biomechanické opodstatnění růstu. U kapsulární matrix roste skeletální jednotka podle růstu měkké tkáně, kterou obklopuje (Moss et al. 1985; Moss et al., 1987; Šmahel, 2001).

Teorie funkční matrix však nevysvětluje kartilaginózní růst. Ten dobře vystihují jiné teorie, které považují za primární, růst z chrupavčitých růstových zón ovládaných hormonálně. Kombinace těchto teorií dobře vysvětluje růst. Dnes jsou za primární růstová centra považovány chrupavky, přítomné zejména v postkraniálním skeletu a zajišťující velikostní růst organismu. Sekundární centra, která převažují na lebce, pak umožňují plasticitu růstu dle potřeb okolních tkání (podle teorie funkční matrix). Na lebce se primární růstová centra nacházejí pouze na lebeční bazi, fylogeneticky nejstarším útvaru lebky, málo ovlivňovaném funkcí a růstem okolní tkáně (Šmahel, 2001).

2.3. Úvod k pohlavnímu dimorfismu

Každý lidský jedinec vzniká splynutím dvou pohlavních buněk, které obsahují genetickou informaci, dvoušroubovici DNA, řídící vývoj jedince. Dvoušroubovice DNA, uložená v jádře každé buňky těla, je spiralizovaná v chromosomech (např. Pollard et al., 2008), jejichž soubor, tzv. karyotyp, umožňuje genetickou determinaci pohlaví. Pohlaví je tedy dané přítomností a funkcí heterochromosomů X a Y. Ženy charakterizuje karyotyp 46, XX a muže 46, XY. Pohlaví nálezu tak může být jednoduše odhaleno pouhou přítomností Y chromosomu (Graham, 2006, Jurmain et al., 2009).

Stejně jako primární i sekundární pohlavní znaky se vyvíjejí pod kontrolou pohlavních chromosomů, neboli heterochromosomů X a Y (Frayer a Wolpoff, 1985).

Pohlavní dimorfismus tedy evolučně souvisí už se vznikem pohlavnosti, tzn. odlišením individuí stejného druhu na samce a samice. Genetickým oddělením pohlaví tedy byly vytvořeny předpoklady pro vznik pohlavního dimorfismu (např. Flégr, 2005).

U všech populací člověka můžeme pozorovat pohlavní dimorfismus fyziologický, behaviorální a anatomický (White, 2000). Je obecně známo, že muži jsou větší než ženy (Scheuer, 2002; Schaefer et al., 2004; Gustafsson et al., 2007), navíc jsou i robustnější a mají procentuálně i celkově více svalů, zatímco menší a gracilnější ženy mají více podkožního tuku (Maughan et al., 1983; Frayer a Wolpoff, 1985). Už při narození je u všech jedinců přítomna určitá míra pohlavního dimorfismu, ale k jeho plnému projevu nedochází před ukončením pubertálního vývoje (Fetter et al., 1967; Ursi et al., 1993; White, 2000; Bulygina et al., 2006; Franklin et al., 2007_a; Jurmain et al., 2009; Chakravarty et al., 2011).

Celkově je pohlavní dimorfismus produktem mnoha faktorů. Jedná se o velmi komplexní znaky, které jsou přes svůj genetický základ silně ovlivňovány faktory prostředí, přičemž příspěvek jednotlivých faktorů není, ani nemůže být, zcela objasněn (Plavcan, 2011). Vliv prostředí je patrný, např. v případě, kdy aktivně sportující žena má více svalové hmoty než neaktivně žijící muž. Podobná situace může nastat při malnutrici, která má větší negativní vliv na růst u mužů a tím snižuje míru pohlavního dimorfismu (Frayer a Wolpoff, 1985).

Celý organismus je tedy vystavován rozličným vnitřním a vnějším faktorům, na něž jednotlivá pohlaví reagují odlišným způsobem. Proto je pohlavní dimorfismus přítomný na všech kostech a stejně jako lebka, je i postkraniální skelet zkoumán nejen z hlediska projevu pohlavního dimorfismu, ale i z hlediska možnosti odhadu pohlaví.

V největší míře jsou bezpochyby mezipohlavně odlišné pánevní kosti (Steyn et al., 2000; Patriquin et al., 2003; Kurki, 2011; Bilfeld et al., 2012), u nichž je odlišnost ve velikosti a tvaru založena na odlišných reprodukčních rolích mužů a žen. Zatímco u pánve ženy je vyžadován jakýsi kompromis mezi optimální lokomocí a dostatečně velkým porodním kanálem, u mužů je pánev biomechanicky specializovaná pouze k nejefektivnějšímu pohybu (např. Brůžek a Murail, 2006).

Pohlavní dimorfismus můžeme pozorovat např. na lopatce (Dabbs a Moore-Jansen, 2010; Scholtz et al., 2010; Papaioannou et al., 2012), kosti pažní (Kranioti et al., 2005; Robinson et al., 2009), předloktí (Barrier a Abbé, 2008), karpálních kostech (Mastrangelo

et al., 2011), kosti stehenní (Asala et al., 2004; Rissech et al., 2008), kosti hlezenní (Harris a Case 2012), kosti hrudní (Franklin et al., 2012_b) i na žebrech (Rejtarová et al., 2009).

2.4. Pohlavní dimorfismus lebky

Lebka je komplexní útvar, který díky odlišné dynamice růstu u mužů a žen vykazuje velkou míru pohlavního dimorfismu. Kosti lebky díky vzájemnému spojení tvoří jeden funkční celek, v němž změna jedné části nutně vyvolává změnu okolních struktur nebo dokonce celku (např. Enlow a Hans, 1996).

Na strukturně velice členité lebce se vyskytuje velké množství hodnotitelných znaků, a proto vyžaduje v antropologii zvýšenou pozornost. Jednotlivé znaky se vyznačují plynulými přechody mezi krajními formami, a jelikož mezi muži a ženami dochází k výraznému překrytí projevu těchto znaků, využívají se v praxi k odhadu pohlaví především znaky s nejmenší zónou překrytí (např. Dobisíková, 1999).

Důležitým poznatkem je fakt, že mužské lebky jsou celkově větší než lebky ženské, a to ve všech tradičně měřených rozměrech (White, 2000; Rösing et al., 2007; Velemínská et al. 2007; Ross et al., 2011; Altayeb et al., 2011). V důsledku toho jsou mužské lebky v průměru těžší (Fetter et al., 1967; Deshmukh a Devershi, 2006) a konfigurace bodů vyznačených na lebce mají vyšší průměrnou centroid size (Green a Curnoe, 2009), která shrnuje velikostní rozdílnost u geometricko-morfometrických metod.

Lebky se však neliší pouze velikostí, ale i tvarem. Ten je produktem nejen odlišného pohlaví, ale i odlišného vývoje a různé velikosti jedinců. Odlišná velikost a nerovnoměrnost růstu mají v různé míře vliv na tvar lebky u lidoopů i u člověka (Schaefer et al., 2004). Jelikož velikostní variabilita mezi muži je větší než mezi ženami, je tvarová variabilita způsobená velikostí též větší u mužů. U žen má naopak větší vliv na výsledný projev znaků pohlavní dimorfismus (Claes et al., 2012; Velemínská et al., 2012). Jiná studie potvrzuje větší variabilitu ve velikosti u mužů, ale zamítá vliv velikosti na výsledný tvar, protože menší a větší jedinci stejného pohlaví si jsou tvarem podobní (Kimmerle et al., 2008).

Dalším podstatným jevem je populační specifita pohlavního dimorfismu, která se týká především velikostní složky formy. Příkladem může být rozdílnost ve velikosti týlního otvoru u různých populací (Wescott a Moore-Jansen, 2001; Murshed et al., 2003; Uysal et al., 2005; Gapert et al. 2009_a; Suazo et al., 2009; Ukoha et al., 2009) nebo potíže

programu Fordisc při odhadu pohlaví u populací nepřítomných v jeho databázi (Ubelaker et al., 2002; Guyomarc'h a Brůžek, 2011). Různé populace se však mezi sebou liší i tvarem (Hennessy a Stringer, 2002; Badawi-Fayad a Cabanis, 2007). Kvůli mezipopulační rozdílnosti ve velikosti a tvaru nemohou standardy vypracované na jedné populaci bezchybně přiřazovat pohlaví u příslušníků jiných populací (např. Ubelaker et al., 2002; Guyomarc'h a Brůžek, 2011).

2.4.1. Klenba lebeční

Jak bylo zmíněno výše, průměrná mužská lebka je ve všech rozměrech větší než průměrná lebka žen. To ale neplatí pro poměrové hodnoty rozměrů nebo po převedení na jednotnou velikost pomocí standardizačních metod. Relativně je průměrná mužská klenba delší než klenba žen (Urbanová, 2009; Franklin et al., 2012_a). I jiné studie poukazují na větší předozadní rozměry lebek u mužů (Steyn a Iscan, 1998; Franklin et al., 2005; Velemínská et al. 2007), ale po standardizaci může být relativně delší i lebka žen, jak je tomu u populace jihovýchodní Asie (Green a Curnoe, 2009). Dále Green a Curnoe (2009), stejně jako Urbanová (2009) a Franklin et al. (2012_a), zjistili, že po převedení na jednotnou velikost bývá širší klenba u žen, a to zejména v oblasti temenních kostí. I šíře klenby superiorně nad očnicemi bývá větší u žen, zato postorbitální šíře klenby je pravděpodobně vlivem značně vyšší šířky horního obličejce většinou větší u mužů (Green a Curnoe, 2009; Urbanová, 2009). Výška klenby (tedy vzdálenost *b-ba*) v průměru nabývá vyšších hodnot u mužů a to relativních i absolutních (Franklin et al., 2005; Green a Curnoe, 2009; Bigoni et al., 2010).

Šupina kosti týlní je globulární a týl celkově klenutější u mužů (Rosas a Bastir, 2002; Velemínská et al., 2007; Velemínská et al. 2008). Morfoskopicky hodnotitelnými znaky jsou linie pro úpon svalů na týlní kosti. Na mužské lebce je přítomen výrazně modelovaný reliéf týlní krajiny a vystupující *protuberantia occipitalis externa* (Fetter et al., 1967; Gülekon a Turgur, 2003; Walrath et al. 2004; Đurić et al., 2005; Walker 2008; Stevenson et al., 2009).

Pozorovatelná je i anteriorní projekce v bodě *glabella* (White, 2000; Rosas a Bastir, 2002; Walker, 2008; Green a Curnoe, 2009; Gonzalez et al. 2011; Franklin et al., 2012_a) a obdobně prominující, velikostně větší nadoboční oblouk u mužů (Shearer, 2012). Nad touto oblastí pokračuje čelo. Jeho profil lze označit jako vertikální u žen a u mužů naopak

jako plynule ubíhající šikmo vzad (např. Borovanský et al., 1967; Urbanová, 2009; Velemínská et al., 2012).

2.4.2. Týlní otvor a týlní kondyly

Též velikost týlního otvoru se mezi pohlavími liší. Z hlediska rozměrových parametrů (délka, šířka, obvod a dopočítaný povrch) jsou sice v průměru větší týlní otvory mužů, ale diskriminaci podle pohlaví umožňují jen s přesností 60 - 75% (Günay a Altinkök, 2000; Suazo et al., 2009; Gapert et al., 2009_a). Podobné rozměry, tj. nejvyšší délku (vzdálenost *b-o*) a šířku (vzdálenost *fol-fol*) týlního otvoru, sledovali u turecké populace Uysal et al. (2005). Dále byly podobné rozměry naměřeny u americké (Wescott a Moore-Jansen, 2001), britské (Gapert et al. 2009_a), brazilské (Suazo et al., 2009), nigerijské (Ukoha et al., 2009) a opětovně turecké (Murshed et al., 2003) populace. V porovnání s nimi však byly u středoevropské populace naměřeny větší rozměry (Gruber et al., 2009) a u indické naopak menší (Radhakrishna et al., 2012). To může být považováno za příklad populační specifity pohlavního dimorfismu.

Po obou stranách týlního otvoru jsou ledvinovité plošky atlanto-occipitálního skloubení, tzv. týlní kondyly. Za předpokladu stejného zatížení jednotky povrchu atlanto-occipitálního skloubení u obou pohlaví se lze domnívat, že v důsledku větší hmotnosti hlavy u mužů je i velikost povrchu týlních kondylů větší u mužů. Skutečně jsou v průměru týlní kondyly u mužů větší než u žen, ale tato variabilita je, stejně jako variabilita rozměrů u týlního otvoru, málo významná. Proto umožňuje diskriminaci podle pohlaví s přesností pouze 70 - 77 % (Gapert et al., 2009_b).

Míra pohlavního dimorfismu ve velikosti týlního otvoru a týlních kondylů umožnila větší přesnost odhadu pohlaví (81 %), pokud došlo k hodnocení obou znaků současně (Uysal et al., 2005).

2.4.3. Processus mastoideus

Processus mastoideus patří mezi často hodnocené morfoskopické znaky. Jedná se o znak s vysokou vahou při odhadu pohlaví (Walrath et al., 2004). Bývá jednoznačně více vyvinutý, mohutnější (Fetter et al., 1967; White, 2000; Walrath et al., 2004; Franklin et al., 2005; Nagaoka et al., 2008; Walker, 2008; Gonzalez et al., 2011; Green a Curnoe, 2009)

a inferiorně umístěný u mužů (Rosas a Bastir, 2002; Green a Curnoe, 2009; Franklin et al., 2012_a).

Dle tzv. Brocovo známky by mužská lebka bez dolní čelisti položená na podložku měla spočívat na bradavkových výběžcích, kdežto ženská nikoliv. Toto je, ale jen zjednodušující rozlišení znaku mezi pohlavími a není možné brát jej jako obecně platné (např. Borovanský et al., 1967; Fetter et al., 1967).

Processus mastoideus lze hodnotit i z hlediska velikosti. Paiva a Segre (2003) se zaměřili, na 2D zobrazeních lebek, na trojúhelník tvořený význačnými body *po* – *ms* – *ast*³. Kromě hodnot vzdáleností mezi jednotlivými body byla spočítána i plocha jimi tvořeného trojúhelníku. Z výsledků vyplývá větší plocha měřené oblasti u mužů u všech zmíněných populací. Avšak tento jeden znak sám o sobě neumožňuje přesnou determinaci pohlaví, navíc se diskriminační hodnota u jednotlivých měřených populací liší (Paiva a Segre, 2003; Kemkes a Gobel, 2006; Suazo et al., 2008; Manoonpol a Plakornkul, 2012; Saini et al., 2012).

2.4.4. Lící kost

Růst lících kostí je silně ovlivněn mohutností žvýkacích svalů (Enlow a Hans, 1996; White, 2000). Proto rozměry lících kostí (minimální šířka a výška) nabývají vyšších hodnot u mužů (Monticelli a Graw, 2008). V souvislosti s lící kostí bývá morfoskopicky hodnocen jařmový oblouk, tvořený spánkovým výběžkem lící kostí a lícím výběžkem kosti spánkové. Relativně je kраниokaudálně vyšší jařmový oblouk mužů (Gonzalez et al. 2011; Bigoni et al. 2010), navíc je často hodnocený i morfoskopicky jako robustní a drsný u mužů (Walrath et al., 2004; Monticelli a Graw, 2008). Výška jařmového oblouku je ovlivněna více superioriorně umístěnou spodní hranou jařmového oblouku u žen (Green a Curnoe, 2009). Šířka lící kosti v místě napojení na kost čelní bývá rovněž větší u mužů (Gonzalez et al, 2011).

Laterálně od lebky odstupující jařmové oblouky vyznačují rozměr největší šířky horního obličeje. Absolutně i relativně bývá hodnota šířky horního obličeje v místě jařmových oblouků (bizygomatická šířka) vyšší u mužů (Steyn a Iscan, 1998; Franklin et al., 2005; Green a Curnoe, 2009; Urbanová, 2009; Velemínská et al., 2012). Vzdálenost zy-

³ *Po* = *porion*, tj. bod na horním okraji vnějšího zvukovodu (dle Martin a Saller, 1957). Body *ms* a *ast* jsou v seznamu význačných bodů v kapitole Metody.

zy⁴ (bizygomatická šířka) je často považována za nejvíce se lišící rozměr mezi muži a ženami (Kranioti et al., 2008; Saini et al., 2011_b). Podobně jako zy-zy je mezi pohlavími vysoce rozdílný rozměr g-zy (Franklin et al., 2012_a).

2.4.5. Oblast horní čelisti a tvrdého patra

U žen prominuje alveolární oblouk horní čelisti více anteriorně (Rosas a Bastir, 2002; Velemínská et al. 2007; Urbanová, 2009). To je zvýrazněno větší anteriorní projekcí *spina nasalis anterior* u mužů (Rosas a Bastir, 2002). V rozporu s tím jsou zjištěny Green a Curnoe (2009) u populace jihovýchodní Asie, kde byl popsán více prominující alveolární oblouk mužů.

Tvrdé patro je poměrně užší a současně předozadně delší (hlubší) u mužů (Bigoni et al., 2010). Celkově však bývá tvrdé patro větší a širší u mužů (White, 2000; Franklin et al., 2005; Green a Curnoe 2009; Urbanová, 2009).

2.4.6. Oblast nosu

Ostřejší úhel přechodu nosních kostí od kosti čelní, více superiorně umístěný strop dutiny nosní a inferiorní posun spodiny nosní dutiny dávají vzniknout většímu oropharyngeálnímu prostoru u mužů. Výsledky byly získány u populačních vzorků afrického (kmen Ibo), britského, portugalského, australského a inuitského původu (Rosas a Bastir, 2002; Urbanová, 2009; Bastir et al., 2011). Důvodem je pravděpodobně potřeba většího přísunu kyslíku, zásobujícího průměrně větší a současně jinak složené tělo mužů. Ti mívají procentuálně více svalů, které spotřebovávají více kyslíku než tuková tkáň přítomná častěji ve větší míře u žen (např. Enlow a Hans, 1996). Více anteroinferiorně směřující nosní kosti žen a stejným směrem klesající přední nosní spodina mužů mají za výsledek velký rozdíl ve výšce nosní apertury (Rosas a Bastir, 2002), a to ve prospěch větší výšky vstupu do nosní dutiny u mužů. Pozoruhodné je však zjištění, že nosní apertura je relativně širší u žen (Rosas a Bastir, 2002; Cantín et al., 2009; Bigoni et al., 2010; Bastir et al., 2011).

Z ostřejšího úhlu odstupu nosních kostí od kosti čelní u mužů, o kterém se zmiňují i Borovanský et al. (1967) a Fetter et al. (1967), vyplývá větší anteriorní prominence

⁴ Zy = zygion, je bod ležící nejvíce laterálně na jařmovém oblouku (dle Martin a Saller, 1957).

nosních kůstek (Velemínská et al., 2008; Urbanová, 2009; Bigoni et al., 2010; Velemínská et al., 2012). Přestože existují v rámci stejného pohlaví interpopulační rozdíly v orientaci spodní stěny nosní dutiny či ve výšce nosní apertury, výška choan je stabilní mezi jednotlivými populacemi a vždy větší u mužů (Bastir et al. 2011).

2.4.7. Očnice

Stejně jako u všech ostatních struktur, je celková velikost a kapacita očnice větší u mužů, ale pokud jsou rozměry očnice vztažené vzhledem k velikosti obličeje nebo velikosti těla, je očnice relativně větší u žen (Urbanová, 2009; Franklin et al., 2012_a). Při pokusu oddělit populační vzorek podle pohlaví za pomoci tvaru očnice došlo k velkému překrytí mezi tvary mužů a žen (Pretorius et al., 2006). I tak lze ženský tvar orbity označit jako více okrouhlý, sbíhající laterálním směrem inferiorně a posteriorně (Pretorius et al., 2006; Bigoni et al. 2010). Za to typický tvar očnice u mužů se jeví jako obdélníkový a laterálně protáhlý (White, 2000; Pretorius et al., 2006; Urbanová, 2009). V porovnání s orbitou žen je tedy mužská relativně nižší a širší (Bigoni et al. 2010). To dokazuje výškový rozměr očnice, daný body *sbk-spa*, který je relativně větší u žen (Dayal et al., 2008). Muži mívají očnice blíže k sobě (Bigoni et al., 2010).

Pohlavní dimorfismus, se projevuje i na superiorním okraji očnice, jehož vnitřní strana je u žen popisována jako ostrá a hranatá s celkově asymetrickým průřezem, kdežto u mužů je okraj označovaný jako tupý nebo oblý se symetrickým profilem (Fetter et al., 1967; Graw et al., 1999).

2.4.8. Dolní čelist

Dolní čelist je často zkoumána z hlediska pohlavního dimorfismu, který se v maximální míře projevuje především jako důsledek odlišného pubertálního vývoje mužů a žen (Franklin et al., 2007_a). Hlavní míru velikostní rozdílnosti mezi muži a ženami nesou bigoniální šířka ($go-go^5$), výška ramene a celková délka dolní čelisti (Dayal et al., 2008). S výraznou rozdílností rozměru *go-go* se setkáváme i u dalších populací (Steyn a Iscan, 1998). S tím souvisí i větší vzdálenost mezi kondylárními výběžky u mužů (Kharoshah et

⁵ Go = gonion, bod přechodu větve mandibuly na tělo mandibuly. Střed mandibulárního úhlu. (dle Martin a Saller, 1957).

al., 2010). Výška ramene dolní čelisti, ať už v koronoidním výběžku nebo kondylárním výběžku, nabývá z hlediska rozměrů vyšších hodnot u mužů (Franklin et al., 2006; Saini et al. 2011_a).

Zajímavé je použití obvodové křivky dolní čelisti, s přesností odhadu pohlaví 92 – 97 % (Schmittbuhl et al., 2001) nebo analýza prohnutí ramene dolní čelisti (mandibular ramus flexure). U mužů se prohnutí projevuje jako dlouhé a rovnoměrné a u žen jako méně výrazné (Loth a Henneberg, 1996; Oettlé et al., 2005; Pretorius et al., 2006). Klíčová je však správná lokalizace prohnutí, které je definováno jako konkavita na dorsální hraně ramena mandibuly lokalizovaná ve výšce horizontálního prodloužení skusové roviny dolní čelisti (Loth a Henneberg, 1998). Hodnocení projevu tohoto znaku a jeho využití je diskutabilní, zejména pro značně odlišné výsledky analýz tvaru a odhadu pohlaví u různých populačních vzorků (Koski, 1996; Donnelly et al., 1998; Indrayana et al., 1998; Haun, 2000; Hill, 2000; Kemkes-Grottenthaler et al., 2002; Balci et al., 2005). Pozoruhodností je větší variabilita projevů prohnutí ramena dolní čelisti u žen, znamenající stabilnější projev znaku u mužů a umožňující přesnější odhad pohlaví u mužů (Loth a Henneberg, 1996; Oettlé et al., 2005).

U anteriorně umístěného bradového výběžku, sice není jasný důvod jeho vzniku ani jeho funkce, ale je na něm pozorovatelný rozdílný vývoj a tvar mezi pohlavími. Při porovnávání tvaru profilových kontur dolní čelisti ve třech sagitálních rovinách, byl zjištěn vysoký přesah výsledných křivek mezi pohlavími, přestože typické tvary pro ženy a muže byly odlišitelné. Vysoká míra přesahu je přisuzována velké tvarové variabilitě projevu tohoto znaku u obou pohlaví. Celkově je u mužů bradový výběžek výrazněji prominující anteriorně, občas doplněn vyvinutými laterálními hrboly umístěnými na těle dolní čelisti v sagitální rovině na úrovni špičáků. Tím se projevuje vyšší šíře a hranatý nebo čtverhranný obrys bradové krajiny (Borovanský et al., 1967; Thayer a Dobson., 2010). V souladu s předcházejícími tvrzeními jsou zjištěny i dalších výzkumů, které shodně zaznamenaly větší prominenci bradového výběžku u mužů (Rosas a Bastir, 2002; Walker, 2008; Velemínská et al., 2012).

2.5. Sekulární trend

S projevem pohlavního dimorfismu souvisí i sekulární trend (z lat. *saeculum*). Vlivem sekulárního trendu se mění hodnota některých znaků na kostře. Jedná se tedy

o celkovou změnu formy, která vyjadřuje rozdíl velikosti a tvaru, mezi populacemi za jednotku času.

Během posledního století došlo k významnému nárůstu průměrné výšky postavy (Gustafsson et al., 2007) i kraniofaciálních rozměrů. Tyto změny jsou přisuzovány změnám životních podmínek spojených s industrializací (Buretić-Tomljanović et al., 2006), kde hlavními faktory jsou výživa, zdraví a změna genetické skladby populací (Wescott a Jantz, 2005).

