

MARIE JANDOVÁ – IVANA ŠPLÍCHALOVÁ – PETRA URBANOVÁ

## APLIKACE METOD VIRTUÁLNÍ ANTHROPOLOGIE PŘI URČOVÁNÍ POHLAVÍ U FRAGMENTÁRNÍCH KOSTERNÍCH NÁLEZŮ

Restaurování a rekonstrukce fragmentárních kosterních nálezů v digitálním prostředí počítače snižuje míru poškození nebo narušení původní podstaty nálezu oproti tradičním metodám rekonstrukce. Cílem tohoto příspěvku je optimalizovat metodiku virtuální anatomické restaurace fragmentárních lebek do celistvého trojrozměrného digitálního modelu a prozkoumat vliv virtuálních postupů na určení pohlaví na lebce. Prostřednictvím 3D laserového skeneru bylo do počítače převedeno 268 zlomků lidských lebek. Pro určení pohlaví na vytvořených 3D modelech byly zvoleny tradiční morfoskopické metody a osteometrické metody s počítačovou podporou. Testovány byly programy FORDISC 3.0, 3D-ID a COLIPR 1.0. Spolehlivost pohlavní diagnózy na lebce byla hodnocena ve vztahu k určení pohlaví podle pánve. Bylo zjištěno, že morfoskopické metody vykazují vyšší shodu s určením pohlaví na pánvi než osteometrické metody. Tento rozdíl je patrnější u lebek restaurovaných, kde je spolehlivost určení pohlaví snižována nejenom využitím populačně specifických metod, ale také nekompletností zachovalého materiálu a mírou poškození původního nálezu.

fragmentární kosterní nálezy – určení pohlaví na lebce – virtuální antropologie – virtuální restaurace

**Application of methods of virtual anthropology for sex assessment in fragmented skeletal remains.** In contrast to traditional techniques, the restoration and reconstruction of fragmented skeletal remains in a digital environment is considered far less destructive and invasive to the original skeletal remains. The present study aimed to outline an optimized approach to the virtual anatomical restoration of fragmented human skulls. In addition, it aimed to examine the applicability of currently available sex determination methods in virtually restored skulls. The studied sample consisted of 268 cranial fragments which were digitized using a 3D Next Engine laser scanner and restored with Amira software functionalities. Of the various sex determination methods, traditional visual assessment and computer-aided osteometric techniques performed by the FORDISC 3.0, 3D-ID 1.0, and COLIPR 1.0 programs were tested. When confronted with sex diagnoses based on pelvic bones, the results showed that sex diagnoses from virtual skulls were more reliable if based on visual assessment rather than on computer-aided osteometric approaches, where the population-specificity of applied algorithms combined with the incompleteness and poorer preservation of restored skulls affected the final reliability rates.

fragmented skeletal remains – sex determination in human skull – virtual anthropology – virtual restoration