Sekulárním trendem došlo ke zvětšení výšky obličeje, avšak relativně méně než ke zvětšení výšky těla (Jonke et al., 2007). Pozorováno bylo zúžení mozkovny se současným předozadním protažením a nárůstem výšky klenby (Jantz a Meadows-Jantz, 2000; Wescott a Jantz, 2005; Buretić-Tomljanović et al., 2006). Tento jev se nazývá dolichocephalizace (Buretić-Tomljanović et al., 2006). Jiné studie však zaznamenaly relativní zkrácení klenby u obou pohlaví (Hayashi et al., 2011), či pouze u žen (Weisensee a Jantz, 2011). Ve spojitosti s nižší šířkou a větší výškou mozkovny dochází k zúžení (Weisensee a Jantz, 2011) a zvýšení (Buretić-Tomljanović et al., 2006; Weisensee a Jantz, 2011) obličejové části lebky. Celkově bylo zaznamenáno zvětšení objemu mozkovny (Wescott a Jantz, 2005).

Dalším zaznamenaným jevem je posun baze inferiorně (Wescott a Jantz, 2005; Weisensee a Jantz, 2011). Obličej se posouvá anteriorně (Weisensee a Jantz, 2011) a dochází k protrusi oblasti *spina nasalis anterior* (Jonke et al., 2007, Hayashi et al., 2011). Weisensee a Jantz (2011). Stejní autoři dále zaznamenali nárůst šířky patra, zvětšení bradavkového výběžku a současné zužování bizygomatické šířky u mužů se zvýšením u žen.

2.6.Odhad pohlaví

Existují čtyři hlavní atributy biologické identity a těmi jsou věk, pohlaví, výška postavy a etnická příslušnost jedince (Scheuer, 2002). Doposud bylo vyvinuto velké množství vyšetřovacích metod, které jsou však založeny jen na rovině pravděpodobnosti, protože jejich prostřednictvím je pouze odhadováno pohlaví somatické a to se může od pohlaví genetického lišit. Proto neustále probíhají výzkumy hledající metodu, která by umožňovala co nejvyšší přesnost správného odhadu pohlaví kosterního nálezu, neboť vysoká přesnost správného odhadu pohlaví hraje důležitou roli v mnoha odvětvích vědy,

od paleoantropologických studií, přes bioarcheologii až po forenzní vyšetřování (White, 2000; Kemkes-Grottenthaler, 2001; Ubelaker et al., 2002; Kjellström, 2004; Cattaneo, 2007).

Za účelem odhadu pohlaví se využívají především pánevní kosti. Při jejich špatné zachovalosti se používá lebka. Pokud obě zmíněné části skeletu chybí, je možné uskutečnit odhad pohlaví z jiných částí kostry (např. z dlouhých kostí), ale protože je pohlavní dimorfismus dlouhých kostí populačně specifický, není takovýto odhad vhodný (např. Brůžek a Murail, 2006).

2.6.1. Pánevní kosti

Nejpřesnější odhad pohlaví umožňují analýzy pánevních kostí, které nesou populačně nespecifické znaky, společné drtivě většině příslušníků jednotlivých pohlaví (White, 2000). Jedná se o pohlavně specifické rozdíly ve velikosti a tvaru založené na odlišných reprodukčních rolích jako výsledku evolučních a funkčních adaptací. Zatímco pánve žen jsou utvářeny jako kompromis mezi optimální lokomocí a dostatečně velkým porodním kanálem, u mužů je pánev biomechanicky specializovaná pouze za účelem nejvyšší efektivity pohybu. Pánevní kost lze rozdělit do morfofunkčních oddílů nesoucích největší míru pohlavního dimorfismu. Těmi jsou sakroiliakální spojení, ischiopubický segment a acetabulum (Brůžek a Murail, 2006). Na základě hodnocení morfologických znaků na pánvi je založeno několik metod odhadu pohlaví, jejichž největším nedostatkem je odlišná přesnost při testování různých populací (Scheuer, 2002).

Metody odhadu pohlaví z pánevních kostí se dají rozdělit na dvě kategorie. První kategorií jsou metody morfoskopické, založené na vizuálním hodnocení znaků a nazývány jsou též jako metody vizuální či kvalitativní. Druhou kategorií jsou metody morfometrické, založené na měřeních rozměrů, někdy označované jako kvantitativní (např. Urbanová, 2009).

Ve vizuálních metodách se hodnotí stupeň rozvoje popsaného znaku. Výborných výsledků lze dosáhnout, např. použitím metody popisované Brůžkem (2002). Na dvou testovaných populacích bylo dosaženo 94,4 % správných určení pohlaví, pouze 3,3 % neurčených jedinců a 2,3 % chybně určených. V této práci jsou též vypočítány pravděpodobnosti správného odhadu pohlaví použitím jednotlivých znaků (Brůžek, 2002). Ten je možný, ale je s nižší přesností, proto lze říci, že pomocí žádného ojedinelého znaku

nelze uskutečnit dostatečně přesný odhad pohlaví jedince (Brůžek a Murail, 2006; Williams a Rogers, 2006). Vizuální hodnocení pohlavně dimorfních znaků pánevní kosti pro odhad pohlaví použili Patriquin et al. (2003), Rösing et al. (2007), Ubelaker a Volk (2002) či Đurić et al. (2005). Z hlediska tvaru hodnotí objekt i analýzy pomocí metod geometrické morfometrie. Například analýza tvaru *incisura ischiadica major* umožňuje diskriminaci pohlaví s přesností 87 – 93 % (Pretorius, 2006) a analýza celé pánevní kosti dokonce s přesností 98 % (Bytheway a Ross, 2010).

Metody využívající morfometrii pánevní kosti dokáží dobře oddělit jedince podle pohlaví (Patriquin et al., 2005). Z metrických metod dosahuje výborných výsledků software DSP, který je založen na hodnocení množiny přesně definovaných lineárních rozměrů. DSP využívá celkem deseti rozměrů, které vzájemně porovnává. Dokáže však pracovat i s pouhými čtyřmi rozměry. Software následně vypočítá pravděpodobnost přiřazení jedince k pohlaví (Murail et al., 2005).

Největší výhodou odhadu pohlaví z pánevních kostí je vysoká míra pohlavního dimorfismu přítomného na pánvi a jeho nízká populační specifita (Brůžek a Murail, 2006). Přesnost odhadu však závisí i na zachovalosti kosterního nálezu a v tom je největší nevýhoda pánevních kostí. Bývají totiž kvůli svému ventrálnímu postavení a relativně tenké kompaktě často značně poškozeny (Mays a Cox, 2000; Scheuer, 2002). V případech, kdy pánevní kosti nejsou součástí nálezu nebo jsou zlomkovité, je proveden odhad pohlaví za pomoci lebky, součásti kostry vyjadřující druhou nejvyšší míru pohlavního dimorfismu (Brůžek a Murail, 2006).

2.6.2. Lebka

Stejně jako u pánve, lze metody odhadu pohlaví využívající lebky rozdělit na metody založené na vizuálním hodnocení vybraných pohlavně dimorfních morfologických znaků a na metody založené na metrickém hodnocení rozměrů. Oba typy hodnocení pohlavního dimorfismu pak částečně spojuje geometrická morfometrie tím, že hodnotí velikost i tvar objektu současně (např. Oettlé et al., 2005).

Morfoskopické metody

Morfoskopické metody jsou založené na vizuálním hodnocení, skórování nebo porovnávání znaků na lebce. I přes množství vysoce přesných morfometrických metod, mnoho antropologů stále využívá k odhadu pohlaví vizuálního hodnocení znaků na lebce. A to zejména pro relativní snadnost použití, rychlost získání výsledků a možnost terénního využití, jelikož k odhadu nejsou potřeba žádná měření ani žádné nástroje. Z množiny pohlavně dimorfních morfologických znaků jsou k odhadu pohlaví používány jejich různé, často podobné, kombinace (Rogers 1991; Walrath et al. 2004; Đurić et al., 2005; Rogers, 2005; Hu et al., 2006; Williams a Rogers 2006; Walker 2008; Veyre-Goulet et al., 2008; Stevenson et al., 2009; Ramsthaler et al., 2010).

Použití morfoskopických metod bývá ovlivněno interobservační (Kemkes-Grottenthaler et al., 2002; Walrath et al., 2004) i intraobservační chybou (Hill, 2000; Kemkes-Grottenthaler et al., 2002; Rogers, 2005; Williams a Rogers, 2006). Oba typy chyb jsou zaviněny subjektivitou hodnocení. Snížení subjektivity hodnocení pomáhá přesná definice hodnoceného znaku a možnost porovnání s doprovodnými schémata (Walrath et al. 2004; Walker, 2008).

Z hlediska populační specificity pohlavního dimorfismu lebky je nutno podotknout, že míra rozvoje znaku se v jednotlivých populacích mění, zároveň se v různých populacích mění i váha jednotlivých znaků. Proto užití stejného hodnocení na dvou různých populacích může podávat odlišné výsledky (Rogers, 1991; Williams a Rogers, 2006). Přesnějších výsledků dosahuje hodnotitel se znalostí hodnocené populace (Walker, 2008). Nejsložitější je tedy zařadit ojedinělý nález neznámého původu. Pro optimalizaci odhadu je dobré porovnávat nález se stejnou populací (Walrath et al., 2004).

Je možné provádět odhad pohlaví i hodnocením jednotlivých znaků. To však neumožňuje přesnou diskriminaci pohlaví (69 – 83 %). Současným hodnocením více znaků zároveň lze tuto přesnost zvýšit až na 90 %. Z možnosti hodnotit jednotlivé znaky vyplývá i možnost využití metody na fragmentárním nález (Rogers, 2005; Monticelli a Graw, 2008; Walker, 2008).

Morfologické znaky jsou kvantitativně hodnoceny metodami geometrické morfometrie (Oettlé et al., 2005). Jedná se o hodnocení tvaru očnice, tvaru nosní apertury, hrbolů a drsnatin podél lebeční klenby, bradavkového výběžku, jařmového oblouku nebo mandibuly (Schmittbuhl et al., 2001; Rosas a Bastir, 2002; Pretorius et al., 2006; Bigoni et al., 2010; Bastir et al., 2011; Gonzalez et al., 2011).

Morfometrické metody

Morfometrické metody jsou založeny na měření vybraných kranio-metrických rozměrů, tedy lineárních vzdáleností mezi význačnými body různých kategorií (Bookstein, 1991). Vzdálenosti mezi těmito body, poměry těchto vzdáleností a úhly mezi nimi zachycují velikostní a částečně i tvarovou složku formy (Kranioti et al., 2008; Franklin et al., 2012_a).

U souboru dokumentovaných lebek je nejprve nutné získat data naměřením zvolených rozměrů. Dále je, po získání průměrných hodnot a směrodatných odchylek pro jednotlivá pohlaví v dané populaci, možný odhad pohlaví podle vypočítané diskriminační funkce. Morfometrické metody umožňují odhad pohlaví s přesností 83 – 95 % (Steyn a Iscan, 1998; Deshmukh a Devershi, 2006; Franklin et al., 2006; Ramsthaler et al., 2007; Kranioti et al., 2008; Robinson a Bidmos, 2009; Zavando et al., 2009; Ross et al., 2011; Saini et al., 2011_b; Franklin et al., 2012_a).

Odhad pohlaví ojedinělého nálezu, bez znalosti etnické příslušnosti, je pomocí morfometrie nepřesný, protože pro získání diskriminační funkce je vždy potřeba mít k dispozici referenční data pro zkoumaný materiál. Nelze používat diskriminační funkce získané z jiné populace, protože jednotlivci i různé populace se mezi sebou často liší velikostně (Hennessy a Stringer, 2002; Badawi-Fayad a Cabanis, 2007; Bastir et al., 2011) i tvarově (Franklin et al., 2007_b; Walker, 2008).

Neznalost etnicity a referenčních dat částečně řeší program Fordisc. Tento software umožňuje odhad pohlaví i etnické příslušnosti zadáním až 36 kranio-metrických rozměrů lebky do příslušných polí v tabulce. Výsledkem je pravděpodobnost zařazení jedince k pohlaví a populaci. Fordisc je, od vydání původní verze v roce 1993, neustále rozšiřován o data z dalších populací (Ousley a Jantz, 1996). Na německé populaci dosáhl program přesnosti odhadu pohlaví 86 % pro ženy a 94 % pro muže (Ramsthaler et al. 2007). U vzorku populace hispánského původu byla přesnost odhadu u žen 100 %, avšak mužské lebky byly z více než 50 % klasifikovány jako ženské. Což mohlo být dáno celkově malou průměrnou velikostí lebek u této populace (Ubelaker et al., 2002). U populací, které nejsou součástí databáze Fordisc, byla přesnost odhadu podle nastavení jen 52,2 – 77,8 %, což je pro praktické využití nepostačující. Fordisc jednoznačně neumí pracovat s populacemi, které nemají zastoupení v databázi programu (Guyomarc'h a Brůžek, 2011). Proto je databáze Fordisc rozšiřována daty o populacích z dalších geografických oblastí.

Na podobném principu funguje program COLIPR (Coordinate-based Legal Investigation PProgram). Do programu se zadávají 3D souřadnice 24 kranio-metrických bodů nebo hodnoty 17 rozměrů lebky. Pomocí vložených dat program propočítá diskriminační funkce a podle nich provede odhad pohlaví (Urbanová, 2009).

Inovací morfometrických metod je využití moderních přístupů a výkonné výpočetní techniky umožňující rychlé zpracování velkého objemu dat. Metody geometrické morfometrie umožňují získání souřadnic bodů v 3D prostoru a následný výpočet vztahů (vzdáleností, poměrů vzdáleností, úhlů mezi spojnicemi) mezi jednotlivými význačnými body. Tím metody geometrické morfometrie automaticky nalézají místa největší rozdílnosti formy mezi objekty. Další vlastností metod geometrické morfometrie je možnost odfiltrování vlivu velikosti pomocí standardizačních metod, jakými jsou Booksteinovská transformace nebo Prokrustovská analýza a její variace (Bookstein, 1986; Zelditch et al., 2004). Tím tvar získává větší výpovědní hodnotu pro srovnávací analýzu.

Protože jsou muži v téměř všech rozměrech lebky v průměru větší než ženy, je dosahováno vyšší přesnosti odhadu pohlaví současnou analýzou tvaru i velikosti (Green a Curnoe, 2009). Na druhou stranu, tím, že je velikost interindividuálně i populačně velmi specifická, je její využitelnost pro odhad pohlaví limitována (Hennessy a Stringer, 2002; Badawi-Fayad a Cabanis, 2007; Bastir et al., 2011). Z tohoto důvodu je lepší využívat velikost jen v případě, kdy známe etnickou či populační příslušnost zkoumaného nálezu, nebo jsou-li hodnocené objekty součástí rozsáhlejšího nálezu umožňujícího získání referenčních dat.

Výhodou morfometrických metod je vyšší objektivita, která díky přesně definovaným kranio-metrickým bodům ústí v nižší interobservační chyby. Ze stejného důvodu je i nižší intraobservační chyba daná snadnější opakovatelností měření (Rogers, 2005; Dayal et al., 2008). Další výhodou je možnost statistického zpracování dat (Urbanová, 2009). Naopak nevýhodou je potřeba měřících přístrojů a srovnávacích dat, nebo nepoužitelnost morfometrie na fragmentárním nálezu, protože morfometrické metody vyžadují komplexní zachovalost lebky (Rogers, 2005). Jako výhodou morfometrických metod lze považovat možnost měření objektů z jejich 2D (fotografie, rentgen) či 3D (faciální sken, počítačová tomografie) zobrazení, bez jejich fyzické přítomnosti.

3. Cíle práce

Diplomová práce se za pomoci moderních zobrazovacích a analytických přístupů v antropologii zabývá hledáním významného pohlavního dimorfismu tvaru přítomného na lidské lebce a zároveň shodného pro více populací. Z toho vycházejí dílčí cíle práce.

1. Práce si klade za hlavní cíl odhalení míry pohlavního dimorfismu lebky, elementu vykazujícího druhou nejvyšší míru pohlavního dimorfismu hned po páňvi, na testovaném vzorku. Zkoumaný materiál pocházel od americké populace z oblasti Nového Mexika. Na pohlavní dimorfismus je nahlíženo nejen jako na variabilitu tvaru lebky jako celku, ale i na variabilitu tvaru jednotlivých segmentů. Testované oblasti s očekávaným nálezem signifikantní míry pohlavního dimorfismu jsou oblast očnénice, oblast vstupu do nosní dutiny, tvrdé patro a horní obličej.

2. Dalším cílem diplomové práce je porovnání zjištěného pohlavního dimorfismu na americké populaci s pohlavním dimorfismem zjištěným na populaci ze střední Evropy, který byl publikován ve studii Bigoni et al. (2010). Práce Bigoni et al. (2010) byla zaměřena na pohlavní dimorfismus lebky jako celku, tak i jejích jednotlivých částí. Výzkum bude aplikován na všechny oblasti s tvarovou variabilitou, která nám výsledná data umožňují.

3. Vedlejším cílem práce je testování možností převodu 2D dat do 3D prostoru. Tato zřídka používaná metoda umožní studium 3D objektů bez jejich fyzické přítomnosti a tím usnadňuje sdílení dat mezi různými vědeckými pracovišti. Převod dat nám umožňuje program PhotoModeler Scanner. Jeho upotřebitelnost a využitelnost v antropologii bude dále diskutována.

4. Materiál a metody

4.1. Materiál

Jako materiál zpracovaný řešitelem v rámci této studie byly použity sady fotografií 66 lebek. Jedná se o lebky, které jsou součástí dokumentované kosterní sbírky uložené v Maxwell Museum of Anthropology, patřící k University of New Mexico, v Albuquerque (Nové Mexiko, U. S. A.). Z celkového množství 66 sad fotografií lebek bylo vybráno 62 vhodných pro analýzu. Zbylé čtyři sady byly vyloučeny pro příliš velkou ztrátu dat způsobenou významným rozsahem chybějících částí lebek. Ve zpracovaném souboru je tedy 32 lebek mužů a 30 lebek žen. Pro nemožnost lokalizace bodu *pr* byli z analýz oblasti patra a celé lebky vyloučeni další dva jedinci. Jednalo se o jednu ženu a jednoho muže (viz tabulka 1). Na všech analyzovaných fotografiích byly lebky náležící jedincům bělošského původu.

Každá sada fotografií obsahuje 16 snímků téže lebky z osmi různých úhlů ve dvou odlišných polohách lebky (viz obrázky 2 a 3). V první poloze je lebka umístěna vertikálně a zadním úsekem lebeční baze spočívá na podložce. Ve druhé poloze je lebka položena na levou laterální stěnu lebeční klenby. Pro každou z poloh tak odpovídá osm snímků nafocených z osmi různých úhlů tak, aby byla každá lebka nasnímána po celém obvodu a zároveň tak, aby se jednotlivé snímky dostatečně překrývaly. Překrytí snímků je velice důležité pro pozdější analýzu popsanou v následující kapitole.

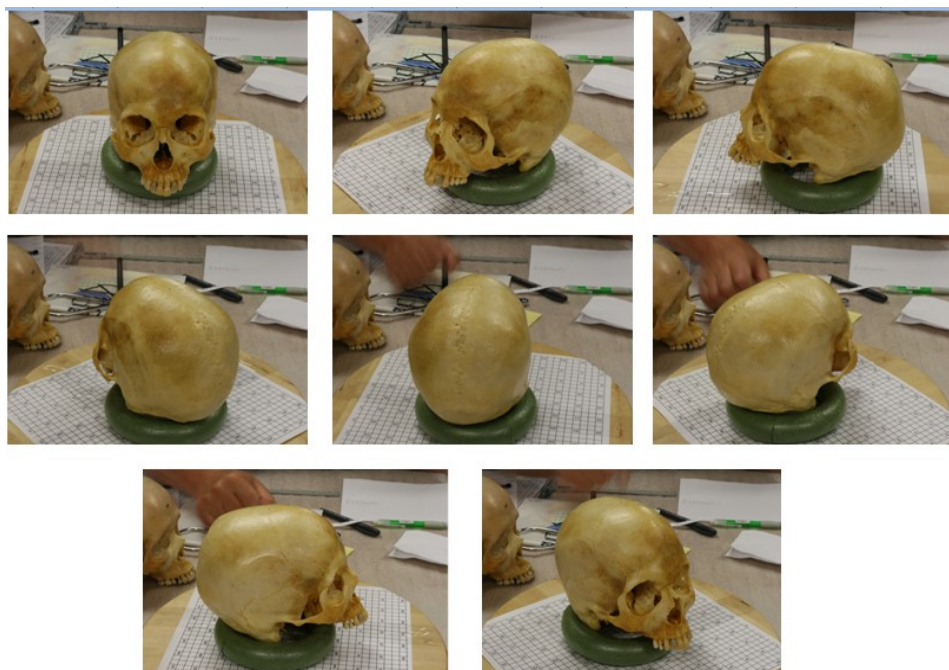
Tabulka 1: Počet analyzovaných lebek a význačných bodů v rámci sledovaných oblastí

Oblast lebky	N lebek	N mužů	N žen	N bodů
Lebka	60	31	29	59
Horní obličej	62	32	30	30
Lebeční klenba	62	32	30	20
Oblast nosu	62	32	30	9
Očnice	62	32	30	10
Oblast patra	60	31	29	4
Týlní otvor	62	32	30	4

Dále jako materiál byly použity hodnoty vzdáleností mezi několika v morfometrii běžně používanými význačnými body. Tyto rozměry byly reálně změřeny na lebkách školitelem diplomové práce a hodí se tedy pro výpočet reliability měření. Jedná se o rozměry *g-op*, *b-ba*, *ns-ba*, *ns-pr*, *eu-eu*, *ast-ast*, *ft-ft*. Rozměry byly odečteny u všech analyzovaných lebek.



Obrázek 3: Lebka 192 vyobrazena v obou snímaných polohách.



Obrázek 2: Fotografie lebky 192 ze všech úhlů ve vertikální poloze.

4.2. Metody

4.2.1. Pořízení sad fotografií

V práci byly využity sady fotografií lebek, které byly pořizovány aparátem Canon EOS 30D. Byly jím pořízeny všechny snímky lebek i fotografie potřebné pro kalibraci software PhotoModeler Scanner.

Důležitý je způsob nasnímání fotografií pro budoucí práci v programu PhotoModeler Scanner. Musí být splněno několik kritérií a pro optimalizaci výsledků i doplňujících doporučení.

První a nejdůležitější kritérium je překrytí fotografií, které je při využívání programu PhotoModeler Scanner nutné. Pro získání 3D modelu je potřeba zadat alespoň minimální množinu shodných bodů na více fotografiích. To znamená, že je nutné, aby každý význačný bod zahrnutý v analýze byl dobře rozeznatelný alespoň na třech snímcích. Urychlení a zvýšení přesnosti zadávání význačných bodů by bylo možné pomocí projekce pravoúhlé sítě na zkoumaný objekt, protože síť rovnoběžek by umožnila rychlejší orientaci hodnotitele na objektu.

Druhým kritériem je ostrost fotografií. Každé rozostření fotografie zkresluje výsledky při následném propočítávání 3D souřadnic. Fotoaparát byl proto trvale připevněn na stativu. Přesto po vícenásobném zvětšení snímků, nutném pro přesnou lokalizaci význačných bodů, nebyla ostrost fotografií optimální. Lepšího výsledku, tedy vyšší ostrosti fotografie, by se dalo dosáhnout využitím sériového neboli kontinuálního snímání, kde dochází ke složení více fotografií do jednoho celku. Tato metoda sice znamená velké zvýšení objemu dat, ale při dnešních možnostech vysokokapacitních uložišť dat to není problém.

Dalším kritériem je nutnost shodné pozice objektu na sérii snímků. V žádném případě se nesmí během fotografování pohnout se snímaným objektem. Objekt proto byl ve stabilní poloze, připevněn k podložce nebo jinému statickému objektu. V případě, kdy je s objektem hnuto, musí být snímání přerušeno a zopakováno. Jestliže tomu tak není a posun je hodnotiteli zřejmý, musí být sada snímků vyřazena z další analýzy.

4.2.2. PhotoModeler Scanner

PhotoModeler Scanner je program, ve kterém probíhalo další zpracování získaných fotografií. Jedná se o software vyvinutý firmou Eos Systems Inc., využívaný pro 3D

modelování a měření objektů s vysokou přesností. Program poskytuje možnost převodu dat z 2D zobrazení objektů na 3D data (souřadnice bodů) za předpokladu, že je k dispozici dostatečný počet fotografií objektu s vhodným pokrytím jeho plochy. V našem případě byl počet fotografií dostačující a podařilo se získat 3D souřadnice význačných bodů pro všechny lebky.

Postup práce v programu

a) Kalibrace

Jako první krok práce s programem PhotoModeler Scanner je nutná kalibrace. Ta se provádí podle fotografií kalibrační desky, pořízených z několika úhlů. Dostačujících je osm snímků desky, která musí být dobře osvětlená, aby vynikl kontrast jejích částí. Z fotografií kalibrační desky získává program informace o přístroji, které pak využívá při analýzách objektů nafocených stejným aparátem. Každý fotoaparát musí být kalibrován zvlášť.

b) Vyznačení analyzované konfigurace bodů

Po kalibraci je možné do programu nahrát data. Před nahráním první sady fotografií je nutno v programu zvolit fotoaparát, kterým byly snímky pořízeny. Při otevírání další sady snímků je již automaticky použito stejné nastavení.

Vždy se nahrává celá sada fotografií objektu s tím, že je možné další fotografie stejného objektu později vyloučit nebo naopak vložit. Poté již zadáváme význačné body na jednotlivé snímky klasicky, stisknutím levého tlačítka myši. Důležité je zadávat body u všech sad fotografií v předem promyšleném pořadí. Pro pozdější statistické zpracování je nutné zachovat pořadí vyznačených bodů u všech sad fotografií, přičemž PhotoModeler Scanner neumožňuje měnit číselné označení, a tím i pořadí bodů.

Pro úspěšné získání souřadnic bodů je potřeba vyznačit dostatečný počet homologních bodů na všech snímcích. Není nutné, aby se jednalo pouze o body využívané v analýze tvaru, lze použít jakékoliv body, jejichž lokalizace na snímcích stejného objektu je shodná. Pomocné body lze odstranit po vypočtení 3D souřadnic přímo v programu PhotoModeler Scanner nebo po exportu souřadnic do tabulek v jiném programu (Microsoft Office Excel, OpenOffice Calc).

Pro převedení objektu do 3D prostoru je nutné splnit potřebná kritéria. Prvním z nich je, že všechny body musí být přesně vyznačeny nejméně na třech libovolných snímcích jednoho objektu. To je nutné pro analyzovanou konfiguraci bodů i pro pomocné body umožňující propočet souřadnic. Optimální je, pokud je každý bod přesně vyznačen na více než třech snímcích.

Za druhé je nezbytné, aby jednotlivé fotografie byly pořízeny z jiného úhlu, jinak mezi nimi nedojde k posunům a rotacím objektu, které jsou potřeba pro výpočet souřadnic bodů v 3D prostoru.

Za třetí je nutné, aby na všech snímcích bylo vyznačeno nejméně 6 bodů, které jsou přítomny na dalších dvou snímcích. V praxi však bylo toto číslo značně vyšší. Program nedokázal převést snímek do 3D prostoru pokud na něm bylo méně než deset bodů splňujících ostatní kritéria.

Z předešlého důvodu vychází čtvrté kritérium. Tím je potřeba překrytí množiny bodů mezi jednotlivými snímky. Fotografie musí být spojena s dalšími fotografiemi přes nejméně šest bodů. Propojené fotografie musí být spojeny s dalšími snímky přes dalších nejméně šest bodů, atd. dokud nedojde k propojení všech fotografií.

Pro názornost je uveden příklad. Máme-li body a - f vyznačeny na snímcích 1 - 4, jsou tyto fotografie propojeny. Ale pro propojení se snímkem 5, který má s předcházejícími snímky tři společné body (např. a, b, c), potřebujeme nejméně další tři body (např. g, h, i). Snímek 6 také musí obsahovat alespoň šest společných bodů s jinými snímky, jinak u něj nedojde k přepočtu. A to platí pro všechny ostatní snímky.

Tímto způsobem byla v naší práci mezi sebou propojena celá sada 16 snímků u všech 61 lebek. Ač se to může zdát snadné, protože počet význačných bodů použitých v analýze je 59, není jednoduché toho dosáhnout. Lokální body, např. z lebeční baze, jsou totiž přítomny jen na fotografiích lebek zobrazujících bazi a neumožňují tedy propojení s dalšími fotografiemi. Jiné body (např. *sbk*, *spa*, *ju*, *zm*) nelze přesně lokalizovat na větším množství fotografií. K propojení jsou potřeba body společné mnoha snímkům, dostatečně přesně lokalizovatelné s dobrou opakovatelností jejich lokalizace. Těmi jsou především význačné body prvního typu (viz podkapitola Význačné body) a právě pomocné body, které nemají biologické ani funkční opodstatnění, jen je jejich lokalizace snadná a opakovatelná. Jedná se třeba o označení lebek (archivní číslo), specifické rysy (otvory, skvrny). Tyto pomocné body byly pro práci v programu a převedení objektu do 3D prostoru nezbytné.

Po převedení 2D dat do 3D prostoru je možné vyznačit zbylé, doposud nevyznačené, landmarky druhého i třetího typu. U nich totiž stačí zadat bod jen na jednom snímku a na dalších snímcích nám jeho lokalizaci usnadní programem zobrazovaná linie, která je tečnou daného bodu. Na třetím snímku je pak bod dán již dvěma tečnami a jeho lokalizace by se tedy měla shodovat s průsečíkem těchto linií.

Takto jsou postupně zadány všechny význačné i pomocné body a proveden propočet souřadnic. Podstatné je, aby význačné body a pomocné body šlo snadno oddělit, aby v pozdější analýze byly použity jen ty význačné. Proto jsme v analýzách nejprve zadali všechny význačné body alespoň na jednom snímku. Poté jsme vyznačili pomocné body, nechali provést zpracování dat a přepočtení objektu do 3D prostoru. Až nakonec jsme zpřesnili lokalizaci jednotlivých bodů a co možná nejpřesněji je vyznačili na maximálním možném počtu fotografií. Lokalizace landmarků na jednotlivých fotografiích je časově náročný proces. Všechny význačné body musí být zadány přesně, jinak nedojde k přepočtení dat do 3D prostoru.

c) Škálování

Po získání 3D souřadnic proběhlo škálování, při němž je potřeba vybrat počátek soustavy souřadnic, zvolit souřadnicové osy a zvolit referenční rozměr, který by posloužil jako měřítko a umožnil by přepočet souřadnic na metrické jednotky. Jako počátek soustavy souřadnic jsme vybrali bod *nasion*. Osou *x* se stala rovnoběžka linie *ft-ft* procházející bodem *n* a osou *y* linie *n-l*. Nakonec byl vybrán referenční rozměr. Pro výběr bylo k dispozici 7 lineárních rozměrů lebky. Vybrána byla vzdálenost *g-op* pro jistotu shody lokalizace bodů u lineárního měření a v programu PhotoModeler Scanner. Jedná se sice o body obtížně opakovaně lokalizovatelné na stejné místo, ale na našem souboru objektů byla jejich poloha vyznačena tužkou již před měřeními. Proto lze předpokládat, že jejich lokalizace je v obou případech totožná. Rozměr byl zadán v *mm*, proto i výstupy dalších měření jsou v *mm*.

Lokalizací všech zvolených význačných bodů, propočtením 3D souřadnic a následným škálováním byla dokončena práce v programu PhotoModeler Scanner. Souřadnice význačných bodů tak byla připravena na export do Microsoft Office Excel, kde byla upravována jejich forma pro další zpracování.

4.2.3. Význačné body

Definice význačných bodů

V geometrické morfometrii se jako vstupní data používají především význačné body, které musí splňovat určité podmínky. Hlavní podmínka pro význačné body je jejich vzájemná homologie. To znamená, že body mají shodnou anatomickou polohu či funkci. Mezi takovéto body nelze zařadit některé body, které jsou součástí tradičních proměnných, jako je, např. největší šířka lebky (vzdálenost *eu-eu*). Body definující tyto rozměry totiž nejsou nezbytně homologní a na různých lebkách nebo různých objektech se mohou nacházet v značně odlišných anatomických polohách.

Druhé kritérium výběrů landmarků je relativní stálost pozic. Pokud se tvary srovnávaných objektů příliš liší, dochází ke zkreslení výsledků analýz. Dále by se jednotlivé body neměly přes sebe posouvat, tzn., neměly by měnit své relativní pozice. Není možné použít body, které na jednom z objektů chybí nebo jsou neurčitelné. Všechny body, které jsou součástí konfigurace, musí být vyznačené na všech objektech.

Dalším požadavkem je dostatečné pokrytí formy, tedy veškeré tvarové i velikostní variability. Není totiž možné odhalit rozdílnost, která není zachycena v datech, tedy v landmarkích. Proto v místech, kde dochází k tvarové změně a zároveň nelze umístit vhodný význačný bod, je možné zmírnit kritéria výběru bodu.

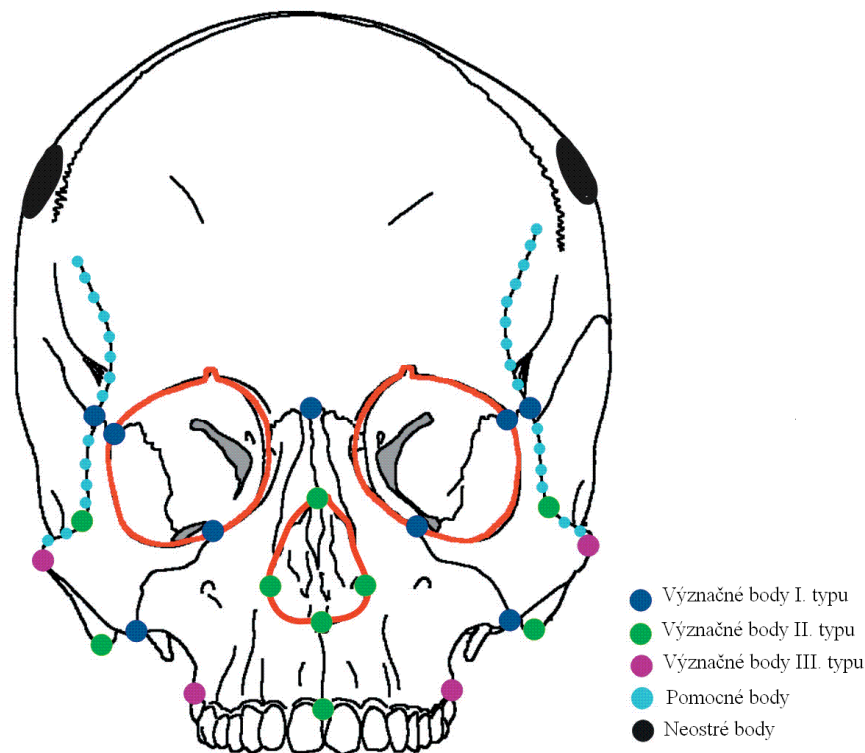
Čtvrtým kritériem výběru bodů je opakovatelnost jejich bezchybné lokalizace. Právě obtížnost opakovatelnosti lokalizace bodu někdy znamená až překvapivou míru chyby. U některých landmarků může být snadná lokalizace pozice bodu v jednom pohledu, ale obtížná při pohledu z jiného úhlu.

Poslední podmínkou je koplanarita bodů. Tato podmínka je důležitá při studiu 3D objektů na 2D promítnutích, např. fotografiích či rtg snímcích. Jedná se o redukci jedné z os, která však musí probíhat u všech objektů stejně. Předmět analýzy tak musí být před redukcí jedné z os shodně orientován (Zelditch et al., 2004).

Booksteinovy typy landmarků

Význačné body se podle definice svého umístění dělí do třech skupin. První typ význačných bodů je definován jako rozhraní struktur. Pozice takovýchto bodů je nejpřesněji lokalizovatelná. Jedná se, např. o místa styků švů na lebce. Jako druhý typ význačných bodů jsou označovány maxima a minima zakřivení, tedy vrcholy vyklenutí

a dna prohnutí a funkčním biomechanickým opodstatněním. Třetím typem landmarků jsou hraniční body objektů, označující např. maximální šířku, délku, hloubku objektu (Bookstein, 1991). Problémem landmarků třetího typu je jejich použitelnost pouze ve smyslu rozměru. Často postrádají funkční opodstatnění a nespĺňují kritérium homologie, v horším případě i kritérium opakovatelnosti lokalizace (Slice, 2005). Příklady všech typů význačných bodů na lebce jsou zobrazeny na obrázku 4.



Obrázek 4: Typy význačných bodů (přepřacováno podle Urbanová, 2009).

Použité význačné body

Jelikož práce navazuje na práci Bigoni et al. (2010), je v ní použita velice podobná sada význačných bodů. Vzhledem k faktu, že některé body nebylo možné vyznačit na dostatečném množství fotografií a nedošlo k propočtení jejich souřadnic v 3D prostotu, nemohla být použita totožná množina bodů. Na každé sadě lebek bylo vyznačeno celkem 59 význačných bodů dále použitých v analýzách. Seznam, zkratky a definice všech použitých význačných bodů jsou v tabulkách č. 2 a 3. Použité definice význačných bodů

vychází z Martin a Saller (1957). V případě nejasnosti ohledně definice (způsobených překladem) bylo nahlíženo k definicím bodů podle Bigoni et al. (2010) a Kuželka (1991). Vizualizace použitých význačných bodů je na obrázku 5.

Tabulka 2: Definice nepárových význačných bodů použitých v diplomové práci

Význačné body	Zkratka	Definice (dle Martin a Saller, 1957)
<i>Bregma</i>	<i>b</i>	Průsečík <i>sutura coronalis</i> a <i>sutura sagittalis</i> v mediánní rovině.
<i>Nasion</i>	<i>n</i>	Střed <i>sutura nasofrontalis</i> v mediánní rovině.
<i>Lambda</i>	<i>l</i>	Průsečík <i>sutura sagittalis</i> a <i>sutura lambdoidea</i> v mediánní rovině.
<i>Rhinion</i>	<i>rhi</i>	Nejnižší položený bod na <i>sutura internasalis</i> .
<i>Nasospinale</i>	<i>ns</i>	Bod ležící na průsečíku mediánní roviny se spojnicí obou nejnižší položených bodů na dolním okraji <i>apertura piriformis</i> .
<i>Prosthion</i>	<i>pr</i>	Bod nejvíce prominující mezi horními řezáky v mediánní rovině.
<i>Opisthion</i>	<i>o</i>	Bod na zadním okraji <i>foramen magnum</i> v mediánní rovině.
<i>Basion</i>	<i>ba</i>	Bod na předním okraji <i>foramen magnum</i> v mediánní rovině. Naproti bodu opisthion.
<i>Staphylion</i>	<i>sta</i>	Bod na průsečíku mediánní roviny s linií spojující nejvíce vpředu ležící body zadního okraje tvrdého patra.
<i>Staurion</i>	<i>sr</i>	Průsečík <i>sutura palatina mediana</i> a <i>sutura palatina transversa</i> .
<i>Foramen incisivum</i>	<i>inc</i>	Bod na posteriorním okraji <i>foramen incisivum</i> .
<i>Opisthocranion</i>	<i>op</i>	Bod nejvíce vzdálený od bodu <i>glabella</i> v mediánní rovině.
<i>Glabella</i>	<i>g</i>	Vyvýšené místo na dolním okraji čelní kosti nad nosním kořenem mezi nadobočními oblouky v mediánní rovině.

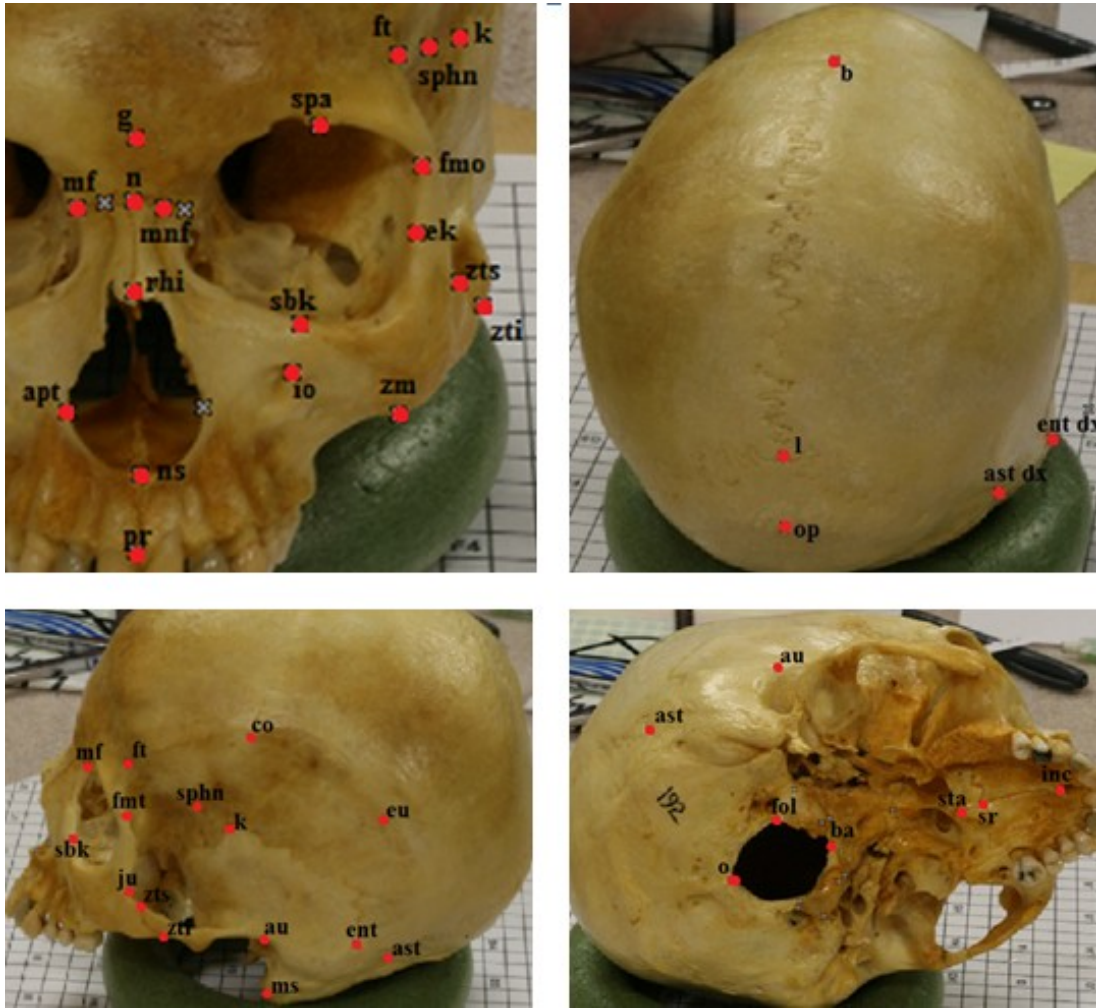
Tabulka 3: Definice párových význačných bodů použitých v diplomové práci

Význačné body	Zkratka	Definice(dle Martin a Saller, 1957)
<i>asterion</i>	<i>ast</i>	Bod v místě dotyku <i>sutura lambdoidea</i> , <i>sutura occipitomastoidea</i> a <i>sutura parietomastoidea</i> .
<i>entomion</i>	<i>ent</i>	Bod přechodu <i>sutura squamosa</i> v <i>sutura parietomastoidea</i> .
<i>crotaphion</i>	<i>k</i>	Průsečík <i>sutura sphenosquamosa</i> , <i>sutura sphenoparietalis</i> a <i>sutura sphenofrontalis</i> .
<i>sphenion</i>	<i>sphn</i>	Průsečík <i>sutura coronalis</i> , <i>sutura sphenoparietalis</i> a <i>sutura sphenofrontalis</i> .

Význačné body	Zkratka	Definice(dle Martin a Saller, 1957)
<i>euryon</i>	<i>eu</i>	Nejvíce laterálně umístěný bod na mozkovně, označující největší šířku lebky.
<i>coronale</i>	<i>co</i>	Bod nejvíce laterálně na <i>sutura coronalis</i> . Největší šířka čela.
<i>frontotemporale</i>	<i>ft</i>	Nejvíce anteriorně ležící bod na <i>linea temporalis</i> na <i>os frontale</i> .
<i>auriculare</i>	<i>au</i>	Průsečík baze <i>arcus zygomaticus</i> a linie procházející středem <i>meatus acusticus externus</i> .
<i>zygotemporale superior</i>	<i>zts</i>	Bod nejvýše na <i>sutura zygomaticotemporalis</i> .
<i>jugale</i>	<i>ju</i>	Místo styku <i>processus frontalis</i> a <i>processus temporalis</i> na <i>os zygomaticus</i>
<i>apterion</i>	<i>apt</i>	Nejvíce laterální bod na <i>apertura piriformis</i>
<i>frontomalare temporale</i>	<i>fnt</i>	Nejvíce posteriorně a laterálně umístěný bod na <i>sutura frontozygomatica</i> .
<i>frontomalare orbitale</i>	<i>fmo</i>	Průsečík <i>sutura frontozygomatica</i> a laterálního okraje očníce.
<i>maxillonasofrontale</i>	<i>mnf</i>	Průsečík <i>sutura frontonasalis</i> , <i>sutura frontomaxillaris</i> a <i>sutura nasomaxillaris</i> .
<i>maxillofrontale</i>	<i>mf</i>	Průsečík <i>sutura frontomaxillaris</i> a vnitřního okraje očníce.
<i>ektokonchion</i>	<i>ek</i>	Průsečík vnějšího okraje očníce a linie vycházející z bodu <i>mf</i> , rovnoběžné s horním okrajem očníce.
<i>suprakonchion</i>	<i>spa</i>	Průsečík horního okraje očníce a kolmice procházející středem linie <i>mf-ek</i> .
<i>subkonchion</i>	<i>sbk</i>	Průsečík dolního okraje očníce a kolmice procházející středem linie <i>mf-ek</i> .
<i>zygotemporale inferior</i>	<i>zti</i>	Nejnižší umístěný bod na <i>sutura zygomaticotemporalis</i>
<i>zygomaxillare</i>	<i>zm</i>	Nejnižší umístěný bod na <i>sutura zygomaticomaxillaris</i> .
<i>infraorbitale</i>	<i>io</i>	Nejvíce laterální bod na okraji <i>foramen infraorbitale</i> .
<i>mastoidale</i>	<i>ms</i>	Nejnižší položený bod na <i>processus mastoideus</i> .
<i>foraminolaterale</i>	<i>fol</i>	Nejvíce laterálně umístěný bod na okraji <i>foramen magnum</i> .

4.2.4. Reliabilita měření

Reliabilita neboli spolehlivost měření udává míru správné opakovatelnosti měření. V případě interobservační spolehlivosti se jedná o míru shody měření téhož znaku prováděného více hodnotiteli. V našem případě se navíc jedná o srovnání dvou technik odečítání rozměrů, a to přímého měření a akvizice rozměrů z 3D landmarků za použití software PhotoModeler Scanner.



Obrázek 5: Použité význačné body.

Posouzení reliability vychází ze vzorce $R = \frac{S^2_{biol}}{S^2_{celk}} = \frac{S^2_{biol}}{S^2_{biol} + S^2_{ch}} = \frac{S^2_{celk} - S^2_{ch}}{S^2_{celk}}$, kde

R je koeficient reliability, S^2_{celk} je celková variace v souboru a S^2_{ch} je chybový rozptyl.

Reliabilita, udávající spolehlivost měření, je definována jako poměr biologické a celkové variace. Přičemž celková variace je dána součtem biologické variace a chybového rozptylu. Z toho vyplývá, že reliabilitu lze vypočítat jako podíl celkové rozdílnosti po odečtení chybového rozptylu ($S^2_{celk} - S^2_{ch}$) a celkové rozdílnosti (S^2_{celk}).

Chybový rozptyl se vypočítá jako součet druhých mocnin rozdílů mezi měřeními vydělený počtem měření (tedy $2 \times$ počet měřených jedinců). Celková variace se počítá jako suma druhých mocnin (kvadrátů) rozdílů mezi měřeními a průměrem měření vydělená počtem jedinců zmenšeným o jedna.

Koeficient reliability (R) vynásobený stem udává procentuální podíl biologické variace na celkové variaci odhalené měřením, přičemž dopočítaný zbytek do 100 % udává rozdílnost znaku způsobenou chybou měření. Zpracováno podle Šmahela (2001).

4.2.5. Analyzované oblasti lebky

Souřadnice všech 59 bodů byly zpracovávány v různém kontextu. Rozdělili jsme význačné body lebky na pět samostatně analyzovaných oblastí v návaznosti na práci Bigoni et al. (2010).

Jednotlivými oblastmi jsou: očníce, oblast nosu, horní obličej, lebeční klenba a patro. Na klenbě je 20 analyzovaných bodů. Jsou jimi nepárové *b, l, o, ba* a párové *ast, ent, k, sphn, co, ft, au, ms*. Tvar horního obličeje určuje 30 bodů, z nichž jen dva jsou nepárové (*n, ns*) a ostatní body jsou párové (*ft, zts, ju, apt, fnt, fmo, mnf, mf, ek, spa, sbk, zti, zm, io*). Očníce je v naší práci dána pěti páry bodů (*mf, spa, fmo, ek* a *sbk*). Oblast nosu tvoří devět landmarků (nepárové *n, rhi, ns* a párové *apt, mf* a *mnf*) a patro pouhé čtyři (*sta, sr, foi, pr*).