---

## 1. Úvod

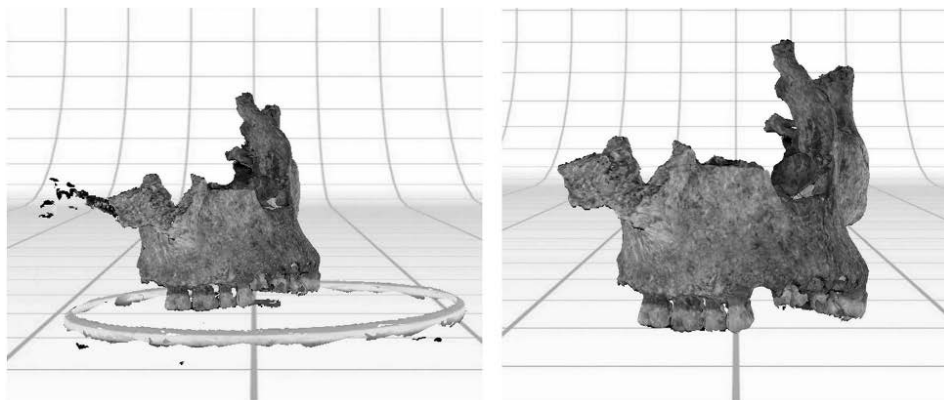
Lidské kosterní pozůstatky z archeologických lokalit se často nalézají ve fragmentárním stavu a jejich kompletace (restaurace nebo rekonstrukce) je nezbytným předpokladem dalšího zkoumání (Gunz *et al.* 2009). Ve fyzické (kosterní) antropologii se zlomkovité a poškozené nálezy tradičně kompletují lepením komerčně dostupnými lepidly, nataveným voskem nebo nanesením rychle tuhnoucího silikonu. Chybějící části jsou nahrazovány sádrovou výplní nebo deformovatelnými plasty. Tradiční kompletační techniky jsou však metody invazivní, zasahující do integrity původního nálezu, do jeho materiálového složení i morfologie. Ve většině případů je tento zásah nevratný, což znesnadňuje revize restauračního procesu i samotné interpretace nálezu.

Od 90. let minulého století se v kontextu fyzické antropologie začaly využívat moderní zobrazovací a záznamové techniky (např. 3D optický nebo laserový skener, výpočetní tomografie), které dokáží bezkontaktně převést fyzický objekt (kost, kosterní fragment) do podoby digitální kopie zobrazitelné ve virtuálním prostředí počítače. Oblast antropologie, jež studuje výlučně virtuální zástupce reálných kostí, se označuje jako virtuální antropologie (Becket – Conlogue 2010, 20–22; Weber – Bookstein 2011, 2).

Mezi hlavní výhody virtuální antropologie patří bezkontaktnost, neinvazivnost a nedestruktivnost těchto postupů. Manipulace s původními fyzickými nálezy je omezena na pouhý kontakt s objektem během digitalizace. Další interakce (prohlížení, posunování, zvětšování, měření atd.) je realizována výhradně v prostředí počítače. Tím se výrazně zkracuje časový interval, ve kterém může dojít k poškození studovaného nálezu. Absence gravitace a jiných fyzikálních zákonů v digitálním prostředí umožňuje s virtuálními modely pracovat nad omezení reálného světa. S modely lze libovolně manipulovat, proporčně upravovat, deformovat (Arbour – Currie 2012), klonovat či vzájemně sdílet (Weber 2001).

Digitálně-kompletačními postupy se ve virtuální antropologii rozumí virtuální restaurace a virtuální rekonstrukce. Oba postupy vracejí kosti převedené do digitálního prostředí původní tvar, konfiguraci a topografickou polohu. Virtuální restaurace je postup kompletující nález pouze z dochovaných částí nálezu, a to pouhým přikládáním modelů k sobě. Virtuální rekonstrukce nahrazuje chybějící části nálezu a napravuje morfologické změny za účelem nastolení původního tvaru kosti. Jednou z častých tvarových změn kosterních nálezů je deformace způsobená tafonomickými procesy (Jurda *et al.* 2013). Oba zmíněné virtuálně-kompletační jsou postupy reverzibilní, lze je kdykoli opakovat a současně vytvářet nekonečné množství rekonstrukčních a restauračních variant (Gunz *et al.* 2009; Weber – Bookstein 2011; White – Folkens 2005, 338).

Virtuální modely obecně rozšiřují studium kosterních nálezů o nové možnosti uplatnění antropologických metod. Toto rozšíření se týká především kvantitativních (metrických) postupů, u kterých digitální podstata modelů a moderní metodické trendy využívající počítačovou podporu zajišťují opakovatelnost a zvyšují spolehlivost použitých metodik i vlastní interpretace nálezu. V případě zlom-



Obr. 1. Model fragmentu horní čelisti z hrobu 38 s přidržující svorkou a podložkou před fází *trimming* (vlevo) a po fázi *trimming* (vpravo), provedeno v programu Next Engine Scan Studio HD.