Oblasti a body k nim přidělené byly zvoleny v souladu s prací Bigoni et al. (2010). Některé body nebylo možno vyznačit a dále zpracovat. Na klenbě jsou to *landmark x* a *infratemporale*, na horním obličej *zygion*, na patře *postalverion*. Na lebeční bazi nebylo možno vyznačit většinu bodů, které byly použity v Bigoni et al. (2010). Proto byl samostatně analyzován z hlediska velikosti a tvaru pouze týlní otvor, jakožto jediná část lebeční baze s vyznačenými landmarky. Lebka byla dále statisticky zpracována i jako celek, tedy se všemi landmarky.

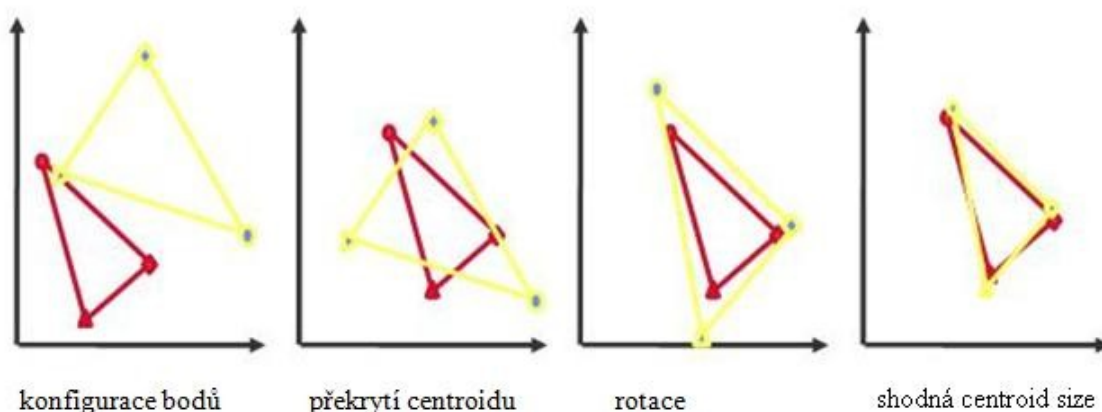
4.2.6. Analýza získaných dat

Konfigurace význačných bodů reprezentující jednotlivé analyzované oblasti lebky byly převedeny z programu PhotoModeler Scanner přes Microsoft Excel do programu PAST (Hammer et al., 2008) a Morphome3cs, kde došlo k dalšímu zpracování dat. U každé z výše zmíněných oblastí byly nejprve provedeny analýzy před standardizací, tedy před odstraněním vlivu velikosti. Následně byla provedena analýza pouze tvarové složky formy. Základním požadavkem pro samostatnou analýzu tvaru je odstranění vlivu velikosti. K tomuto účelu bylo vyvinuto mnoho standardizačních metod. Metody použité v této diplomové práci jsou popsány níže.

4.2.6.1. Prokrustovská analýza

Dnes nejčastěji používaným postupem pro standardizaci objektů v geometrické morfometrii je Prokrustovská analýza (označovaná jako GPA, generalized procrustes analysis), též nazývána metodou nejmenších čtverců. Tato metoda minimalizuje vzdálenosti mezi odpovídajícími si význačnými body za současného plného zachování jimi zachyceného tvaru (Bookstein, 1996; Zelditch et al., 2004). Metoda byla použita pro standardizaci konfigurací bodů i v naší práci.

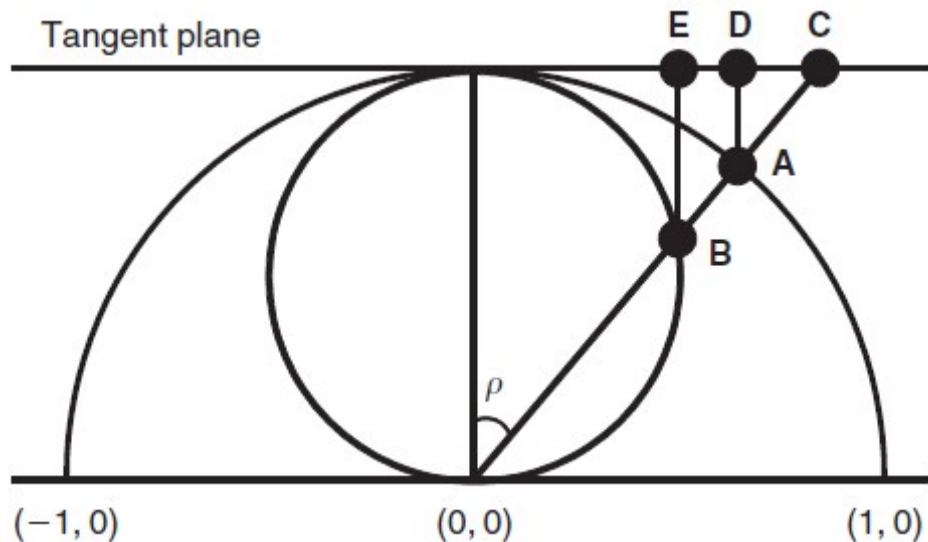
V Prokrustovské analýze je v první řadě nalezen centroid, což je bod, od něhož je součet druhých mocnin vzdáleností ke všem význačným bodům nejmenší. Proto se Prokrustovská analýza nazývá též metodou nejmenších čtverců. Součet druhých mocnin vzdáleností centroidu od význačných bodů se označuje jako velikost centroidu (*centroid size*). Po nalezení centroidu jsou všechny objekty v místě centroidu překryty. Tímto je odstraněn efekt pozice objektu v prostoru. Následně se všechny objekty převedou na jednotnou velikost centroidu. Tím se odstraní vliv různé velikosti objektů a nakonec jsou objekty pootočený do polohy, ve které je součet druhých mocnin vzdáleností mezi homologními body všech objektů nejmenší. Takto je odstraněn vliv rotace objektu v rovině (viz obrázek 6). Tuto metodu lze využívat jak ve dvojdimenzionálním prostoru, tak i v troj- a více dimenzionálním. V případě potřeby zachování velikosti objektů je vynecháno převedení na jednotnou velikost centroidu (Rohlf, 1990; Bookstein, 1991; Bookstein, 1996).



Obrázek 6: Postup GPA pro zjednodušení aplikovaný na trojúhelník (převzato podle Gower, 1975).

V případě, že se porovnávají jen dva objekty, srovnávají se mezi sebou. Ale pokud je předmětem studie více objektů, vypočítává se průměrná konfigurace bodů, tzv. referenční tvar. S tímto referenčním tvarem jsou ostatní konfigurace bodů porovnávány. Nezáleží proto tolik na tvaru prvního objektu, ale na vypočítaném průměrném tvaru objektů v souboru.

Suma čtverců vzdáleností mezi homologními body zkoumaného objektu a průměrné konfigurace se nazývá Prokrustovská vzdálenost. Tato vzdálenost je prezentována jako rozdíl tvaru v Kendallově prostoru tvarových proměnných, což je prostor plochy sféroidu, nepravidelného rotačního tělesa podobného elipsoidu. Pro každý trojúhelník je takovým prostorem plocha koule a Prokrustovská vzdálenost je vyjádřena nejkratším možným obloukem vedeným po kouli. Většina statistických nástrojů ale vyžaduje lineární vzdálenost v klasickém, euklidovském prostoru, laicky řešeno v běžném prostoru, ve kterém umíme vytvářet geometrické představy. Prokrustovská vzdálenost je tedy převáděna do euklidovského prostoru, kterým je rovina tečny se sféroidem (viz obrázek 7). Bod styku roviny a Kendallova prostoru je místo, které zaujímá v obou prostorech průměrná konfigurace bodů objektů (Rohlf, 1990; Zelditch et al., 2004). Při převodu dochází ke zkreslení rozdílů. S větší tvarovou variabilitou v souboru vzniká větší zkreslení. Proto jedním z kritérií výběru landmarků je relativní stálost pozic význačných bodů. V antropologii jsou většinou srovnávány podobné objekty a tvarový rozsah v poměru k zakřivení prostoru je malý. Zkreslení je poté z matematického hlediska zanedbatelné (např. Zelditch et al., 2004; Slice, 2005).



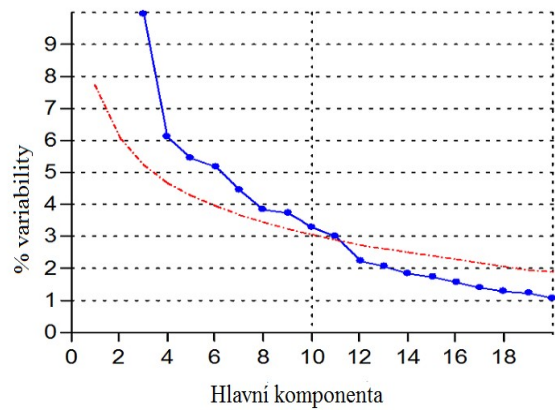
Obrázek 7: Nákres představuje převedení tvaru z prostoru tvarových proměnných do roviny tečny (Zelditch et al., 2004).

Může se stát, že se jeden nebo více význačných bodů v některé z konfigurací svou polohou značně liší od poloh v jiných konfiguracích. Jelikož Prokrustovská superpozice používá k výpočtu referenčního tvaru aritmetického průměru pozic každého bodu, rozprostře tento velký poziční rozdíl mezi všechny body objektu a vyprodukuje tak velké množství malých rozdílů. Tomu dokáže zabránit alternativa Prokrustovské analýzy, která se nazývá Resistant-Fit analysis. Tato metoda místo průměrných pozic bodů pracuje s jejich mediánem, tedy s pozicí, která rozdělí sledovaný soubor na dvě stejně velké skupiny. Medián je tedy v takovém případě tvar ležící přesně uprostřed všech konfigurací. Toto vnášení chyby Prokrustovskou analýzou, které je důsledkem anomálie či chyby měření, se nazývá Pinocchio efekt (Slice, 2005; Urbanová, 2009).

4.2.6.2. Analýza hlavních komponent

Před i po standardizaci konfigurací bodů byla provedena Analýza hlavních komponent (PCA), jejímž principem je převedení variability mezi objekty do transformovaných proměnných, které jsou lineárními kombinacemi původních proměnných a jsou označovány jako skóre hlavních komponent (PC skóre). Se složitostí analyzovaného tvaru roste počet hlavních komponent vyjadřujících variabilitu mezi skupinami, přičemž jednotlivé komponenty jsou na sobě nezávislé a každá z nich vyjadřuje jinou změnu. V našem případě komponenty popisují určitou variabilitu v konfiguraci bodů mezi pohlavími. Se stoupajícím číselným označením komponenty klesá její podíl na celkové variabilitě (obrázek 8). K popsání většiny variability postačuje pouze několik prvních hlavních komponent. Jejich počet závisí na složitosti formy analyzovaných objektů (např. Zelditch et al., 2004; Slice, 2005). Scree plot umožňuje posoudit významnost komponent pomocí funkce zvané broken stick. Osa x zobrazuje pořadí komponent a osa y jejich podíl na celkové variabilitě v procentech. Pomocí funkce broken stick získáme linie, pod jejíž úrovní leží komponenty s malým podílem na výsledném tvaru (obrázek 8, vpravo). Tyto komponenty lze považovat za nesignifikantní (Hammer et al., 2012).

PC	hodnota komponenty	% rozdílnosti
1	37,36	16,03
2	30,59	13,13
3	23,09	9,91
4	14,19	6,09
5	12,73	5,46
6	11,99	5,15
7	10,04	4,46
8	8,91	3,83
9	8,73	3,75
10	7,62	3,27
11	6,93	2,98
12	5,21	2,24
13	4,83	2,08
14	4,26	1,82
15	3,99	1,71
16	3,68	1,58
17	3,22	1,38
18	2,99	1,29
19	2,78	1,20
20	2,48	1,07



Obrázek 8: Zobrazuje tabulku (vlevo) s pořadím a hodnotami komponent při analýze tvaru horního obličejce. Scree plot (vpravo) znázorňuje totéž graficky. Modrá linie spojuje jednotlivé komponenty a červená linie (broken stick) vyznačuje hladinu významnosti komponent.

Před standardizací byla komponentou vykazující nejvyšší rozdílnost velikost. Za ní následovaly komponenty popisující tvar. Po standardizaci, při které byl vyloučen vliv velikosti na výsledný tvar, je analýza hlavních komponent výrazně citlivější a dokáže mezi porovnávanými vzorky rozeznat mnohem jemnější variabilitu tvaru (např. Zelditch et al., 2004; Slice, 2005).

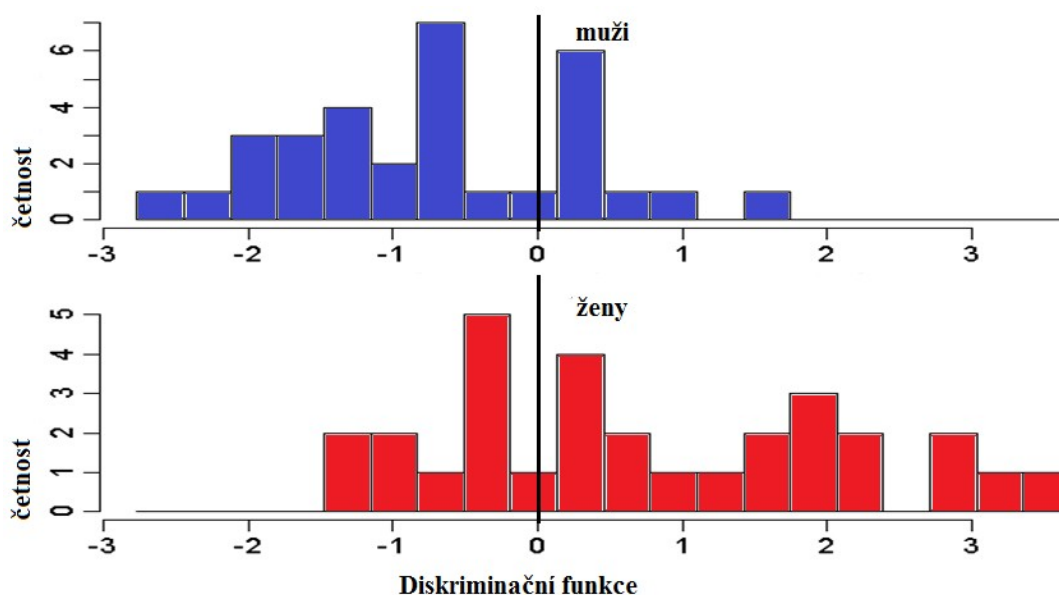
Jednoduchou vizualizací rozdílnosti popisované komponentami je korelační diagram (bodový graf), který k vizualizaci využívá kartézských souřadnic. Každý bod v grafu reprezentuje jednoho jedince, který je podle hodnot vizualizovaných komponent umístěn v prostoru. V každém grafu je tedy vidět rozdělení jedinců podle dvou zvolených komponent, přičemž jejich průměrná hodnota je umístěna v počátku souřadnic, tedy bodě 0, 0 (např. Zelditch et al., 2004). Bodové grafy rozdělení pomocí jedinců podle první a druhé komponenty jsou obsaženy v příloze.

4.2.6.3. Diskriminační analýza

K odhadu pohlaví bývá nejčastěji využívána diskriminační analýza. Máme-li předem stanovené skupiny, pak diskriminační analýza dokáže určit rozdíl mezi těmito skupinami a vytváří pravidla pro rozdělení všech objektů do existujících skupin. Zařazení do skupin probíhá na základě podobností a odlišností mezi objekty (např. Horáková, 2008; Hammer et al., 2012). Grafický výstup diskriminační analýzy je vyobrazen na obrázku 9.

Základem je vždy rozdělení objektů do dvou skupin podle projevu jednoho znaku. Pokročilejší metody umožňují rozdělení objektů do skupin podle vícerozměrných znaků, jakým je bezpochyby tvar. Vícerozměrné statistické metody dovedou hodnotit rozdíl mezi dvěma (i více) skupinami ve všech měřených veličinách současně. Toto hodnocení spočívá v hledání transformace mnohorozměrné rozdílnosti na jednorozměrnou, tak aby umožňovala třídění objektů do existujících skupin. Předpokladem je, že hodnoty proměnných jsou v euklidovském prostoru (Zelditch et al., 2004).

Větší objektivitu výsledků lze dosáhnout použitím diskriminační analýzy s crossvalidací (křížovým odhadem). V jejím případě totiž nejprve dochází k rozdělení množiny objektů do dvou souborů. První z nich slouží k vypočítání diskriminační funkce, podle níž jsou objekty druhého souboru rozřazovány do skupin.



Obrázek 9: Grafický výstup diskriminační analýzy. Rozdělení jedinců podle hodnoty diskriminační funkce při diskriminační analýze s crossvalidací provedené na skóre hlavních komponent zachycujících tvar.

U souborů s malým počtem jedinců se používá metoda leave-one out. Při ní tvoří rozřazovaný soubor pouze jeden objekt a analýza běží opakovaně, dokud všechny objekty nejsou použity v rozřazovaném souboru (např. Zelditch et al., 2004).

Na našem souboru dat byla provedena diskriminační analýza na souřadnicových datech a dále diskriminační analýza podle skóre hlavních komponent. Výsledky diskriminační analýzy na souřadnicových datech byly porovnány s výsledky studie Bigoni et al. (2010).

Diskriminační analýzu s crossvalidací nelze provádět na velkých množinách bodů, protože u nich existuje mnoho rovin diskriminace. Diskriminační analýza je pak numericky nestabilní. Proto diskriminační analýzy s crossvalidací i bez ní byly provedeny na výstupech analýz hlavních komponent, tedy na PC skóre. Další výhodou hlavních komponent je, že se jedná o nezávislé proměnné (což je důležitý předpoklad statistických testů). Postupně byly hodnoceny PC skóre popisující změny velikosti i tvaru objektů a PC skóre popisující pouze změny tvaru objektů. Pro výběr vhodných hlavních komponent pro diskriminační analýzy posloužil scree plot, zobrazující příspěvek jednotlivých komponent k celkové variabilitě souboru. Do diskriminační analýzy pak byly vkládány jen skóre komponent, nacházejících se nad broken stick.

4.2.6.4. Hotelling T² test

Hotelling T² test je nejjednodušší formou vícerozměrných analýz rozdílnosti. Je při něm hodnocena vícerozměrná závislá proměnná a pouze jedna kategorická proměnná s dvěma kategoriemi. Hotelling T² test podává informaci o tom, zda existuje statisticky významný rozdíl mezi skupinami v hodnocené závislé proměnné. P-hodnota menší než 0,05 znamená, že mezi skupinami skutečně existuje statisticky významný rozdíl. Obdobné výsledky by měla poskytovat i MANOVA, pracující na stejném principu (např. Zelditch et al., 2004).

4.2.6.5. Thin-plate spline

Thin-plate spline (analýza tenkých ohebných plátků) je metoda vizualizace tvarových změn mezi objekty nebo mezi průměrnými tvary skupin objektů. Základem je představa nekonečně tenkého ohebného plátku s vyznačenou mřížkou navzájem kolmých

rovnoměrně rozmístěných os. Nejprve je do této mřížky zakreslen referenční tvar a následně je plátek ohýbán podle druhého analyzovaného tvaru, takovým způsobem, aby se oba tvary překrývaly. Rozdíl tvaru mezi jednotlivými objekty je pak vyjádřen deformací původně pravoúhlé sítě. Míra prohnutí, tedy deformace pravoúhlé sítě, je vyčíslena jako deformační energie.

Rozdílnost mezi objekty lze dále rozdělit na afinní a neafinní složku. Afinní je odlišnost mezi objekty zahrnující rotace a změny velikosti objektu. Přičemž je zachována rovnoběžnost os a deformační energie je nulová. Objekty se tedy tvarově neliší.

Naopak neafinní složka rozdílnosti působí na každý bod konfigurace jiným způsobem a posouvá jej jiným směrem vzhledem k ostatním bodům. Jedná se tedy o tvarovou rozdílnost, která deformuje síť kolmic a rovnoběžek. Neafinní složka je vyjádřena deformační energií a s její pomocí je popsána tvarová rozdílnost (Bookstein, 1996; Zelditch et al., 2004; Slice, 2005).

5. Výsledky

5.1. Reliabilita měření

V metodách je popsán výpočet reliability měření, který byl použit k porovnání lineárních měření lebek a vzdáleností změřených programem PhotoModeler Scanner. V programu PhotoModeler Scanner bylo provedeno měření rozměrů *b-ba*, *n-ba*, *n-pr*, *eu-eu*, *ast-ast* a *ft-ft*. Výsledné vzdálenosti byly porovnány s rozměry získanými tradičním měřením lineárních vzdáleností kaliperem.

Chybový rozptyl u rozměru *g-op* je nulový, protože se jednalo o referenční rozměr, který posloužil jako měřítko a podle něhož byly konfigurace bodů ve PhotoModeler Scanner škálovány. U všech porovnávaných rozměrů je zřejmá vysoká spolehlivost měření, protože téměř 88 % zjištěné variability je rozdílnost biologická a chybová variace tvoří přibližně 12 %. Výsledky výpočtu reliability měření pro jednotlivé rozměry jsou v tabulce 4.

Tabulka 4: Výpočet reliability

Rozměr	s^2_{ch}	s^2_{celk}	R
g - op	0,00	73,90	1,000
eu - eu	0,87	34,25	0,975
ast - ast	3,03	24,68	0,877
ft - ft	1,00	24,15	0,959
ba - b	0,99	52,04	0,981
ba - n	2,35	34,77	0,932
n - pr	1,89	27,11	0,930

5.2. Odhad pohlaví

V první části výsledků diplomové práce jsme se snažili odpovědět na otázku, s jakou přesností lze diskriminovat soubor jedinců podle pohlaví na základě tvaru a velikosti lebky. Bylo použito několik diskriminačních analýz pro všechny zkoumané oblasti lebky. Diskriminační analýzy se lišily typem vstupních dat. Prvním typem vstupních dat byly souřadnice zachycující velikost a tvar nebo samotnou velikost lebky a jejích částí. Druhým typem vstupních dat byly PC skóre zachycující změnu tvaru a

velikosti nebo pouhého tvaru jednotlivých lebek. Pro diskriminaci jsme použili množinu bodů charakterizující lebku jako celek a množiny charakterizující jednotlivé části. Těmi jsou horní obličej, lebeční klenba, oblast nosu, očníce, oblast patra a týlní otvor (viz 4.2.5. Analyzované oblasti lebky).

5.2.1. Výsledky PCA

K získání skóre hlavních komponent byla provedena PCA analýza lebek a jednotlivých zkoumaných oblastí. Její výsledky pro jednotlivé části lebek dokumentuje vždy příslušný scree plot, který poskytuje informaci o počtu numericky stabilních komponent a procentu jimi popsané variability. Pomocí scree plot byl vybrán počet komponent, jejichž skóre bylo využito v diskriminační analýze (viz příloha). U celé lebky bylo pro diskriminační analýzu podle tvaru a velikosti využito skóre šesti hlavních komponent, u analýzy podle tvaru devíti komponent. V obou případech komponenty popisovaly necelých 60 % celkové variability. Lebka byla popsána velkým množstvím bodů, a tak i velkým množstvím komponent. I když další komponenty popisovaly dohromady přes 40 % celkové variability, příspěvek jednotlivých komponent byl nevýznamný. Naopak při analýze velikosti a tvaru týlního otvoru, daného pouhými čtyřmi body, popisovalo prvních pět komponent více než 96 % celkové variability. U ostatních částí lebky se příspěvek vybraných hlavních komponent k celkové variabilitě pohyboval mezi 60 a 90 %, přičemž více komponent bylo většinou používáno při analýze samotného tvaru, neboť u analýz tvaru mají jednotlivé komponenty nižší příspěvky k celkové variabilitě než u analýz tvaru a velikosti (viz tabulka 5).

Tabulka 5: Počet vybraných hlavních komponent a jejich příspěvek k celkové variabilitě

Oblast lebky	Analýza velikosti a tvaru		Analýza tvaru	
	Počet komponent	% variability	Počet komponent	% variability
Lebka	6	58,72	9	59,94
Horní obličej	4	61,57	11	74,07
Lebeční klenba	8	68,81	13	79,1
Oblast nosu	2	62,88	5	78,9
Očníce	4	75,18	5	72,98
Oblast patra	3	89,42	3	87,84
Týlní otvor	5	96,62	4	94,22

5.2.2. Diskriminační analýza podle tvaru a velikosti lebky

K odhadu pohlaví pomocí lebky a jejích částí byla využita diskriminační analýza s i bez crossvalidace. Celá lebka i všechny oblasti na lebce byly nejprve hodnoceny z hlediska velikosti a tvaru. Jako první byla provedena diskriminační analýza podle souřadnic jednotlivých bodů náležících k hodnocené oblasti, v druhé diskriminační analýze byly hodnoceny skóre hlavních komponent získaných při PCA. Počet v diskriminačních analýzách využitých komponent byl vybrán na základě scree plot se zobrazenou broken stick.