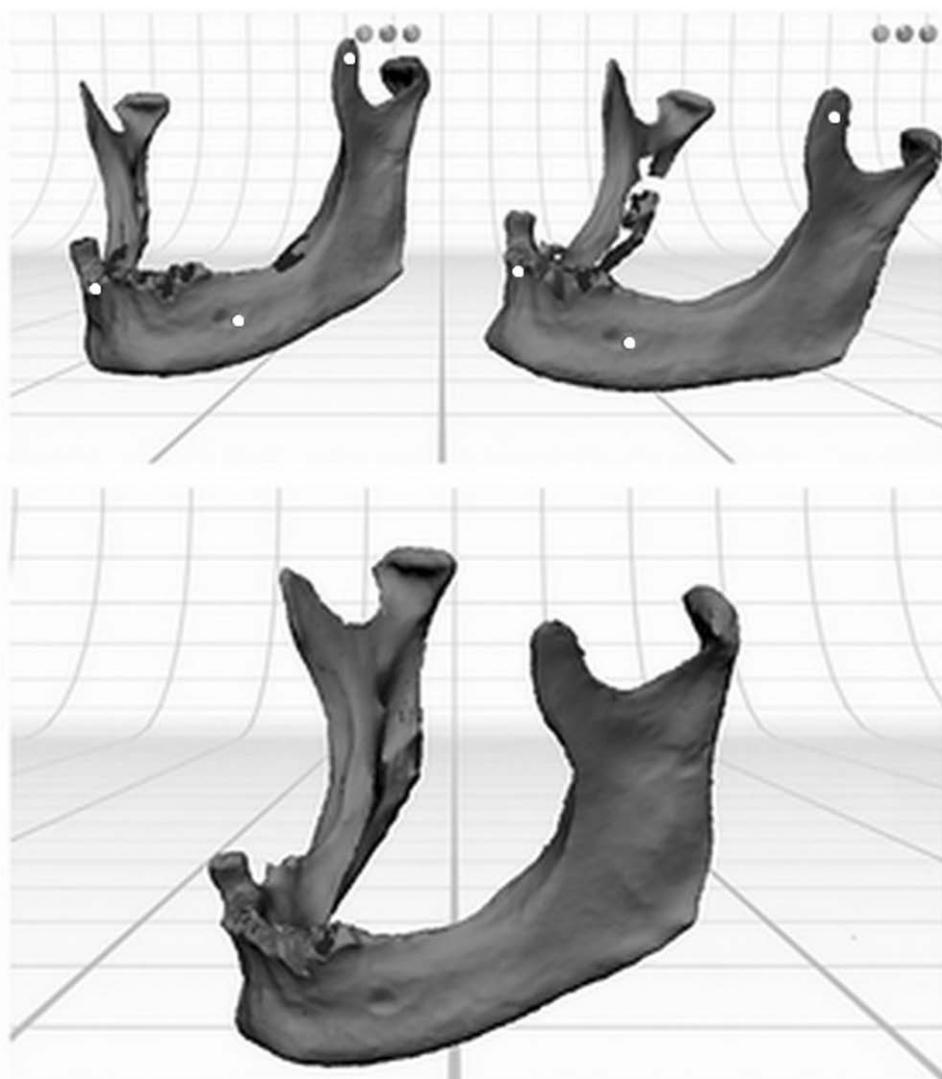
kovitých kosterních nálezů, které prošly virtuální restaurací nebo rekonstrukcí, se otevírají nové perspektivy studia tradičními i pokročilými metodami, jež by v opačném případě poskytly výsledky o výrazně nižší spolehlivosti, nebo by kvůli špatnému zachování nálezu nebyly vůbec použitelné (Grabherr et al. 2009; Decker et al. 2011; Luo et al. 2013; Chapman et al. 2014).

Určení pohlaví na základě studia virtuálních modelů lebky využívá stejné biologické principy jako určení pohlaví na fyzických kostech. Pohlaví je určeno na základě fenotypových projevů sexuálního dimorfismu na kostře (Acsádi – Nemeskéri 1970). Kvalitativní (nemetrické, aspektivní, morfoskopické) metody určení pohlaví se opírají o hodnocení stupně rozvoje jednotlivých pohlavně odlišných znaků, o jejich morfologický projev, případně jejich přítomnost nebo absenci (Walrath et al. 2004). V tomto ohledu se hodnocení morfoskopických znaků ve virtuálním prostředí neodlišuje od reálného světa. Modely jsou hodnoceny aspektivně zobrazením a manipulací ve vhodném počítačovém rozhraní (jednoduchý prohlížeč jako 3D Acrobat Reader nebo pracovní prostředí programu pro zobrazení a editaci modelů MeshLab, Amira, GOM Inspect apod.). Jediný rozdíl se týká znaků, u kterých významnou nebo pomocnou roli hraje hodnocení hmatem. Palpace virtuálního kostního reliéfu je možná pouze za pomoci pokročilých polohovacích zařízení, které zprostředkují interakci a zpětnou vazbu mezi modelem a hodnotitelem. Takovým zařízením je například virtuální rukavice s hmatovými čidly (Urbanová et al. 2010).

Kvantitativní (osteometrické) metody pro určení pohlaví na kostře využívají pohlavně dimorfní rozměry kostních struktur (Buikstra – Ubelaker 1994). Měření ve virtuálním prostředí je specifické a metodicky více odlišné od reálného měření. Vzdálenosti dvou bodů, které definují rozměr na kosti, jsou obvykle určeny ve vztahu k základním tělesným osám nebo jiným orientačním strukturám na kosti. Ve virtuálním prostředí je proto výhodnější zaznamenat kartézské  $x$ ,  $y$ ,

z souřadnice těchto bodů a z nich v případě potřeby jednoduchými geometrickými pravidly vypočítat požadované lineární nebo úhlové rozměry.

Většina současných osteometrických metod pro určení pohlaví na kostře je založena na statistických, obvykle diskriminačních modelech. Sestavit diskriminační model je výpočetně náročný úkon, který rutinní hodnocení kosterních nálezů zpomaluje. V současnosti je k dispozici několik počítačových aplikací, které celý proces zjednoduší a urychlí. Nejrozšířenější z nich je program FORDISC (*Jantz*



Obr. 2. Model fragmentu dolní čelisti lebky z hrobu 69 před přiložením na sebe (nahore) (použity 3 referenční body, vyznačeny bíle) a po přiložení na sebe (dole); provedeno v programu Next Engine Scan Studio HD.

– Ousley 2005). Dále jsou k dispozici např. programy DSP (Murail et al. 2005), COLIPR (Urbanová – Králík 2008) nebo 3D-ID (Slice – Ross 2009). Program FORDISC (momentálně ve verzi 3.0) je komerční počítačová aplikace pro určení základních demografických vlastností kosterního nálezu (populační afinita, pohlaví a tělesná výška). Určení pohlaví je založeno na hodnocení tradičních rozměrů lebky v kontextu referenčních databází forenzních případů (*Forensic Data Bank Groups*) a Howellovy databáze lebečních rozměrů (Howells 1973). Program 3D-ID<sup>1</sup> využívá prostorová 3D data (kartézské souřadnice) standardních kraniometrických bodů, získaná mj. záznamem bodů na 3D virtuálních modelech v prostředí počítače. Tímto způsobem je metoda snadno kombinovatelná s virtuálními postupy, jako je virtuální restaurace. Maximální počet vstupních bodů pro určení pohlaví je 34 (13 párových, 8 nepárových). Minimální počet jsou 3 body. Podobně jako v případě programu FORDISC jsou vstupní metrické údaje srovnány s referenčními databázemi (3D databázemi kraniometrických bodů), jež jsou součástí aplikace. Program COLIPR (*Coordinate-based Legal Investigation Program*)<sup>2</sup> slouží k určení pohlaví na základě rozměrů lebky. Pohlavní diagnóza je založena na jedné ze sedmi diskriminačních rovnic kombinujících 17 lineárních a úhlových rozměrů počítaných automaticky z kartézských souřadnic 22 kraniometrických bodů. Tento způsob určení pohlaví lze také kombinovat s virtuálními postupy.