Přímá diskriminační analýza (bez crossvalidace) na souřadnicových datech poskytla velice dobré výsledky. Přesnost odhadu pohlaví se u ní pro celou lebku, horní obličej, lebeční klenbu a oční pohyboval nad 98 %. Z konfigurace význačných bodů oblasti nosu byl možný správný odhad pohlaví z 87 %. Horších výsledků bylo dosaženo u dvou oblastí lebky daných malým počtem bodů, pro oblast patra byla úspěšnost odhadu pohlaví necelých 71 % a pro a týlní otvor 65 %. Na souřadnicových datech však nebyla použita diskriminační analýza s crossvalidací a to z důvodů uvedených v podkapitole Diskriminační analýza.

Diskriminační analýzou s crossvalidací i bez ní byly hodnoceny skóre hlavních komponent. Zde bylo dosaženo nejlepších výsledků odhadu pohlaví u množiny bodů popisující celou lebku a horní obličej. Přesnost odhadu u těchto oblastí byla 85 a 83 % při diskriminační analýze s crossvalidací a při přímé diskriminační analýze 88 a 86 %. Při diskriminačních analýzách s crossvalidací bylo dosaženo přesnosti odhadu pohlaví přes 80 % u lebeční klenby, 77 % u oblasti nosu a 69 % v případě očnice. Nejnížší přesnost odhadu pohlaví nám opět poskytly analýzy oblastí daných nejmenším počtem bodů a těmi jsou týlní otvor a oblast patra. Při použití PC skóre umožnila diskriminační analýza s crossvalidací přesný odhad pohlaví s nižší přesností než diskriminační analýza bez crossvalidace, rozdíl mezi výsledky byl malý a pohyboval se mezi 2 - 7 %. Výsledky všech diskriminačních analýz podle velikosti a tvaru lebek a zkoumaných oblastí jsou shrnuty v tabulce 6.

Hlavní výhodou výsledků diskriminační analýzy s crossvalidací je její robustnost. Metoda tím, že jednu lebku nepoužije pro výpočet diskriminační funkce, ale k jejímu testování, poskytuje výsledky, které se blíží výsledkům při testování na mnohem větším populačním vzorku.

Tabulka 6: Přesnost odhadu pohlaví podle velikosti a tvaru lebky a jejích částí

Oblast lebky	Diskriminační analýza: velikost + tvar		
	ze souřadnic bodů	podle PC skóre	podle PC skóre
	bez crossvalidace	bez crossvalidace	s crossvalidací
Lebka	0,9833	0,8667	0,8500
Horní obličej	1,0000	0,8871	0,8387
Lebeční klenba	1,0000	0,8548	0,8065
Oblast nosu	0,8710	0,7903	0,7742
Očnice	0,9839	0,7581	0,6935
Oblast patra	0,6500	0,6333	0,5667
Týlní otvor	0,7097	0,6774	0,6613

Důležité je testování přítomnosti statisticky významné rozdílnosti mezi hodnocenými skupinami, v našem případě tvořenými mužskými a ženskými lebkami. Prokázání statisticky významné rozdílnosti mezi skupinami umožňuje Hotelling T² test. Z jeho výsledků vyplývá, že při hodnocení velikosti a tvaru lebek a jejich částí existují statisticky významné rozdíly mezi pohlavími ve všech hodnocených oblastech s výjimkou oblasti patra. Pro celou lebku, horní obličej, lebeční klenbu, oblast nosu, očnici, i týlní otvor byla prokázána rozdílnost na 5% hladině významnosti (viz tabulka 7).

Tabulka 7: Výsledky Hotelling T2 testu

Oblast lebky	velikost + tvar		tvar	
	bez permutace	s permutací	bez permutace	s permutací
	p	p	p	p
Lebka	1,03.10 ⁻⁸	0	4,013.10 ⁻⁴	0
Horní obličej	2,261.10 ⁻⁹	0	1,482.10 ⁻⁴	0
Lebeční klenba	2,05.10 ⁻⁷	0	0,0103	0,0095
Oblast nosu	4,457.10 ⁻⁷	0	0,157	0,1485
Očnice	1,302.10 ⁻⁴	0	0,1046	0,0985
Oblast patra	0,0733	0,0745	0,3805	0,3895
Týlní otvor	3,763.10 ⁻⁴	0	0,5574	0,5615

5.2.3. Diskriminační analýza podle tvaru lebky

Pro druhou část diskriminačních analýz byly objekty Prokrustovskou analýzou zbaveny vlivu velikosti na výslednou formu a testovány stejně jako v první části. Výsledná úspěšnost správného odhadu pohlaví se podle očekávání snížila.

Při přímé diskriminační analýze podle význačných bodů bylo opět dosaženo výborné přesnosti odhadu pohlaví. Pro celou lebku to bylo 90 %, pro horní obličej a lebeční klenbu dokonce 100 %. Také analýza tvaru očnice umožnila přesnost odhadu pohlaví z 91 % a jen o málo menší přesnost byla zaznamenána u oblasti nosu (85 %).

Nejnižší míra pohlavního dimorfismu tvaru umožňující diskriminaci podle pohlaví byla nalezena u týlního otvoru a oblasti patra. Oblast patra a týlní otvor po ztrátě vlivu velikosti přišly o velkou část variability mezi pohlavími a při diskriminační analýze podle PC skóre se odhad pohlaví jejich prostřednictvím blížil 50 %.

U diskriminačních analýz podle PC skóre byly zaznamenány celkově nižší pravděpodobnosti správného odhadu pohlaví opět u analýz s crossvalidací. Při hodnocení horního obličeje a celé lebky poklesla pravděpodobnost správného odhadu pohlaví diskriminační analýzou s crossvalidací jen na hodnotu okolo 68 %. Ještě nižší přesnost odhadu pohlaví přinesla analýza ostatních částí lebky a pohybovala se v rozmezí 48 až 62 %. U přímých diskriminačních analýz podle PC skóre je výsledná přesnost odhadu pohlaví více než 79 % pro celou lebku, horní obličej i lebeční klenbu a přes 60 % u očnice a oblasti nosu. Výsledky diskriminačních analýz tvaru jsou shrnuty v tabulce 8.

Při testování statistické významnosti tvarové rozdílnosti mezi pohlavími bylo zjištěno, že se lebky mezi muži a ženami statisticky významně neliší v oblasti týlního otvoru, patra, očnice a nosu. Jinými slovy, tyto výsledky poukazují na značnou tvarovou podobnost mezi muži a ženami ve zmíněných oblastech. Na 5 % hladině významnosti byla prokázána rozdílnost pouze pro celou lebku, lebeční klenbu a horní obličej (viz tabulka 7).

Tabulka 8: Přesnost odhadu pohlaví podle tvaru lebky a jejích částí

Oblast lebky	Diskriminační analýza: tvar		
	ze souřadnic bodů bez crossvalidace	podle PC skóre bez crossvalidace	podle PC skóre s crossvalidací
Lebka	0,9000	0,8167	0,6833
Horní obličej	1,0000	0,8065	0,6774
Lebeční klenba	1,0000	0,7903	0,6290
Oblast nosu	0,8548	0,6290	0,5645
Očnice	0,9194	0,6774	0,5806
Oblast patra	0,6667	0,5500	0,4833
Týlní otvor	0,7097	0,5645	0,5161

5.3. Analýza pohlavního dimorfismu

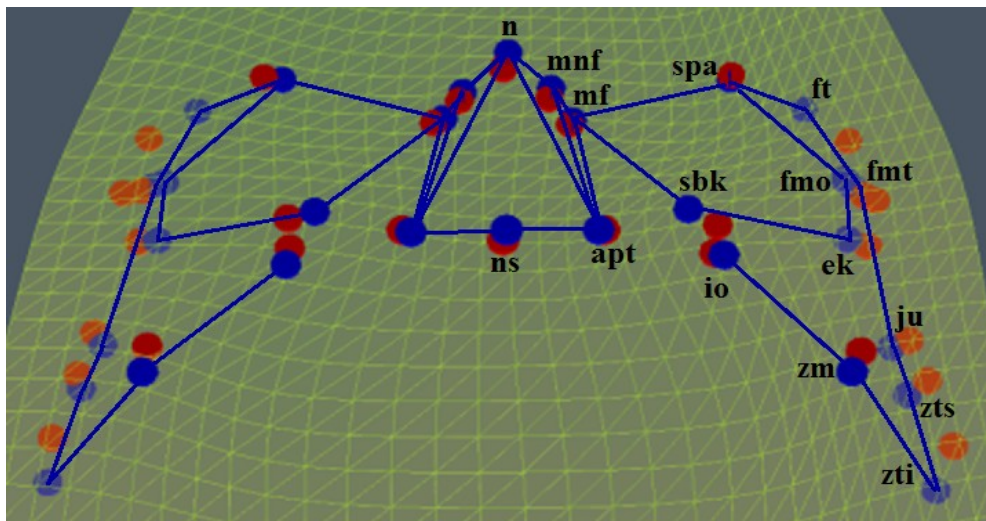
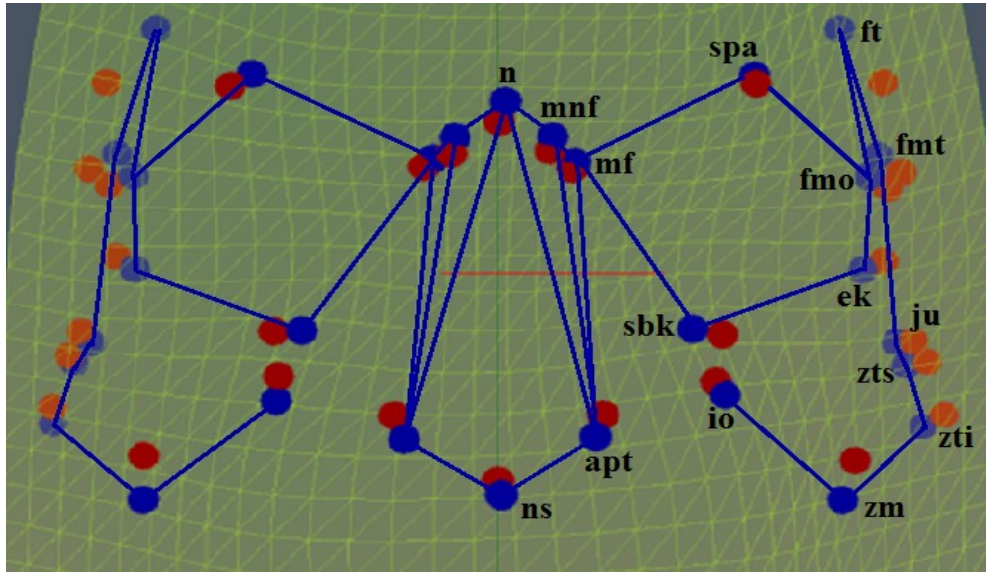
V této diplomové práci je vizuálně zkoumán jen pohlavní dimorfismus tvaru bez vlivu velikosti, protože náplní práce je hledání populačně nespécifického pohlavního dimorfismu. Jak bylo zmíněno v teoretickém úvodu práce, velikost je populačně specifická, a proto nebyla v diplomové práci podrobněji analyzována.

Hodnocení tvarové variability lebky jako celku nebylo v rámci této diplomové práce provedeno. Lebka jako celek je analyzována po částech, z nichž lebeční klenba a horní obličej spolu tvoří skoro celou konfiguraci význačných bodů použitých v diplomové práci a rozdíly pozorované na lebce jsou stejné jako v příslušných dílčích oblastech. Dalším důvodem je fakt, že celá lebka je dána velkým počtem význačných bodů, jejichž pozice se při TPS analýze překrývají, což téměř znemožňuje rozpoznat tvarové rozdíly mezi tvarem reprezentujícím muže a konfigurací bodů žen.

Z hlediska tvarové variability bylo studováno těchto šest částí lebky: horní obličej, lebeční klenba, oblast nosu, očnice, oblast patra a týlní otvor. K vizualizaci tvarových změn byla použita TPS analýza v programu Morphome3cs.

5.3.1. Horní obličej

Horní obličej je oblastí, která je ze všech analyzovaných částí lebky dána nejvíce význačnými body a zahrnuje do sebe i oblast nosu a očnice. Proto lze předpokládat výrazný projev pohlavního dimorfismu právě na této části lebky. Tuto domněnku potvrzují i výsledky diskriminačních analýz, při nichž analýza horního obličeje umožňovala nejvyšší přesnost odhadu pohlaví ze všech analyzovaných částí lebky. Při TPS analýze, jejímž výstupem je obrázek 10, byl referenčním tvarem ženský obličej a cílovým mužský. Z výsledků je patrné, že horní obličej je relativně vyšší u mužů. Šířka horního obličeje je v čelní oblasti okolo bodů *ft* relativně větší u žen a naopak u mužů je horní obličej širší pod očnicemi a v oblasti lícnicích kostí. Lícnicí kosti jsou mohutnější u mužů. To je patrné také z vzájemného odstupu jednotlivých význačných bodů umístěných na lícnicí kosti, který je větší u mužů (*zm*, *zti*, *zts*, *ju*). Tyto body také zasahují mnohem dále posteriorně.

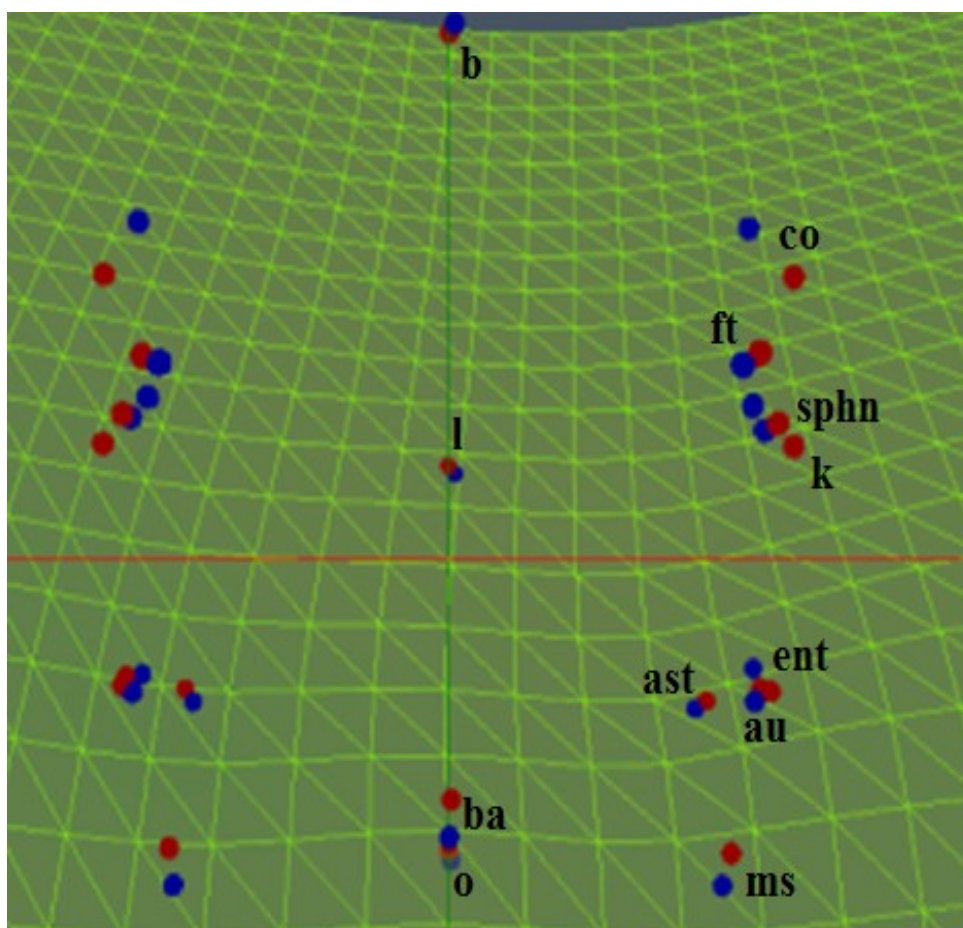


Obrázek 10: TPS analýza horního obličeje. Nahoře frontální pohled na horní obličej a dole antero-inferiorní pohled na horní obličej. Ženský tvar (červeně) je referenční a mužský cílový (vyobrazený modře).

Dále je u mužských lebek patrná větší vzdálenost mezi bodem *ft* a body *fmt* a *fmo*. Vstup do nosní dutiny je relativně vyšší u mužů (*n*-*ns*), ale širší u žen (*apt*-*apt*). Mírně širší jsou u žen i nosní kosti v místě odstupu od kosti čelní (*mnf*, *mf*). Oblast okolo bodu *ns* vystupuje anteriorně a naopak hlouběji v obličejí jsou umístěné dolní (*sbk*) a mediální (*mnf*, *mf*) okraje očníce u mužů. Výška očníce, daná body *sbk* a *spa*, je v kontextu horního obličeje vyšší u žen.

5.3.2. Lebeční klenba

Lebeční klenba byla z hlediska tvaru analyzována pomocí 20 význačných bodů. Na vizualizaci analýzy TPS (viz obrázek 11) je zřetelně patrné, že klenba žen je relativně širší než klenba mužů. Vyšší šířka klenby u žen je dána laterálním posunem bodů *ast*, *ent*, *k*, *sphn*, *co* a *ft*. Dále je pozorovatelné, že bod *ba* je u žen umístěn více superiorně a bod *b* mírně inferiorně, z čehož vyplývá, že klenba u mužů je v porovnání s klenbou žen vyšší. Významným rozdílem je pozice bodu *ms*, který se u mužů nachází výrazně inferiorněji. Z toho lze usoudit, že *processus mastoideus* je výrazně větší u mužů. Délka lebeční klenby, daná vzdáleností mezi nejvíce anteriorně umístěným bodem (v této práci *ft*) a nejvíce posteriorně umístěným bodem (*l*), je vyšší u mužů.

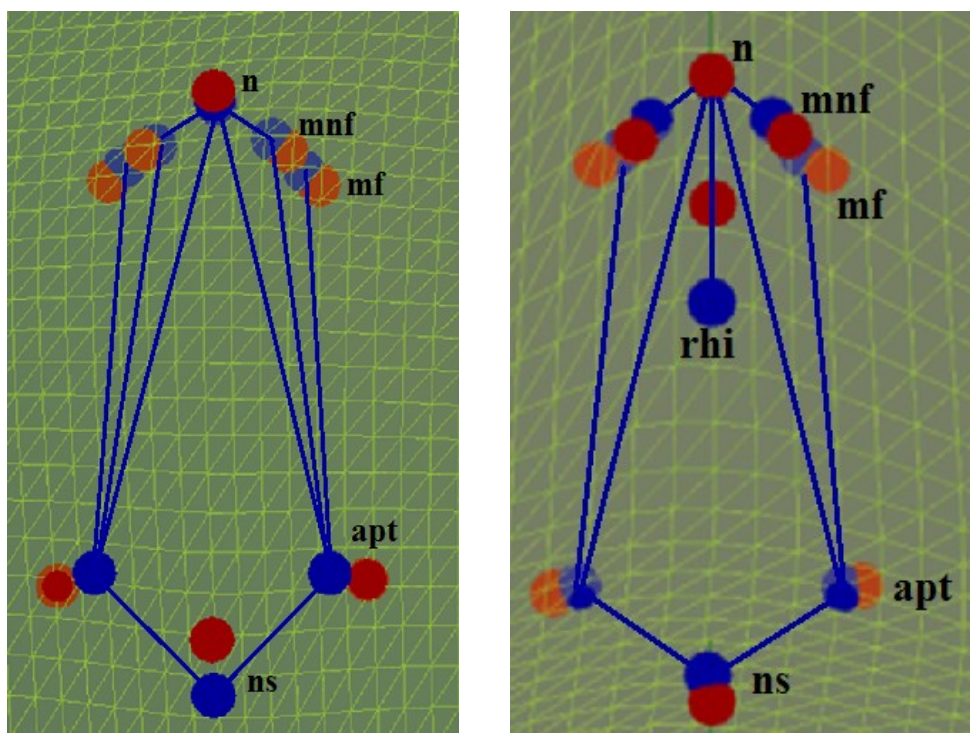


Obrázek 11: Význačné body na lebeční klenbě. Červené body tvoří konfiguraci žen, modré body reprezentují tvar u mužů.

5.3.3. Oblast nosu

Oblast nosu byla dána 9 body. TPS analýzou bylo zjištěno, že vstup do nosní dutiny je relativně širší u žen. U mužů je tedy vstup do nosní dutiny relativně užší a projevuje se jako vyšší. Při analýze samotné oblasti nosu (s bodem *rhi*) však nebyla vyšší výška nosní apertury u mužů prokázána. Z výsledků je také zřejmá velmi výrazná anterioro-inferiorní prominence nosních kostí u mužů (bod *rhi*). Body *mnf* a *mf* jsou umístěny u mužů více posteriorně. U žen byla pozorována vyšší šířka nosních kostí (obrázek 12, vpravo).

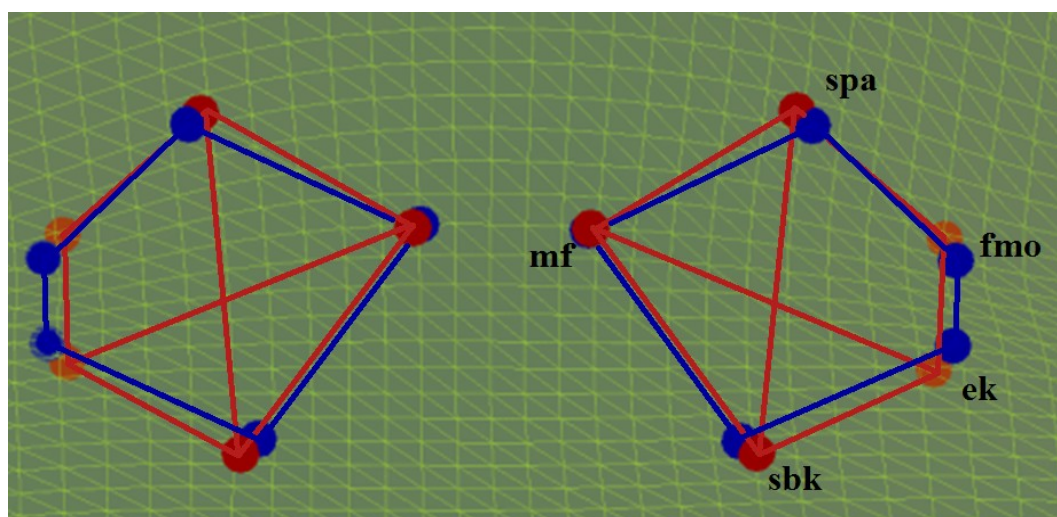
Následně byla provedena analýza oblasti nosu bez bodu *rhi*, při níž jsme dospěli k podobným výsledkům (obrázek 12 vlevo). Nosní kosti jsou stále relativně širší u žen, stejně jako vstup do nosní dutiny. Změnil se však výškový rozměr nosní apertury (*n-ns*), která je, při analýze bez bodu *rhi*, relativně vyšší u mužů.



Obrázek 12: Tvar oblasti nosu. Vlevo množina bodů bez bodu *rhi* a vpravo s bodem *rhi*. Červeně je referenční ženský tvar, modrý je mužský cílový tvar.

5.3.4. Očnice

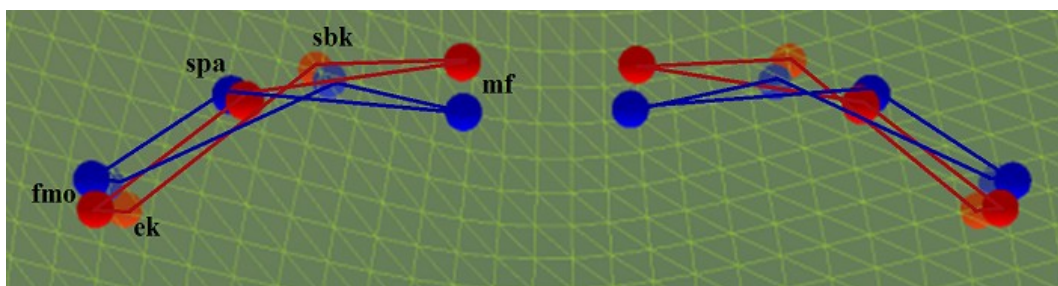
K popsání tvaru očnice bylo vybráno pět párových bodů vyznačených po jejím obvodu. Na obrázku 13 je výstup TPS analýzy, kde referenčním tvarem je ženská očnice a cílovým tvarem očnice mužská. Celkový tvar očnice je více kruhový u žen a oválnější u mužů. To se projevuje jako relativně nižší a transversálně delší očnice u mužů. Při porovnání posunu jednotlivých bodů bylo zjištěno, že je očnice u žen skutečně relativně vyšší (vzdálenost mezi body *sbk* a *spa*). V mediolaterálním směru jsou si očnice velikostně podobné, jen o málo je vyšší relativní délka očnice u mužů. vzdálenost mezi body *fmo* a *ek* je menší u mužů. U Prokrustovsky zarovnaných objektů to lze dávat do souvislosti s více inferiorně položeným bodem *fmo*. Nicméně to může být dáno také výše položeným bodem *ek* a horizontálně směřující horní hranou očnice u mužů: Horní okraj očnice by pak sbíhal laterálním směrem dolů u žen.