## 2. Cíl

Cílem této studie je optimalizovat metodiku pro vytvoření celistvých trojrozměrných virtuálních modelů lebek ze zlomkovitých kosterních nálezů a na jejich základě určit pohlaví jedinců. Současně se snaží zjistit spolehlivost tohoto určení s ohledem na provedenou restauraci a konfrontovat získané údaje s určením pohlaví na pánevních kostech.

## 3. Materiál

Studijní materiál se skládal z kosterních nálezů z lokality Dětkovice – „Za zahradama“ (okr. Prostějov), jejíž stáří je datováno do období od poloviny 11. století do poloviny 12. století (Fojtík 2010; k lokalitě srov. Fojtík – Šmíd 2008, 65–68). Během roku 2009 a 2010 zde bylo odkryto 122 hrobů, v létě roku 2013 pak přibylo dalších 10 hrobů. Z celkových 132 odkrytých hrobů byly zajištěny kosterní pozůstatky 129 jedinců (62 dospělých a 67 nedospělých).

Studovaný soubor zahrnoval 32 lebek, z toho 20 fragmentárních a 12 celých, přičemž u jedné z nich byla rozlomená dolní čelist. Celkem se jednalo o 268

<sup>1</sup> Jde o bezplatnou aplikaci, která je přístupná na webové stránce <http://www.3d-id.org>.

<sup>2</sup> Volně ke stažení na adrese <http://anthrop.sci.muni.cz/UserFiles/File/COLIPR/COLIPR%201.5.2.zip>.

kostí nebo fragmentů kostí. Průměrný počet úlomků na jednu lebku byl necelých 13 kusů. Poškozené lebky se skládaly početně v rozmezí od 2 do 21 fragmentů. Velikost nejmenších úlomků dosahovala rozměrů  $50 \times 30$  mm v oblasti klenby a  $22 \times 32$  mm v obličejové části lebky. Průměrná velikost úlomku byla  $88 \times 60$  mm (při vyřazení kompletních lebek a úlomků klenby v rozsahu celé mozkovny).

Ze souboru lebek z Dětkovic byly pro analýzu použity všechny lebky s charakterem úplně dochovaným (kompletní celistvá lebka), lehce (do 10 úlomků) a středně fragmentárním (do 21 úlomků).