Obrázek 13: Tvar očnice mužů a žen. Pro TPS je referenčním tvarem ženská očnice (červeně) a cílovým tvarem očnice mužů (modře).

Při pohledu shora (viz obrázek 14) je u mužů patrná relativní změna pozice horního okraje očnice (*spa*). Horní okraj očnice je posunut anteriorním směrem před dolní okraj očnice (*sbk*) a hlouběji v obličeji zanořený bod *mf*.

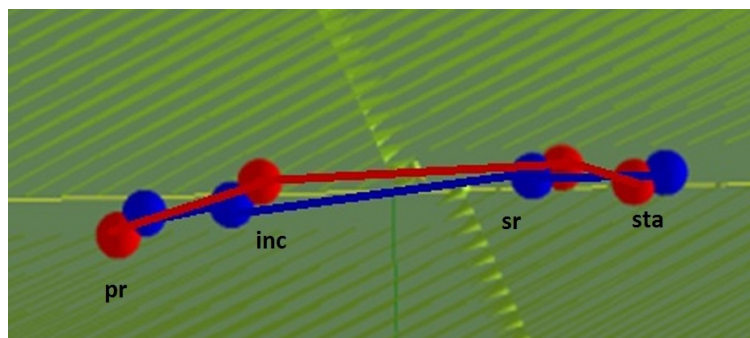
U žen je bod *mf* na mediálním okraji očnice umístěn více anteriorně než u mužů a zároveň laterální okraj je u žen posunut více posteriorně. Z toho vyplývá, že ženská očnice je vykloněna laterálně, kdežto mužská očnice směřuje přímo vpřed, anteriorním směrem.



Obrázek 14: Konfigurace bodů očnice při pohledu shora. Modře je vyznačena mužská a červeně ženská očnice.

5.3.5. Oblast patra

Na patře byly hodnoceny pouze čtyři body v mediánní rovině. Proto u něj v naší práci nelze předpokládat výrazný projev tvarové variability mezi pohlavími. Zaznamenána byl jen rozdíl v relativní délce jednotlivých složek patra. Vzdálenost mezi body *sta* a *sr* je jednoznačně nižší u žen a naopak delší je u nich úsek mezi *foramen incisivum* (bod *inc*) a bodem *pr*. To může být dáno větší protrusí alveolárního oblouku u žen (viz obrázek 15). Dále je možné popsat, že patro u mužů sbíhá od bodu *sta*, přes *sr* a *inc* k *pr* inferiorním směrem, kdežto u žen je bod *sr* relativně více superiorně umístěn než bod *sta*. Rovina patra je tedy více horizontální u žen.

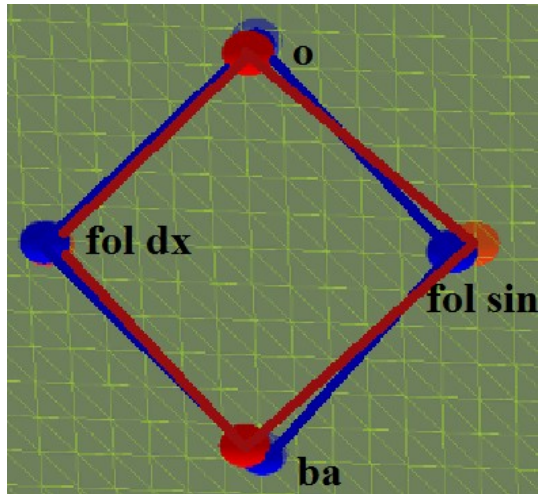


Obrázek 15: Konfigurace bodů na patře mužů (modře) a žen (červeně).

5.3.6. Týlní otvor

Týlní otvor byl dán čtyřmi význačnými body. Těmi jsou *o*, *ba*, *fol sin*, *fol dx*. Z diskriminačních analýz a Hotelling T^2 testu vyplývá, že tvarová variabilita mezi

pohlavími je v případě týlního otvoru pouze malá a špatně hodnotitelná. Při porovnání mužského a ženského tvaru v TPS analýze (viz obrázek 16) lze jen odlišit relativní pozici bodů. Přestože body na příčné ose týlního otvoru (*fol sin* a *fol dx*) leží více superiorně u mužů, body na podélné ose (*o* a *ba*) leží více superiorně u žen. Celkově lze konstatovat, že se ztrátou faktoru velikosti došlo v případě týlního otvoru ke ztrátě většiny pohlavního dimorfismu.



Obrázek 16: Vizualizace tvaru týlního otvoru. Červeně referenční tvar žen, modře cílový tvar mužů.

6. Diskuze

6.1. Odhad pohlaví

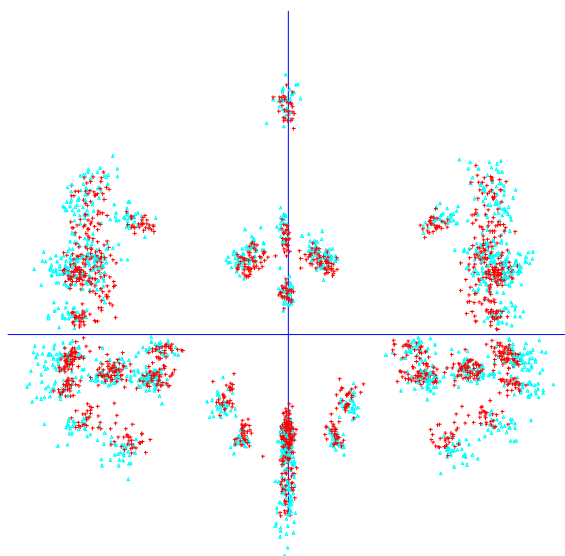
Hlavním tématem této práce je určení míry pohlavního dimorfismu na studovaném populačním vzorku a následné porovnání pohlavního dimorfismu dvou populačních vzorků. Cílem tohoto srovnání je snaha nalézt populačně nespecifický pohlavní dimorfismus na lidské lebce, který by mohl sloužit k odhadu pohlaví.

Odhad pohlaví se hojně využívá v paleoantropologii, bioarcheologii či ve forenzní antropologii (White, 2000; Kemkes-Grottenthaler, 2001; Ubelaker et al., 2002; Kjellström, 2004; Cattaneo, 2007) a vždy je u něj požadována maximální možná přesnost. Nejvyšší přesnost diskriminace poskytuje analýza pánevních kostí (Steyn et al., 2000; Patriquin et al., 2003; Brůžek a Murail, 2006; Kurki, 2011; Bilfeld et al., 2012), jejíž nevýhodou je ovšem špatná zachovalost u kosterních nálezů (Mays a Cox, 2000; Scheuer, 2002). Z těchto důvodů je důležitý odhad pohlaví za pomoci lebky, jejíž důležitost se udává jako druhá v pořadí za pánevními kostmi (Brůžek a Murail, 2006).

Odhad pohlaví se provádí na základě hodnocení pohlavního dimorfismu. Ten může být hodnocen morfoskopicky (vizuálně) nebo morfometricky (měřením). Propojením těchto dvou přístupů je geometrická morfometrie, která kvantitativně hodnotí velikost i tvar. Morfoskopicky je možné provádět odhad pohlaví i hodnocením jednotlivých znaků. Tento přístup ale neumožňuje přesnou diskriminaci pohlaví (69 – 83 %). Současným hodnocením více znaků zároveň lze tuto přesnost zvýšit až na 90 %. Z možnosti hodnotit jednotlivé znaky vyplývá i možnost využití metody na fragmentárním nálezu (Rogers, 2005; Monticelli a Graw, 2008; Walker, 2008). Nevýhodou vizuálního hodnocení je nízká objektivita a špatná opakovatelnost (Hill, 2000; Kemkes-Grottenthaler et al., 2002; Walrath et al., 2004; Rogers, 2005; Williams a Rogers, 2006).

Většina metod využívá k odhadu pohlaví tvar i velikost. Právě velikost je významný faktor při odhadu pohlaví, protože muži bývají ve všech rozměrech větší než ženy (White, 2000; Rösing et al., 2007; Velemínská et al. 2007; Ross et al., 2011; Altayeb et al., 2011). V této diplomové práci bylo dosaženo prokazatelně vyššího procenta správného odhadu pohlaví při analýze tvaru společně s velikostí než při analýzách samotného tvaru. Z našich výsledků vyplývá, že muži jsou v průměru prokazatelně větší

než ženy (viz obrázek 17). Využití velikosti je však značně problematické, protože velikost je populačně specifická (Hennessy a Stringer, 2002; Badawi-Fayad a Cabanis, 2007; Bastir et al., 2011), a proto diskriminační funkci získanou analýzou velikostně nestandardizovaných objektů není vhodné použít k odhadu pohlaví u jiné populace nebo u nálezů neznámého původu. Analýza samotné tvarové složky sice znamená nižší procento správného odhadu pohlaví, ale zároveň lepší možnost využití u neznámých jedinců.



Obrázek 17: Konfigurace význačných bodů obou pohlaví před odstraněním vlivu velikosti. Červenou barvou ženy, modře muži.

Pro vyšší objektivitu by měly být k odhadu pohlaví použity sofistikované a robustní metody (např. diskriminační analýza s crossvalidací) a to i za cenu snížení ukazatelů přesnosti diskriminace. V našem případě byla provedena diskriminační analýza s crossvalidací podle skóre hlavních komponent. V případě analýzy samotného tvaru byla úspěšnost odhadu pohlaví jen 68 % při analýze celé lebky, 67 % procent u horního obličej a téměř 63 % u lebeční klenby. Pro ostatní analyzované oblasti lebky byl dosažen správný odhad pohlaví u méně než 60 % jedinců, což je například pro forenzní využití nepřijatelné (Scheuer, 2002).

Lepších výsledků bylo dosaženo při současné analýze tvaru a velikosti lebek či jejich částí. Při použití PC skóre v diskriminační analýze s crossvalidací bylo dosaženo 85% úspěšnosti správného odhadu pohlaví pro celou lebku, 83% pro horní obličej, 80% pro lebeční klenbu a 77% pro oblast nosu. To jsou výsledky srovnatelné s jinými morfometrickými výzkumy, které dosahují správnosti odhadu pohlaví mezi 83 – 95 %

(Steyn a Iscan, 1998; Deshmukh a Devershi, 2006; Franklin et al., 2006; Ramsthaler et al., 2007; Kranioti et al., 2008; Robinson a Bidmos, 2009; Zavando et al., 2009; Ross et al., 2011; Saini et al., 2011_b; Franklin et al., 2012_a), přičemž crossvalidaci použili jen Saini et al. (2011_b) a Franklin et al. (2012_a).

Z dalších výsledků vyplývá vyšší procento správného odhadu pohlaví u diskriminačních analýz bez crossvalidace. V této diplomové práci byly nejpřesnější odhady pohlaví u analýz souřadnicových dat zachycujících velikost a tvar nebo pouze samotný tvar horního obličeje a lebeční klenby (100 %). Tyto falešně pozitivní výsledky platí pouze pro populaci, na základě které byly vypočítány diskriminační funkce.

6.2. Porovnání a hodnocení tvarové variability mezi populacemi

Jedním z cílů práce bylo porovnat výsledky studia pohlavního dimorfismu na americké populaci s předchozími zjištěními získanými studiem středoevropské populace z Pachnerovy sbírky. Výsledky byly převzaty z práce Bigoni et al. (2010), (dále jen srovnávací soubor).

Z tohoto důvodu byl sběr a analýza dat v této diplomové práci směřován k získání porovnatelných výsledků analýz. Byly vybrány podobné význačné body, které byly následně rozdělené do stejných samostatně analyzovaných oblastí na lebce. Některé souřadnice však nebylo metodami použitými v této práci možné získat a tudíž ani porovnat jimi definované oblasti. Vhodně porovnatelnými oblastmi jsou horní obličej, oblast nosu, očníce a tvrdé patro.

Lebeční klenba

Jednou z oblastí, kterou nebylo možné dobře porovnat s se srovnávacím souborem byla lebeční klenba, která byla v práci Bigoni et al. (2010) zastoupená pomocnými body vyznačenými podél mediální roviny lebky. Metody použité v této diplomové práci však neumožňují pomocné body (semilandmarky) použít. Jediným porovnatelným zjištěním je tedy posun bodu *bregma* superiorním směrem u mužů, shodně pozorovaný v této diplomové práci i u srovnávacího souboru. S tímto zjištěním souhlasí i výsledky studií Franklin et al. (2005) a Green a Curnoe (2009).

Porovnáním dalších výsledků této práce s odbornou literaturou došlo k výrazné shodě. V rámci této práce bylo zjištěno, že lebeční klenba je relativně širší u žen a naopak relativně delší u mužů. Vyšší šířku klenby u žen popisují Urbanová (2009) a Franklin et al. (2012a), větší délku lebeční klenby pak pozorovali Steyn a Iscan (1998), Franklin et al. (2005) či Velemínská et al. (2007).

Dalším pozorovaným rozdílem byl inferiorní posun bodu *ms* u mužů, což je časté zjištění při hodnocení pohlavního dimorfismu u jiných studií (Rosas a Bastir, 2002; Green a Curnoe, 2009; Franklin et al., 2012a).

Horní obličej

V této práci, stejně jako u srovnávacího souboru a dalších studií (Steyn a Iscan, 1998; Franklin et al., 2005; Green a Curnoe, 2009; Urbanová, 2009; Velemínská et al., 2012) byla pozorována vyšší relativní šířka horního obličej u mužů. S tím je spojena i větší robustnost jařmového oblouku u mužů (Gonzalez et al. 2011; Bigoni et al. 2010).

Rozdíl mezi našim souborem a srovnávacím souborem byl pozorován ve výšce horního obličej u mužů, který byl u našeho populačního vzorku relativně vyšší, ale u srovnávacího souboru byl pozorován naopak nižší horní obličej u mužů. S tím souvisí větší vzdálenost mezi bodem *ft* a body *fmo* a *fnt* pozorovaná v této práci a kratší vzdálenost mezi bodem *ft* a body *fmo* a *fnt* popisovaná u srovnávacího souboru.

Oblast nosu

Z výsledků diplomové práce i studie srovnávacího souboru vyplývá, že nosní apertura je relativně vyšší a užší u mužů než u žen. Z toho vyplývá, že vstup do nosní dutiny je relativně širší u žen (vzdálenost *apt-apt*), s čímž ve svých publikacích souhlasí i Rosas a Bastir (2002), Cantín et al. (2009) a Bastir et al. (2011).

V obou porovnávaných studiích byla shodně pozorována anteriorní projekce v bodě *ns*, patrná i v práci Rosas a Bastir (2002). Výsledky této diplomové práce se shodují s výsledky studie srovnávacího souboru i v hodnocení postavení baze kostí nosních (dáno body *mnf*, *mf*), která je u mužů umístěná více posteriorně. Obě porovnávané práce se též shodují v hodnocení šířky baze nosních kostí (vzdálenosti *mnf-mnf*, *mf-mf*), která je hodnocena jako relativně větší u žen. Pozice bodu *rhinion* je u srovnávacího souboru

pozorována u žen relativně více inferiorně než u mužů a v této práci byla naopak u žen pozorována výrazně více superiorně.

Očnice

V obou porovnávaných studiích je pozorován kruhový tvar očnice u žen a oválný u mužů, což lze popsat také jako relativně nižší a delší očnice u mužů. Laterálně protáhlý tvar očnice u mužů popisují též další autoři (White, 2000; Pretorius et al., 2006; Urbanová, 2009), relativně vyšší očnice byla pozorována u žen ve studii Dayal et al. (2008). Dále je v této práci i u srovnávacího souboru shodně pozorován více superiorně umístěný bod *mnf* u mužů. Další shoda je v hodnocení sklonu očnice. U žen je pozorována více anteriorní pozice bodu *mnf* a posteriorní umístění bodů *fmo a ek*, v porovnání s muži. To se projevuje jako sagitální naklonění vstupu do očnice u žen, což potvrzují i výsledky studie Pretorius et al. (2006).

Z výsledků této práce byl u mužů při pohledu shora patrný anteriorní posun relativní pozice horního okraje očnice (bod *spa*) vůči dolnímu okraji očnice (bod *sbk*) a hlouběji v obličeji zanořený bod *mf*. Stejný znak je popisován např. Šmahelem (2001) nebo v publikaci Enlow a Hans (1996).

Oblast patra

V této práci byla zaznamenána pouze variabilita v relativní délce jednotlivých složek patra. U srovnávacího souboru bylo zjištěno, že bod *pr* u žen promínuje anteriorně a také, že body *sta* a *sr* jsou na patře žen umístěny blíže k sobě než v případě mužů. Obě pozorování jsou v souladu s výsledky této práce.

Týlní otvor

Variabilita tvaru týlního otvoru nebyla hodnocena u srovnávacího souboru, ale stala se součástí této práce. Tvar týlního otvoru se mezi pohlavími signifikantně neliší. Jediný významný rozdíl je ve velikosti týlního otvoru, který bývá větší u mužů (Günay a Altinkök, 2000; Wescott a Moore-Jansen, 2001; Murshed et al., 2003; Uysal et al. 2005; Gapert et al. 2009_a; Gruber et al., 2009; Suazo et al., 2009; Ukoha et al., 2009; Radhakrishna et al., 2012).

Porovnání výsledků odhadu pohlaví

V této diplomové práci, stejně jako v práci Bigoni et al. (2010) byla provedena diskriminační analýza podle tvaru. V obou případech byly vstupními daty souřadnice význačných bodů na lebce. Shodného výsledku bylo dosaženo při analýze horního obličeje, kdy v obou studiích bylo správně přiřazeno pohlaví ke všem jedincům v souboru. Dalšími hodnocenými oblastmi byly oblast nosu, očníce a oblast patra. Z výsledků vyplývá vyšší správnost odhadu pohlaví u oblasti nosu a očníce zaznamenaná v této práci. Opačně dopadla analýza oblasti patra (viz tabulka 9).

Tabulka 9: Porovnání výsledků odhadu pohlaví

Správný odhad pohlaví podle tvaru oblastí lebky (v %)		
Oblast lebky	Bigoni et al. 2010	Vlastní výsledky
Horní obličej	100	100
Oblast nosu	77,12	85,48
Očníce	74,44	91,94
Oblast patra	70,41	66,67

6.3. Získávání dat

Vedlejším cílem práce bylo testování přesnosti převodu 2D souřadnic vyznačených na fotografiích do 3D prostoru. S určitostí nemůžeme prohlásit, s jakou přesností tento převod proběhl, protože nebylo provedeno porovnání výsledků mezi touto metodou a jinými běžně používanými metodami získávání souřadnicových dat na lebce. V rámci testování reliability proběhlo pouze hodnocení rozměrů získaných v programu PhotoModeler Scanner s výsledky lineárního měření provedeného školitelem. Mezi měřeními byla zjištěna vysoká shoda. Například u rozměru *ft-ft* bylo 95,9 % zjištěné rozdílnosti tvořeno rozdílností biologickou a jen 4,1 % odchylkou měření.

Získávání 3D souřadnic z 2D fotografií lebek proběhlo tedy úspěšně. Při použití této metody je však důležité si uvědomit časovou náročnost převodu dat z 2D do 3D. Z důvodu časově omezeného přístupu ke zpracovávanému materiálu byla zvolena časově nenáročná metoda fotografování lebek v depozitářích, kterou následovala časově náročná metoda převodu 2D fotografií do 3D prostoru, provedená v 3D laboratoři.

V kapitole Metody je popsán tento složitý proces získávání 3D souřadnicových dat z fotografií lebek, který byl obtížnější než se předpokládalo a to zřejmě z důvodu, že lebka

je tvarově příliš složitý objekt s malým počtem landmarků prvního typu lokalizovatelných na jejím povrchu. Bylo obtížné nalézt dostatečný počet bodů, pomocí nichž by došlo k propojení všech fotografií a získání 3D souřadnic bodů, s čímž souhlasí i Lynnerup et al. (2003). Právě kvůli obtížné lokalizaci některých význačných bodů byly některé cíle práce splněny jen z části. Nebylo například možné získat souřadnice všech význačných bodů použitých v práci Bigoni et al. (2010), protože jejich zastoupení na fotografiích nebylo dostatečné (vždy jsou nutné minimálně tři vyobrazení bodu).

7. Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu pohlavního dimorfismu a na výzkum populační specifity pohlavního dimorfismu a metod odhadu pohlaví. V rámci této práce byl zkoumán pohlavní dimorfismus pozorovaný u lebek populace ze Severní Ameriky s výsledky analýz tvaru lebek středoevropského původu studie Bigoni et al. (2010), (srovnávací studie).

Pro analýzy bylo nejprve nutné získat 3D souřadnice význačných bodů z nasnímaného souboru lebek. V rámci diplomové práce bylo zpracováno 32 sad fotografií mužských a 30 sad fotografií ženských lebek. K získání 3D souřadnic byl použit program PhotoModeler Scanner, pro nějž to byl zároveň test využití v antropologii. Získané souřadnice byly rozděleny do oblastí podle srovnávací studie a dále statisticky zpracovávány. K odstranění vlivu velikosti byla využita Prokrustovská analýza. Dalším krokem byla analýza hlavních komponent, z níž jsme získali skóre hlavních komponent dále využitých v diskriminačních analýzách.

Výsledky diplomové práce lze shrnout v následujících bodech:

1.) Velikost je důležitý faktor pohlavního dimorfismu, protože analýzy velikosti a tvaru současně poskytují vyšší přesnost odhadu pohlaví než analýzy samotného tvaru.

2.) Z výsledků diskriminační analýzy souřadnicových dat popisujících tvar v naší práci i v porovnávané studii shodně vyplývá, že nejpřesnější odhad pohlaví umožňuje analýza tvaru horního obličeje, o málo nižší přesnost vykazuje analýza oblasti nosu a očnice. Nejméně přesný odhad pohlaví poskytuje analýza tvaru oblasti patra.

3.) K diskriminační analýze s crossvalidací byly použity skóre hlavních komponent. Ty poskytují přesnost odhadu pohlaví 85 % při analýze tvaru i velikosti celé lebky. Jen o málo méně je přesná analýza horního obličeje (téměř 84 %). Při analýze samotného tvaru došlo v diskriminační analýze s crossvalidací k odhadu pohlaví s přesností 68 % u celé lebky, 67 % u horního obličeje a necelých 63 % u lebeční klenby.

4.) Metodou tenkých ohebných pásků byl sledován pohlavní dimorfismus tvaru lebky. U našeho populačního vzorku byla pozorována např. relativně vyšší výška očnice a širší nosní apertura u žen nebo inferiorní projekce *processus mastoideus* a větší robustnost jařmového oblouku u mužů. Tyto výsledky byly dále porovnávány s tvarovou variabilitou srovnávacího souboru. Zjištěný pohlavní dimorfismus tvaru lebky v této diplomové práci je z velké části shodný s výsledky srovnávací studie. Jedním z rozdílů mezi pracemi je vyšší výška horního obličeje u mužů pozorovaná u našeho souboru.