## 4. Metody

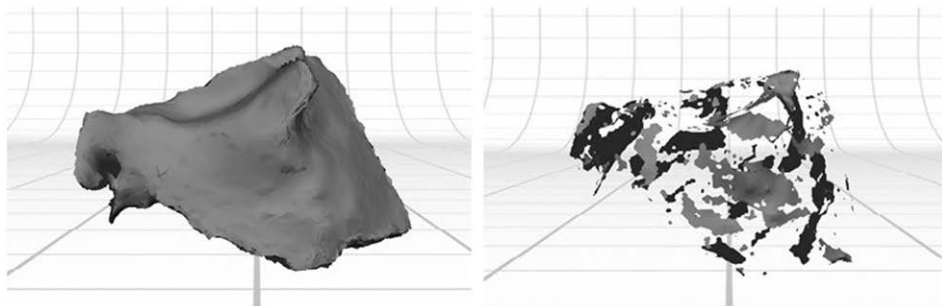
### 4.1. Digitalizace

Celé lebky a kostní zlomky byly do počítače převedeny 3D laserovým skenerem Next Engine v Laboratoři morfologie a forenzní antropologie Ústavu antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Ovládání skeneru Next Engine probíhá v programu Next Engine Scan Studio HD. Úlomek kosti je skenován, zatímco se otáčí okolo vlastní osy o  $360^\circ$  v předem určeném počtu poloh. Pro účely této studie byly intervaly mezi polohami nastaveny na hodnoty 10 pro ploché úlomky a 16 pro členité úlomky. Jelikož je skener schopen zaznamenat pouze povrch kolmý ke zdroji laserového paprsku, každý úlomek bylo nutno digitalizovat minimálně dvakrát v různých polohách tak, aby žádná část povrchu virtuálního úlomku nechyběla. Použitý laserový skener vykazuje technická omezení, která brání jeho využití u velmi malých úlomků. V těchto případech je rozlišení skeneru nedostačující a výsledné skeny nedosahují uspokojivé kvality. Velmi malé zlomky lebek byly proto vyřazeny z dalšího zpracování. V průměru bylo digitalizováno přibližně 90 % kostní hmoty vybraných lebek.

### 4.2 Fáze post-processing

Po digitalizaci úlomku byly v programu Next Engine Scan Studio HD skeny, tj. záznamy získané jedním sejmutím, každého úlomku upraveny tak, aby nezaahrnovaly pozadí nebo nežádoucí šum, např. svorky držáku upevňující zlomek při skenování (obr. 1). Skeny byly superponovány, aby se navzájem doplňovaly (obr. 2), a v poslední fázi sjednoceny do jedné celistvé (tzv. polygonové) sítě. U velmi malých či tenkých úlomků pozměnila fáze sjednocení morfologii úlomku. To je dané explicitně nastaveným algoritmem pro fúzi polygonálních sítí v programu Next Engine Scan Studio HD, který se nedokáže vyrovnat s drobnými prostorovými a tvarovými odchylkami v jednotlivých skenech virtuálního modelu. Výsledek pak ztrácí informaci o geometrii, obsaženou v původních skenech (obr. 3). Z tohoto důvodu byly skeny drobných úlomků převedeny na mraky bodů a fáze





Obr. 3. Model fragmentu před fází sjednocení (vlevo) a po ní (vpravo). Během sjednocení došlo k podstatné ztrátě informací o povrchu úlomku (program Next Engine Scan Studio HD).

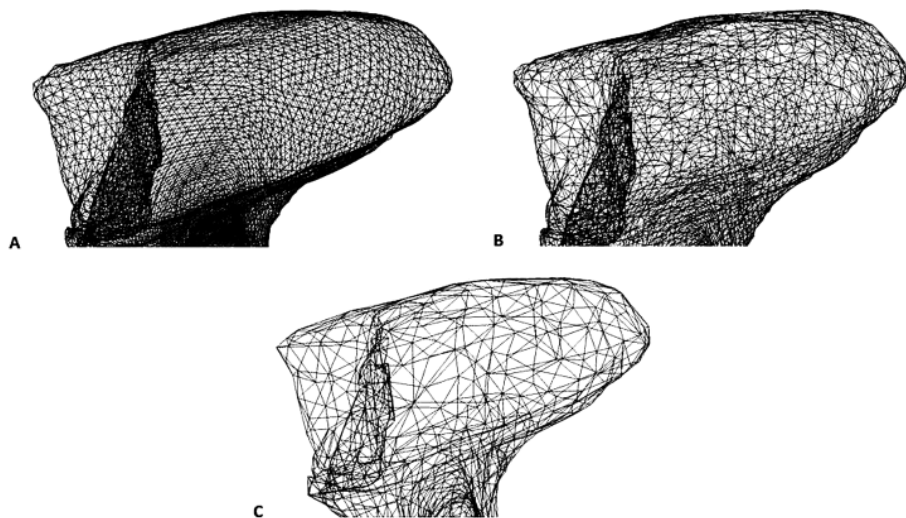
sjednocení byla provedena v programu GOM Inspect ([www.gom.com](http://www.gom.com)) re-polygonizací na polygonovou síť.