8. Seznam citované literatury

- Altayeb AA, Mohammed HA a Hassan MA.** 2011. Sex determination from cranial measurements in recent northern Sudanese. *Khartoum Medical Journal*, 4(1):539-547.
- Arat M, Köklü A, Özdiler E, Rübendüz M a Erdogan B.** 2001. Craniofacial growth and skeletal maturation: a mixed longitudinal study. *European Journal of Orthodontics*, 23(4):355-361.
- Asala SA, Bidmos MA a Dayal MR.** 2004. Discriminant function sexing of fragmentary femur of South African blacks. *Forensic Science International*, 145(1):25–29.
- Badawi-Fayad J a Cabanis EA.** 2007. Three-dimensional Procrustes analysis of modern human craniofacial form. *The Anatomical Record*, 290:268-276.
- Balci Y, Yavuz MF a Cagdir S.** 2005. Predictive accuracy of sexing the mandible by ramus flexure. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 55:229-237.
- Barrier IL a L'Abbé EN.** 2008. Sex determination from the radius and ulna in a modern South African sample. *Forensic Science International*, 179(1):85.e1-85.e7.
- Bastir M, Godoy P a Rosas A.** 2011. Common features of sexual dimorphism in the cranial airways of different human populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 146:414-422.
- Bigoni L, Velemínská J a Brůžek J.** 2010. Three-dimensional geometric morphometric analysis of cranio-facial sexual dimorphism in a Central European sample of known sex. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 61:16–32.
- Bilfeld MF, Dedouit F, Rousseau H, Sans N, Braga J, Rougé H a Telmon N.** 2012. Human coxal bone sexual dimorphism and multislice computed tomography: geometric morphometric analysis of 65 adults. *Journal of Forensic Sciences*, 57(3):doi: 10.1111/j.1556-4029.2011.02009.x
- Bookstein FL.** 1986. Size and shape spaces for landmark data in two dimension. *Statistical Science*, 1(2):181-242.
- Bookstein FL.** 1991. *Morphometric tools for landmark data: Geometry and Biology.* Cambridge University Press.
- Bookstein FL.** 1996. Shape and the information in medical images: a decade of the morphometric synthesis. *Computer Vision and Image Understanding*. 66(2), 97-118.
- Borovanský L, Hromada J, Kos J, Zrzavý J a Žlábek K.** 1967. *Soustavná anatomie člověka. Díl I. Státní zdravotnické nakladatelství, Praha.*

- Brůžek J. 2002.** A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 117:157–168.
- Brůžek J, a Murail P. 2006.** Methodology and reliability of sex determination from the skeleton. In *Forensic anthropology and medicine: complementary sciences from recovery to cause of death*. Edited by: Schmitt A, Cunha E, and Pinheiro J.
- Bulygina E, Mitteroecker P a Aiello L. 2006.** Ontogeny of facial dimorphism and patterns of individual development within one human population. *American Journal of Physical Anthropology*, 131:432-443.
- Buretić-Tomljanović A, Ostojić S a Kapović M. 2006.** Secular change of craniofacial measures in Croatian younger adults. *American Journal of Human Biology*, 18:668–675.
- Bytheway JA a Ross AH. 2010.** A geometric morphometric approach to sex determination of the human adult os coxa. *Journal of Forensic Sciences*, 55(4):doi: 10.1111/j.1556-4029.2010.01374.x.
- Cantín LM, Suazo GIC, Zavando MDA a Smith RL. 2009.** Sexual dimorphism determination by piriform aperture morphometric analysis in Brazilian human skulls. *International Journal of Morphology*, 27(2):327-331.
- Cattaneo C. 2007.** Forensic anthropology: developments of a classical discipline in the new millennium. *Forensic Science International*, 165:185-193.
- Claes P, Walters M, Shriver MD, Puts D, Gibson G, Clement J, Baynam G, Verbeke G, Vandermeulen D a Suetens P. 2012.** Sexual dimorphism in multiple aspects of 3D facial symmetry and asymmetry defined by spatially dense geometric morphometrics. *Journal of Anatomy*, doi: 10.1111/j.1469-7580.2012.01528.x.
- Chakravarty MM, Aleong R, Leonard G, Perron M, Pike GB, Richer L, Veillette S, Pausova Z a Paus T. 2011.** Automated analysis of craniofacial morphology using magnetic resonance images. *PLoS ONE*, 6(5): e20241. doi:10.1371/journal.pone.0020241.
- Čihák R. 2011.** *Anatomie 1*. Grada Publishing. 151-153.
- Dabbs GR a Moore-Jansen PH. 2010.** A method for estimating sex using metric analysis of the scapula. *Journal of Forensic Sciences*, 55(1): doi: 10.1111/j.1556-4029.2009.01232.x.
- Dayal MR, Spocter MA a Bidmos MA. 2008.** An assessment of sex using the skull of black South Africans by discriminant function analysis. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 59:209-221.
- Deshmukh AG a Devershi DB. 2006.** Comparison of cranial sex determination by univariate and multivariate analysis. *Journal of the Anatomical Society of India*, 55:48–51.

- Dobisíková M.** 1999. Určování pohlaví. In *Antropologie – příručka pro studium kostry* (edited by Stloukal M). Národní muzeum, 168-170.
- Dokládál M, Páč L.** 1991. *Anatomie člověka I. – Pohybový systém.* Univerzita – fakulta lékařská. Brno.
- Donnelly SM, Hens SM, Rogers NL a Schneider KL.** 1998. Technical note: a blind test of mandibular ramus flexure as a morphologic indicator of sexual dimorphism in the human skeleton. *American Journal of Physical Anthropology*, 107:363-366.
- Đurić M, Rakočević a Đonić D.** 2005. The reliability of sex determination of skeletons from forensic context in the Balkans. *Forensic Science International*, 147:159-164.
- Enlow DH a Hans MG.** 1996. *Essentials of Facial Growth.* W.B. Saunders Company.
- Fetter V, Prokopec M, Suchý J a Titlbachová S.** 1967. *Antropologie.* Academia, Praha.
- Flégr J.** 2005. *Evoluční biologie.* Academia, 263-283.
- Franklin D, Freedman L a Milne N.** 2005. Sexual dimorphism and discriminant function sexing in indigenous South African crania. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 55:213-228.
- Franklin D, O’Higgins P, Oxnard CE a Dadour I.** 2006. Determination of sex in South African blacks by discriminant function analysis of mandibular linear dimensions. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 2(4):263-268.
- Franklin D, Oxnard CE, O’Higgins P a Dadour I.** 2007_a. Sexual dimorphism in the subadult mandible: quantification using geometric morphometrics. *Journal of Forensic Sciences*, 52(1):6–10.
- Franklin D, Freedman L, Milne N a Oxnard CE.** 2007_b. Geometric morphometric study of population variation in indigenous southern African crania. *American Journal of Human Biology*, 19:20-33.
- Franklin D, Cardini A, Flavel A a Kuliukas A.** 2012_a. The application of traditional and geometric morphometrics analyses for forensic quantification of sexual dimorphism: preliminary investigations in a western Australian population. *International Journal of Legal Medicine*, 126:549–558.
- Franklin D, Flavel A, Kuliukas A, Cardini A, Marks MK, Oxnard C a O’Higgins P.** 2012_b. Estimation of sex from sternal measurements in a western Australian population. *Forensic Science International*, 217:230.e1–230.e5.
- Frayser DW a Wolpoff MH.** 1985. Sexual Dimorphism. *Annual Review Anthropology*, 14:429-473.

- Gapert R, Black S a Last J.** 2009_a. Sex determination from the foramen magnum: discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century British sample. *International Journal of Legal Medicine*, 123:25-33.
- Gapert R, Black S a Last J.** 2009_b. Sex determination from the occipital condyle: discriminant function analysis in an eighteenth and nineteenth century British sample. *American Journal of Physical Anthropology*, 138: 384-394.
- Gonzalez PN, Bernal V a Perez SI.** 2011. Analysis of sexual dimorphism of craniofacial traits using geometric morphometric techniques. *International Journal of Osteoarchaeology*, 21:82–91.
- Gower JC.** 1975. Generalized procrustes analysis. *Psychometrika*, 40:33-51.
- Graham EAM.** 2006. Sex determination. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 2(4):283.
- Gray H.** 1918. *Anatomy of the Human Body*. Lea & Febiger, Philadelphia.
- Graw M, Czarnetzki A a Haffner HT.** 1999. The form of the supraorbital margin as a criterion in identification of sex from the skull: investigations based on modern human skulls. *American Journal of Physical Anthropology*, 108:91-96.
- Green H a Curnoe D.** 2009. Sexual dimorphism in southeast asian crania: a geometric morphometric approach. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 60:517-534.
- Gruber P, Henneberg M, Böni T a Rühli F.** 2009. Variability of human foramen magnum size. *The Anatomical Record*, 292:1713-1719.
- Gustafsson A, Werdelin L, Tullberg BS a Lindenfors P.** 2007. Stature and sexual stature dimorphism in Sweden, from the 10th to the end of the 20th century. *American Journal of Human Biology*, 19(6):861-870.
- Guyomarc'h P a Brůžek J.** 2011. Accuracy and reliability in sex determination from skulls: a comparison of Fordisc® 3.0 and the diskriminant function analysis. *Forensic Science International*, 208:180.e1-180.e6.
- Gülekön IN a Turgut HB.** 2003. The external occipital protuberance: Can it be used as a criterion in the determination of sex? *Journal of Forensic Sciences*, 48(3):513–516.
- Günay Y a Altinkök M.** 2000. The value of the size of foramen magnum in sex determination. *Journal of Clinical Forensic Medicine*, 7:147-149.
- Hammer Ø, Harper DAT a Ryan PD.** 2012. PAST – Palaeontological STatistics. <http://folk.uio.no/ohammer/past/past.pdf>.
- Harris SM a Case DT.** 2012. Sexual dimorphism in the tarsal bones: implications for sex determination. *Journal of Forensic Sciences*, 57(2):doi: 10.1111/j.1556-4029.2011.02004.x.

Haun SJ. 2000. Brief communication: A study of the predictive accuracy of mandibular ramus flexure as a singular morphologic indicator of sex in an archaeological sample. *American Journal of Physical Anthropology*, 111:429-432.

Hayashi K, Saitoh S a Mizoguchi I. 2011. Morphological analysis of the skeletal remains of Japanese females from the Ikenohata-Shichikencho site. *European Journal of Orthodontics*, doi: 10.1093/ejo/cjr058

Hennessy RJ a Stringer CB. 2002. Geometric morphometric study of the regional variation of modern human craniofacial form. *American Journal of Physical Anthropology*, 117:37-48.

Hill CA. 2000. Technical note: evaluating mandibular ramus flexure as a morphological indicator of sex. *American Journal of Physical Anthropology*, 111:573-577.

Horáková E. 2008. Robustní metody v diskriminační analýze. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Brno.

Hu KS, Koh KS, Han SH, Shin KJ a Kim HJ. 2006. Sex determination using nonmetric characteristics of the mandible in Koreans. *Journal of Forensic Sciences*, 51(6):1376-1382.

Indrayana NS, Glinka J a Mieke S. 1998. Mandibular ramus flexure in an Indonesian population. *American Journal of Physical Anthropology*, 105:89-90.

Jantz RL a Meadows-Jantz L. 2000. Secular change in craniofacial morphology. *American Journal of Human Biology*, 12:327-338.

Jonke E, Prossinger H, Bookstein FL, Schaefer K, Bernhard a M, Freudenthaler JW. 2007. Secular trends in the facial skull from the 19th century to the present, analyzed with geometric morphometrics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 132:63-70.

Jurmain R, Kilgore L a Trevanthen W. 2009. *Essentials of physical anthropology*, Seventh edition. Wadsworth, Cengage Learning.

Kemkes A a Gobel T. 2006. Metric assessment of the “mastoid triangle“ for sex determination: a validation study. *Journal of Forensic Sciences*, 51:985-989.

Kemkes-Grottenthaler A. 2001. The reliability of forensic osteology – a case in point case study. *Forensic Science International*, 117:65-72.

Kemkes-Grottenthaler A, Löbig F a Stock F. 2002. Mandibular ramus flexure and gonial eversion as morphologic indicators of sex. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 53(2):97-111.

Kharoshah MAA, Almadani O, Ghaleb SS, Zaki MK a Fattah YA. 2010. Sexual dimorphism of the mandible in a modern Egyptian population. *Journal of Forensic Legal Medicine*, 17(4):213-215.

- Kimmerle EH, Ross A a Slice D.** 2008. Sexual dimorphism in America: geometric morphometric analysis of the craniofacial region. *Journal of Forensic Sciences*, 53(1):doi: 10.1111/j.1556-4029.2007.00627.x.
- Kjellström A.** 2004. Evaluations of sex assessment using weighted traits on incomplete skeletal remains. *International Journal of Osteoarchaeology*, 14:360-373.
- Koski K.** 1996. Mandibular ramus flexure-indicator of sexual dimorphism?. *American Journal of Physical Anthropology*, 101:545-546.
- Kranioti EF, Iscan MY a Michalodimitrakis M.** 2008. Craniometric analysis of the modern Cretan population. *Forensic Science International*, 180:110.e1–110.e5.
- Kranioti E, Bastir M, Sánchez-Meseguer A a Rosas A.** 2009. A geometric-morphometric study of the cretan humerus for sex identification. *Forensic Science International*, 189:111.e1–111.e8.
- Kurki HK.** 2011. Pelvic dimorphism in relation to body size and body size dimorphism in humans. *Journal of Human Evolution*, 61:631e643.
- Kuželka V.** 1999. Osteometrie. In *Antropologie – příručka pro studium kostry*. Edited by Stloukal M. Národní muzeum, 42-46.
- Loth SR a Henneberg M.** 1996. Mandibular ramus flexure: a new morphologic indicator of sexual dimorphism in the human skeleton. *American Journal of Physical Anthropology*, 99:473-485.
- Loth SR a Henneberg M.** 1998. Mandibular ramus flexure is a good indicator of sexual dimorphism. *American Journal of Physical Anthropology*, 105:91-92.
- Lynnerup N, Andersen M a Lauritsen HP.** 2003. Facial image identification using Photomodeler[®]. *Legal Medicine*, 5:156-160.
- Manoonpol C a Plakornkul V.** 2012. Sex determination using mastoid process measurement in Thais. *Journal of the Medical Association of Thailand*; 95(3):423-429.
- Martin R a Saller K.** 1957. *Lehrbuch der anthropologie*. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart.
- Mastrangelo P, De Luca S a Sánchez-Mejorada.** 2011. Sex assessment from carpals bones: Discriminant function analysis in a contemporary Mexican sample. *Forensic Science International*, 209:196.e1–196.e15.
- Maughan RJ, Watson JS a Weir J.** 1983. Strength and cross-sectionla area of human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 338:37-49.
- Mays S a Cox M.** 2000. Sex determination in skeletal remains. In: *Human osteology in archaeology and forensic science*. Edited by Cox M and Mays S. Greenwich Medical Media, London, 117–130.

- Moss ML, Skalak R, Patel H, Sen K, Moss-Salentijn L, Shinozuka M a Vilmann H.** 1985. Finite element method modeling of craniofacial growth. *American Journal of Orthodontics*, 87:453-472.
- Moss ML, Vilmann H, Sen K, Moss-Salentijn L, Pucciarelli HM a Skalak R.** 1987. Studies on orthocephalization: growth behavior of the rat skull in the period 13 – 49 days as described by the finite element method. *American Journal of Physical Anthropology*, 72:323-342.
- Monticelli F a Graw M.** 2008. Investigation on the reliability of determining sex from the human os zygomaticum. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 4:181-186.
- Murail P, Brůžek J, Houët F, a Cunha E.** 2005. DSP: A tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip-bone measurements. *Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris*, 3-4:167-176.
- Murshed KA, Cicekcibasi AE a Tuncer I.** 2003. Morphometric evaluation of the foramen magnum and variations in its shape: a study on computerized tomographic images of normal adults. *Turkish Journal of Medical Sciences*, 33:301-306.
- Nagaoka T, Shizushima A, Sawada J, Tomo S, Hoshino K, Sato H a Hirata K.** 2008. Sex determination using mastoid process measurements: standards for Japanese human skeletons of the medieval and early periods. *Anthropological Science*, 116:105–113.
- O'Higgins P, Bastir M a Kupczik K.** 2006. Shaping the human face. *International Congress Series*, 1296:55–73.
- Oettlé AC, Pretorius E a Steyn M.** 2005. Geometric morphometric analysis of mandibular ramus flexure. *American Journal of Physical Anthropology*, 128:623-629.
- Ousley SD a Jantz LM.** 1996. *FORDISC 2.0: Personal computer forensic discriminant functions*. University of Tennessee, Knoxville.
- Paiva LAS de, Segre M.** 2003. Sexing the human skull through the mastoid process. *Rev. Hosp. Clin. Fac. Med. S. Paulo*, 58(1):15–20.
- Papaioannou VA, Kranioti EF, Joveneaux P, Nathena D a Michalodimitrakis M.** 2012. Sexual dimorphism of the scapula and the clavicle in a contemporary Greek population: Applications in forensic identification. *Forensic Science International*, 217:231.e1–231.e7.
- Patriquin ML, Loth SR a Steyn M.** 2003. Sexually dimorphic pelvic morphology in South African whites and blacks. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 53(3):255-262.
- Patriquin ML, Steyn M a Loth SR.** 2005. Metric analysis of sex differences in South African black and white pelvises. *Forensic Science International*, 147:119–127.

- Plavcan MJ.** 2011. Understanding dimorphism as a function of changes in male and female traits. *Evolutionary Anthropology*, 20:143–155.
- Pollard TD, Earnshaw WC a Lippincott-Schwartz J.** 2008. *Cell Biology*, 2nd edition. Saunders/Elsevier.
- Pretorius E, Steyn M a Scholtz Y.** 2006. Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *American Journal of Physical Anthropology*, 129:64-70.
- Radhakrishna SK, Shivarama CH, Ramakrishna A a Bhagya B.** 2012. Morphometric analysis of foramen magnum for sex determination in South Indian population. *Nitte University Journal of Health Science*, 2:20-22.
- Ramsthaler F, Kreutz K a Verhoff MA.** 2007. Accuracy of metric sex analysis of skeletal remains using Fordisc® based on a recent skull collection. *International Journal of Legal Medicine*, 121:477–482.
- Ramsthaler F, Kettner M, Gehl A a Verhoff MA.** 2010. Digital forensic osteology: morphological sexing of skeletal remains using volume-rendered cranial CT scans. *Forensic Science International*, 195:148–152.
- Rejtarová O, Hejna P, Rejtar P, Bukač J, Slížová D a Krs O.** 2009. Sexual dimorphism of ossified costal cartilage. Radiograph scan study on Caucasian men and women (Czech population). *Forensic Science International*, 191:110.e1–110.e5.
- Rissech C, Schaefer M a Malgoda A.** 2008. Development of the femur—Implications for age and sex determinativ. *Forensic Science International*, 180:1–9.
- Robinson MS a Bidmos MA.** 2009. The skull and humerus in the determination of sex: reliability of discriminant function equations. *Forensic Science International*, 186:86.e1–86.e5.
- Rogers TL.** 1991. Sex determination and age estimation skeletal evidence from St. Thomas cemetery Belleville, Ontario. *Open Access Dissertations and Theses*.
- Rogers TL.** 2005. Determining the sex of human remains through cranial morphology. *Journal of Forensic Sciences*, 50(3):1-8.
- Rohlf FJ.** 1990. Rotational fit (Procrustes) Methods. *Proceeding on Michigan morphometrics workshop*. Edited by Bookstein FL a Rohlf FJ. Special publication No. 2, The University of Michigan Museum of Zoology, Ann Arbor.
- Rosas A and Bastir M.** 2002. Thin-Plate Spline analysis of allometry and sexual dimorphism in the human craniofacial complex. *American Journal of Physical Anthropology*, 117:236–245.

Ross AH, Ubelaker DH a Kimmerle. 2011. Implication of dimorphism, population variation, and secular change in estimating population affinity in the Iberian Peninsula. *Forensic Science International*, 206:214.e1-214.e5.

Rösing FW, Graw M, Marré B, Ritz-Timme S, Rithschild MA, Röthzcher K, Schmeling A, Schröder I a Geserick G. 2007. Recommendations for the forensic diagnosis of sex and age from skeletons. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 58:75–89.

Saini V, Srivastava R, Rai RK, Shamal SN, Singh TB a Tripathi SK. 2011_a. Mandibular ramus: an indicator for sex in fragmentary mandible. *Journal of Forensic Sciences*, 56(S1):doi: 10.1111/j.1556-4029.2010.01599.x.

Saini V, Srivastava R, Rai RK, Shamal SN, Singh TB a Tripathi SK. 2011_b. An osteometric study of northern Indian populations for sexual dimorphism in craniofacial region. *Journal of Forensic Sciences*, 56(3):doi: 10.1111/j.1556-4029.2011.01707.x.

Saini V, Srivastava R, Rai RK, Shamal SN, Singh TB a Tripathi SK. 2012. Sex estimation from the mastoid process among North Indians. *Journal of Forensic Sciences*, 57(2):doi: 10.1111/j.1556-4029.2011.01966.x

Shearer BM, Sholts SB, Garvin HM, Wärmländer SKTS. 2012. Sexual dimorphism in human browridge volume measured from 3D models of dry crania: A new digital morphometrics approach. *Forensic Science International*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.06.013>.

Schaefer K, Mitteroecker P, Gunz P, Bernhard M a Bookstein FL. 2004. Craniofacial sexual dimorphism patterns and allometry among extant hominids. *Annals of Anatomy*, 186: 471-478.

Scheuer L. 2002. Application of osteology to forensic medicine. *Clinical Anatomy* 15:297–312.

Schmittbuhl M, Minor JM le, Taroni F a Mangin P. 2001. Sexual dimorphism of the human mandible: demonstration by elliptical Fourier analysis. *International Journal of Legal Medicine*, 115:100–101.

Scholtz Y, Steyn M a Pretorius E. 2010. A geometric morphometric study into the sexual dimorphism of the human scapula. *HOMO - Journal of Comparative Human Biology*, 61:253–270.

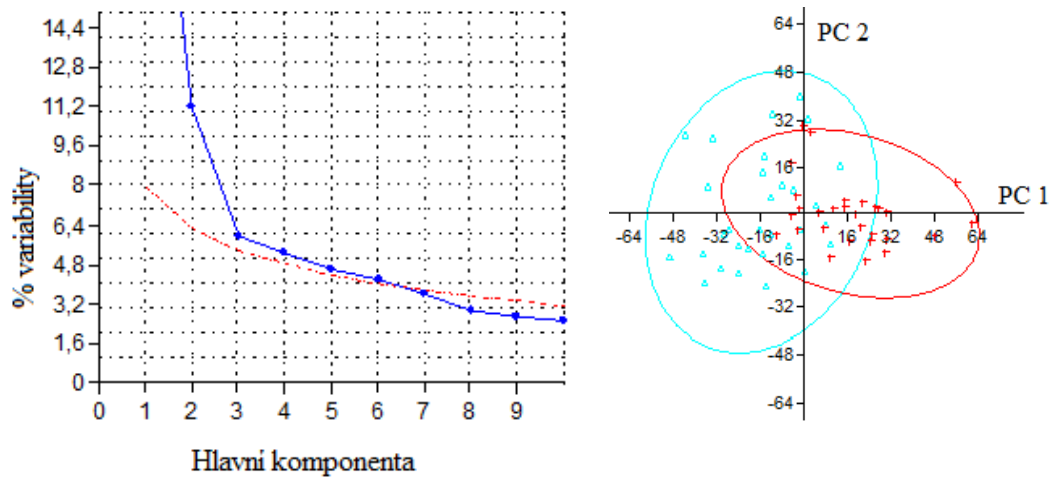
Sinelnikov RD. 1990. *Atlas of Human Anatomy. Volume I, Musculoskeletal System.* MIR publisher, Moscow.

Slice DE. 2005. *Modern Morphometrics. Modern Morphometrics in Physical Anthropology.* Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 5-45.

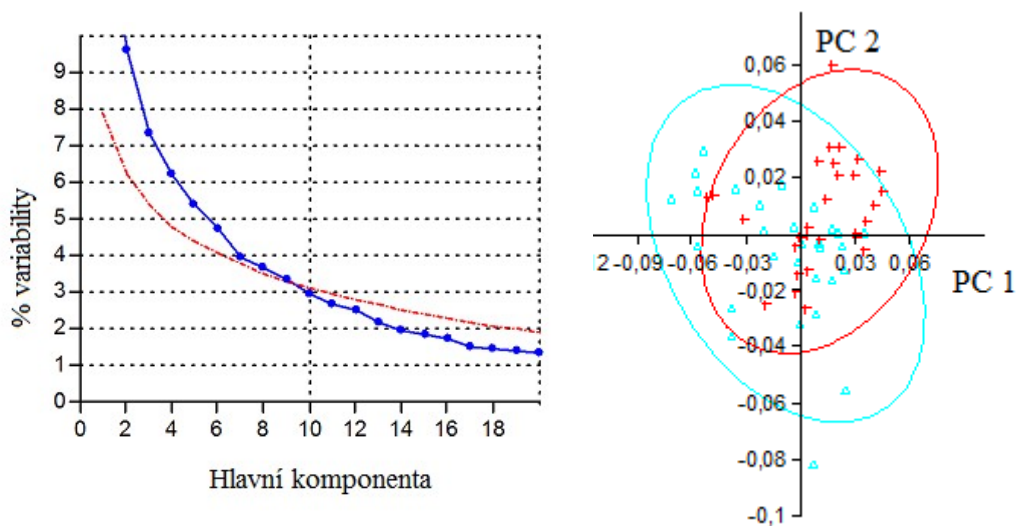
- Stevenson JC, Mahoney ER, Walker PL a Everson PM.** 2009. Technical note: prediction of sex based on five skull traits using decision analysis (CHAID). *American Journal of Physical Anthropology*, 139:434-441.
- Steyn M a Iscan MY.** 1998. Sexual dimorphism in the crania and mandibles of South African whites. *Forensic Science International*, 98:9–16.
- Steyn M, Pretorius E a Hutten L.** 2000. Geometric morphometric analysis of the greater sciatic notch in South Africans. *HOMO – Journal of Comparative Human Biology*, 54(3):197–206.
- Suazo GIC, Zavando MDA a Smith RL.** 2008. Sex determination using mastoid process measurements in Brazilian skulls. *International Journal of Morphology*, 26(4):941-944.
- Suazo GIC, Russo PP, Zavando MDA a Smith RL.** 2009. Sexual dimorphism in the foramen magnum dimensions. *International Journal of Morphology*, 27(1):21-23.
- Šmahel Z.** 2001. *Principy, teorie a metody auxologie*. Karolinum. Praha.
- Thayer ZM a Dobson SB.** 2010. Sexual dimorphism in chin shape: implications for adaptive hypotheses. *American Journal of Physical Anthropology*, 143:417-425.
- Ubelaker DH, Ross AH a Graver S.** 2002. Application of forensic discriminant functions to a Spanish cranial sample. *Forensic Science Communications*, 4(3).
- Ubelaker DH a Volk CG.** 2002. A test of the Phenice method for the estimation of sex. *Journal of Forensic Sciences*; 47(1):19–24.
- Ukoha U, Egwu Oa, Okafor IJ, Anyabolu AE, Ndukwe GU a Okpala I.** 2009. Sexual dimorphism in the foramen magnum of Nigerian adult. *International Journal of Biological & Medical Research*, 2(4):878-881.
- Urbanová P.** 2009. A study of human craniofacial variation by using geometric morphometrics. *Masarykova universita - Závěrečná práce*.
- Ursi WJS, Trotman CA, McNamara Jr. JA, Behrents RG.** 1993. Sexual dimorphism in normal craniofacial growth. *The Angle Orthodontist*, 63(1):47-56.
- Uysal SRM, Gokharman D, Kacar M, Tuncbilek I, Kosar U.** 2005. Estimation of sex by 3D CT measurements of the foramen magnum. *Journal of Forensic Sciences* 50:1310–1314.
- Veleminská J, Velemínský P a Bigoni L.** 2007. Pohlavní dimorfismus lebek velkomoravské populace z Mikulčic: geoemtrická versus klasická morfometrie. *Slovenská antropologie*, 10:92-97.

- Velemínská J, Velemínský P, Bigoni L a Jantač, M.** 2008. Craniometric analysis of the Great Moravian population from Mikulčice: X-ray films study. In: Studien zum Burgwall von Mikulčice VIII. Edited by Velemínský P a Poláček L. Spisy AÚ AV ČR Brno 27:93-120.
- Velemínská J, Bigoni L, Krajiček V, Borský J, Šmahelová D, Cagáňová V a Peterka M.** 2012. Surface facial modelling and allometry in relation to sexual dimorphism. HOMO – Journal of Comparative Human Biology, doi:10.1016/j.jchb.2012.02.002.
- Veyre-Goulet SA, Mercier C, Robin O a Guérin C.** 2008. Recent human sexual dimorphism study using cephalometric plots on lateral telerradiography and discriminant function analysis. Journal of Forensic Sciences, 53(4):doi: 10.1111/j.1556-4029.2008.00759.x.
- Walker PL.** 2008. Sexing skulls using discriminant function analysis of visually assessed traits. American Journal of Physical Anthropology, 136:39–50.
- Walrath DE, Turner P, a Brůžek J.** 2004. Reliability test of the visual assessment of cranial traits for sex determination. American Journal of Physical Anthropology, 125:132–137.
- Weisensee KE a Jantz RL.** 2011. Secular changes in craniofacial morphology of the Portuguese using geometric morphometrics. American Journal of Physical Anthropology, 145:548–559.
- Wescott DJ a Jantz RL.** 2005. Assessing craniofacial secular change in American blacks and whites using geometric morphometry. Modern morphometrics in physical anthropology. Edited by Slice DE. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 231–245.
- Wescott DJ, Moore-Jansen PH.** 2001. Metric variation in the human occipital bone: forensic anthropological applications. Journal of Forensic Sciences; 46(5):1159–1163.
- White TD.** 2000. Human Osteology, second edition. Elsevier Science (USA), Academic Press.
- Williams BA a Rogers TL.** 2006. Evaluating the accuracy and precision of cranial morphological traits for sex determination. Journal of Forensic Sciences, 51(4):doi:10.1111/j.1556-4029.2006.00177.x.
- Zavando MDA, Suazo GIC a Smith RL.** 2009. Sexual dimorphism determination from the lineal dimensions of skulls. International Journal of Morphology, 27(1):133-137.
- Zelditch ML, Swiderski DL, Sheets HD a Fink WL.** 2004. A geometric morphometrics for biologist. A primer. Elsevier Academic Press, New York a Londýn.

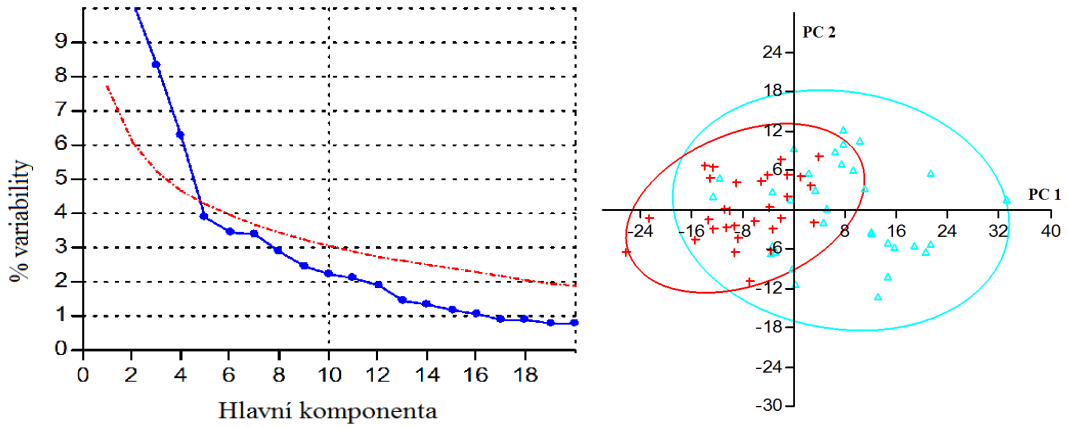
9. Přílohy



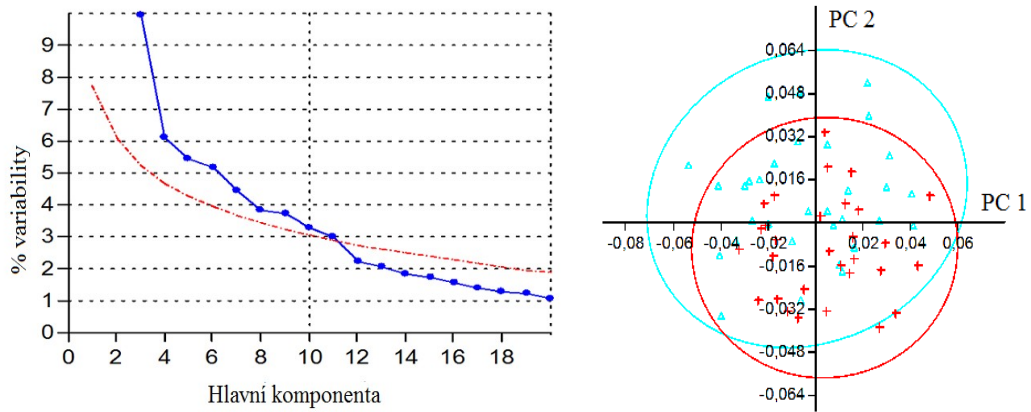
Graf 1: PCA tvaru a velikosti lebky. Vlevo, scree plot příspěvku jednotlivých komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



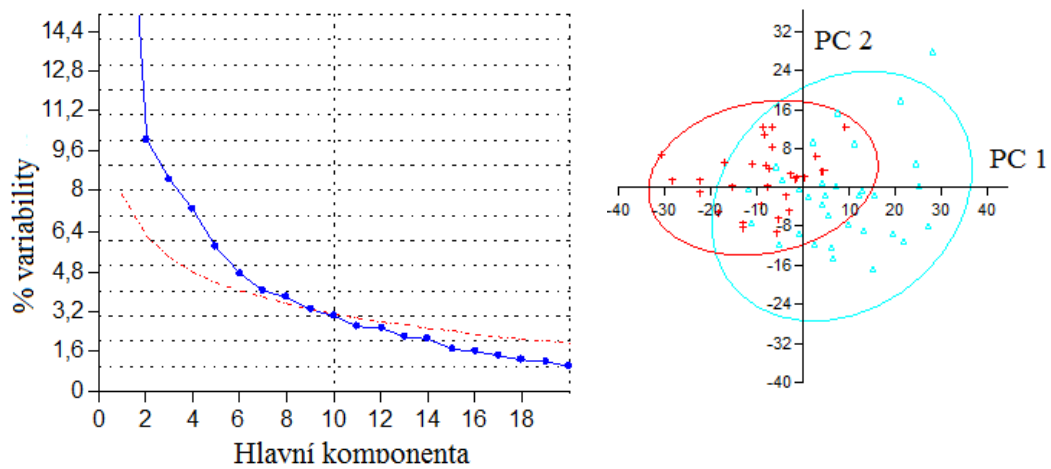
Graf 2: PCA tvaru lebky. Vlevo, scree plot příspěvku jednotlivých komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



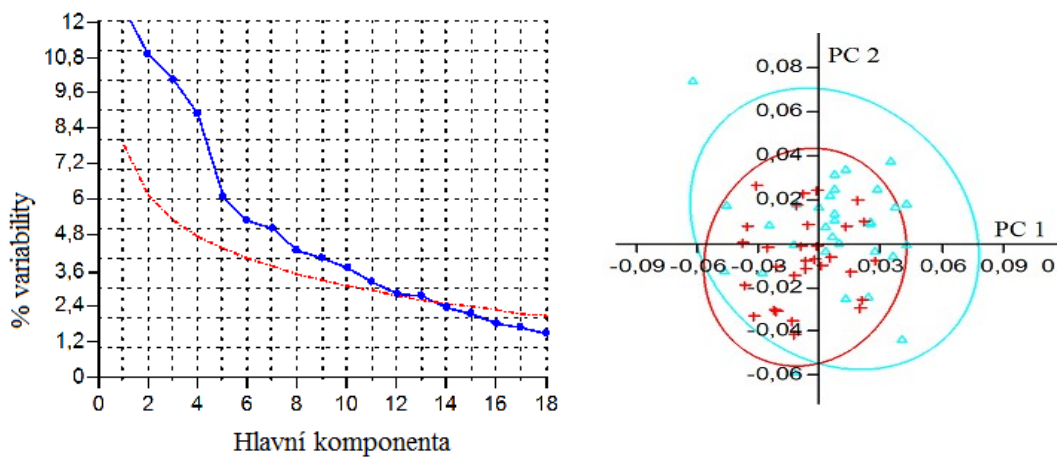
Graf 3: PCA tvaru a velikosti horního obličej. Vlevo, scree plot příspěvku jednotlivých komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



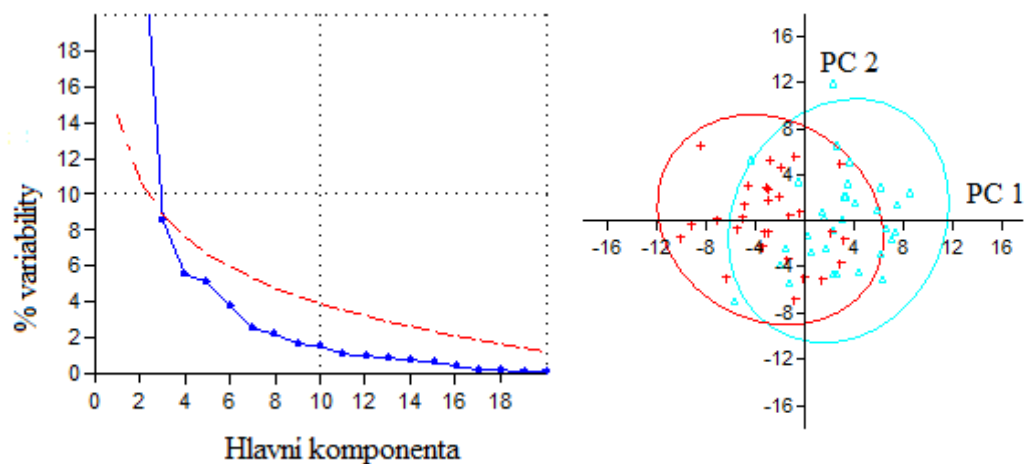
Graf 4: PCA tvaru horního obličej. Vlevo, scree plot příspěvku jednotlivých komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



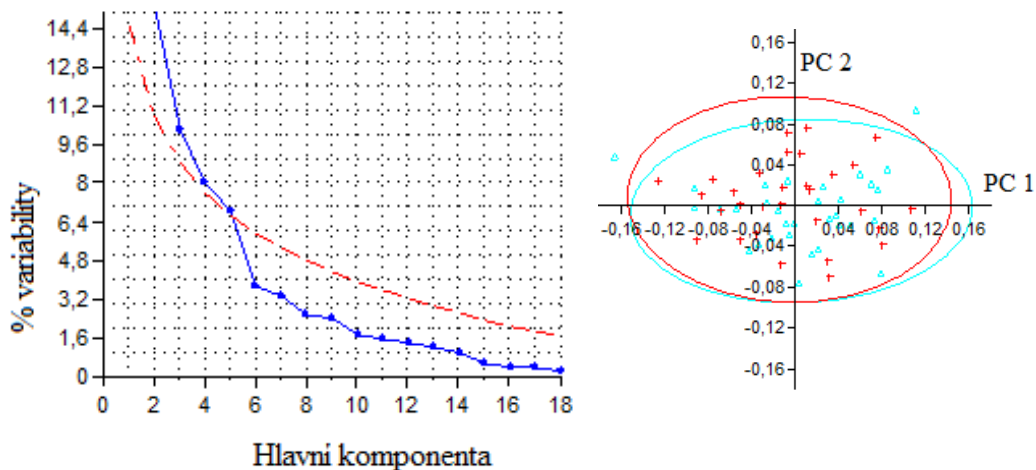
Graf 5: PCA tvaru a velikosti lebeční klenby. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži)



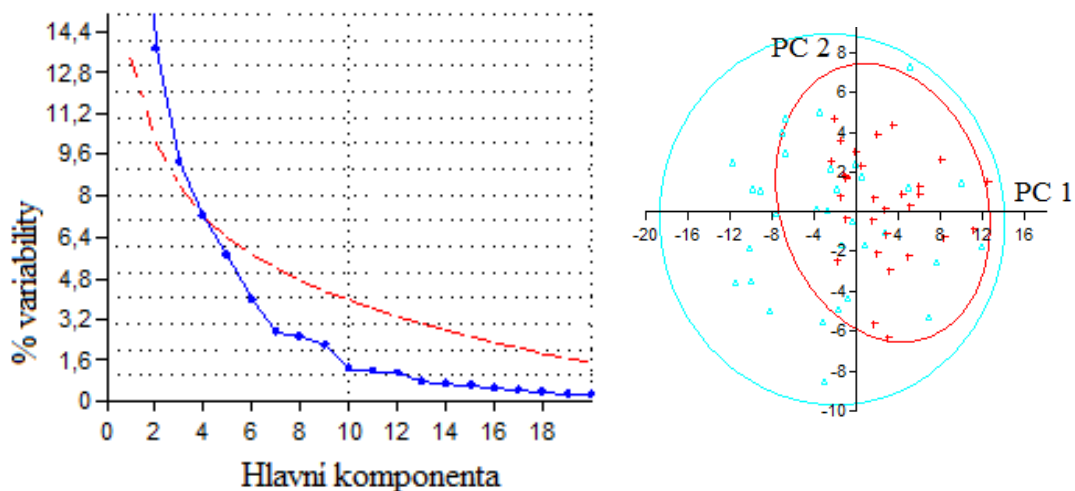
Graf 6: PCA tvaru lebeční klenby. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



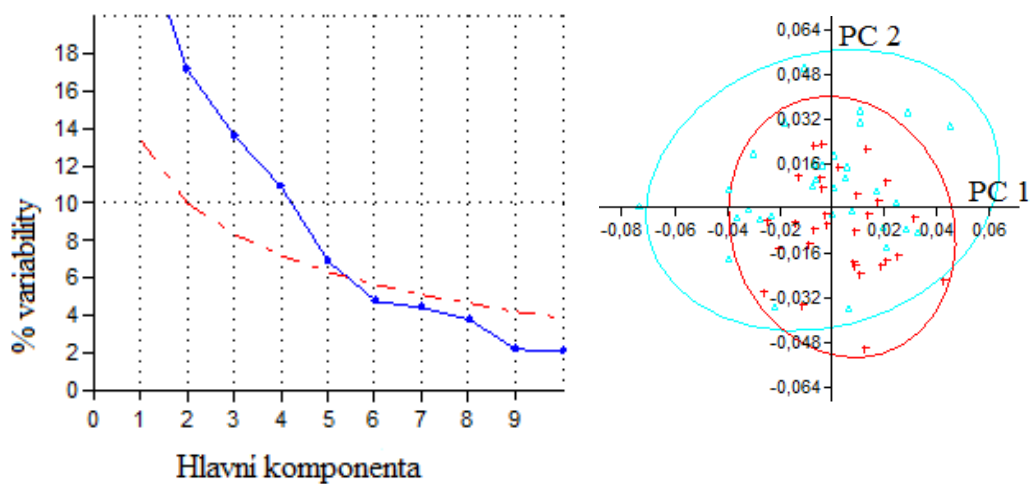
Graf 7: PCA tvaru a velikosti oblasti nosu. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



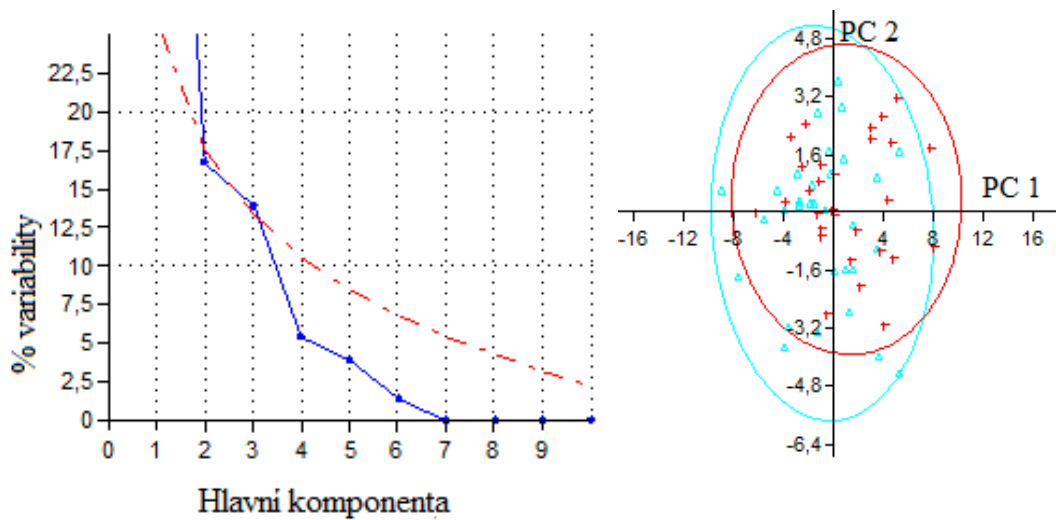
Graf 8: PCA tvaru oblasti nosu. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



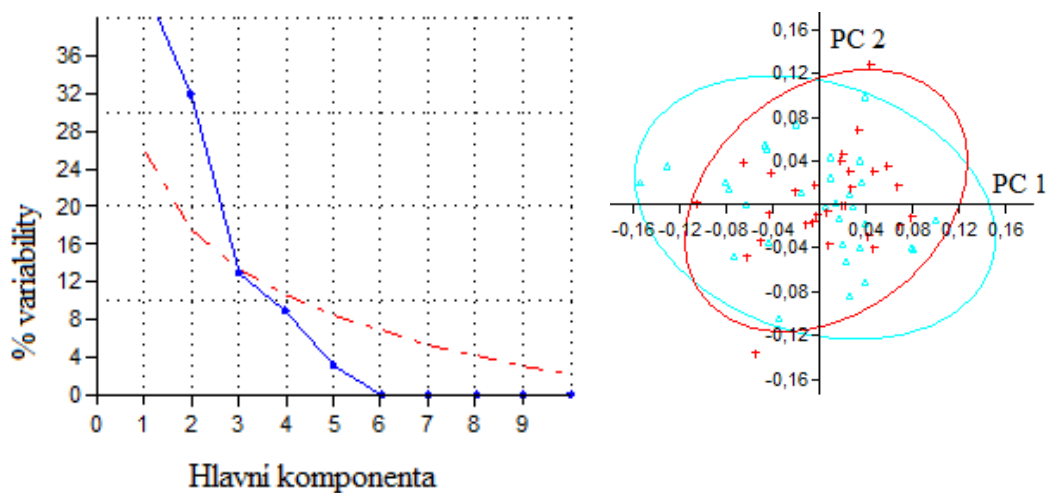
Graf 9: PCA tvaru a velikosti očnice. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



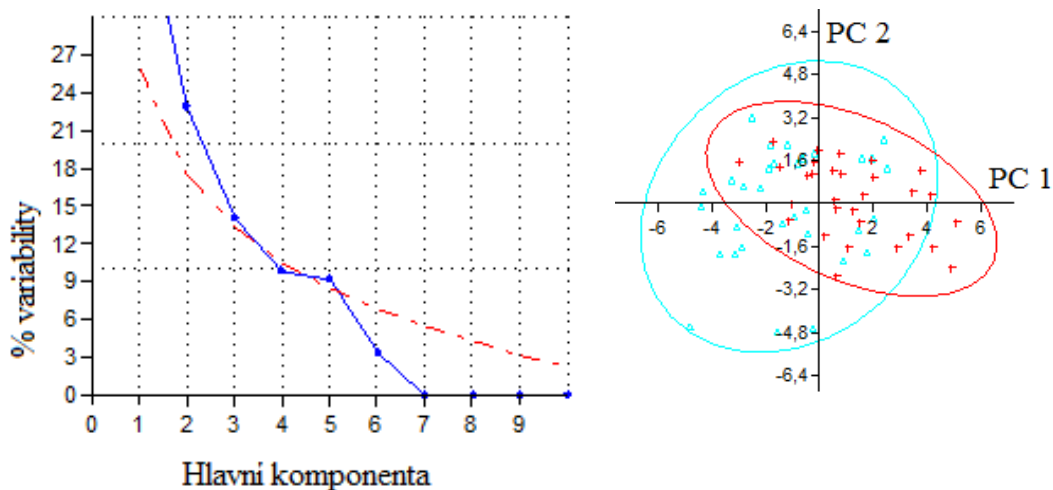
Graf 10: PCA tvaru očnice. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



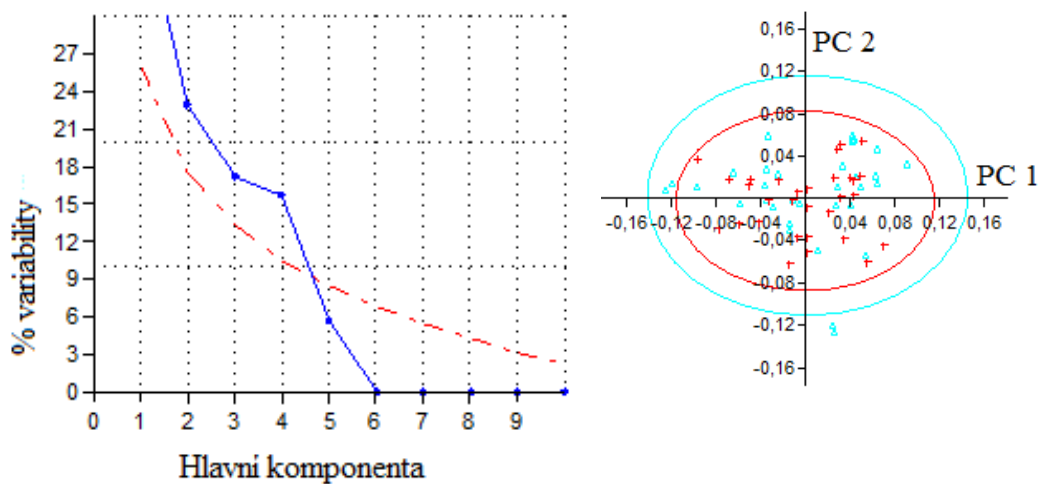
Graf 11: PCA velikosti a tvaru oblasti patra. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



Graf 12: PCA tvaru oblasti patra. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



Graf 13: PCA velikosti a tvaru týlního otvoru. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).



Graf 14: PCA tvaru týlního otvoru. Vlevo, scree plot příspěvku komponent k celkové variabilitě (modře) s vyobrazenou broken stick (červeně). Vpravo, rozdělení jedinců podle první (osa x) a druhé (osa y) komponenty (červeně ženy a modře muži).