I přes snahu zachytit maximální povrch fragmentů nebyl proces skenování dokonalý a na povrchu modelu vznikaly drobné nepřesnosti, obvykle v podobě děr nebo izolovaných polygonů. Nespojené izolované polygony zbytečně navyšují datovou velikost modelu. Tento šum byl odstraněn v programu Rhinoceros ([www.rhino3d.com](http://www.rhino3d.com)). Ostatní nedostatky v geometrii modelu byly odstraněny dalšími úpravami v programu GOM Inspect.

Různé nastavení počtu intervalů mezi polohami snímání a různá vzdálenost od zdroje laserových paprsků při skenování způsobila, že virtuální modely malých a větších zlomků se lišily v hustotě a velikosti polygonů. Odlišnosti tohoto typu byly odstraněny redukcí polygonů v síti modelů v programu Amira ([www.amira.com](http://www.amira.com)). Na základě tvaru a velikosti modelu úlomku byly navrženy optimální kategorie počtu polygonů pro následnou redukci (tab. 1; obr. 4). Návrh kategorií je kompromisem mezi přesností zachycené morfologie modelu a jeho datovou velikostí, která nebude bránit snadné manipulaci v počítačovém prostředí při standardním počítačovém vybavení (RAM 6 GB). V případě, že se po redukcí modelu objevily nespojené polygony, byly podobně jako v předchozích krocích odstraněny v programu Rhinoceros.

Součet vrcholů ( <i>vertex count</i> )	Fragment kosti/kost
850 000 – 900 000	celá lebka nerestaurovaná
500 000	čelisti, kost spánková a kost čelní (s očními)
350 000	ploché kosti klenby
150 000	drobné kosti (kost lícní, <i>pars basilaris</i> kosti týlní aj.)

Tab. 1. Optimalizované množství polygonů podle tvaru a velikosti fragmentu, kdy je stále zachována morfologická kvalita úlomku. Úlomky kostí byly redukovány podle poměru ke kosterním fragmentům s uvedenou redukcí.



Obr. 4. Vizualizace změny v počtu polygonů na základě optimalizovaných skupin. Detail pravého kondylárního výběžku dolní čelisti z hrobu 41: A) bez redukce, kdy je počet VC (vertex count) po vyplnění děr 887 667; B) po optimální redukci dle tab. 1, tedy 2x zmenšena (počet VC je 443 805) a C) po nevhodné redukci (zmenšena 16x na počet VC 55 458).

### 4.3. Virtuální restaurace

Modely úlomků patřící k jedné lebce byly kompletovány virtuální anatomicou restaurací v programu Amira. Kompletace zahrnovala posun a otočení modelů. Vodítkem správné polohy virtuálních fragmentů byla celková morfologie modelu a zaznamenaných detailů jeho povrchu (otisky cév na endokraniálním povrchu klenby lebky, průběh švů, morfologie okrajů modelu apod.). Při sestavování lebek došlo k další redukci celkového počtu fragmentů, které bylo možné využít pro virtuální restauraci. Virtuální zlomky, u kterých nebyly zřetelné styčné plochy nebo jejich topografická pozice na lebce nemohla být přesně určena, byly z dalšího procesu komplementace vyřazeny. Výsledné restaurované modely byly exportovány v programu Rhinoceros jako jeden datový soubor ve formátech „stl“, „ply“ a „pdf“.

### 4.4. Digitalizace antropometrických bodů

Záznam morfometrických dat popisujících velikost a tvar objektu je základním předpokladem pro určení pohlaví metrickými metodami. Tyto údaje byly získány digitalizací 49 kraniometrických bodů v programu Landmark<sup>3</sup> (tab. 2; obr. 5).

<sup>3</sup> Volně ke stažení na adrese <http://graphics.idav.ucdavis.edu/research/projects/EvoMorph>.

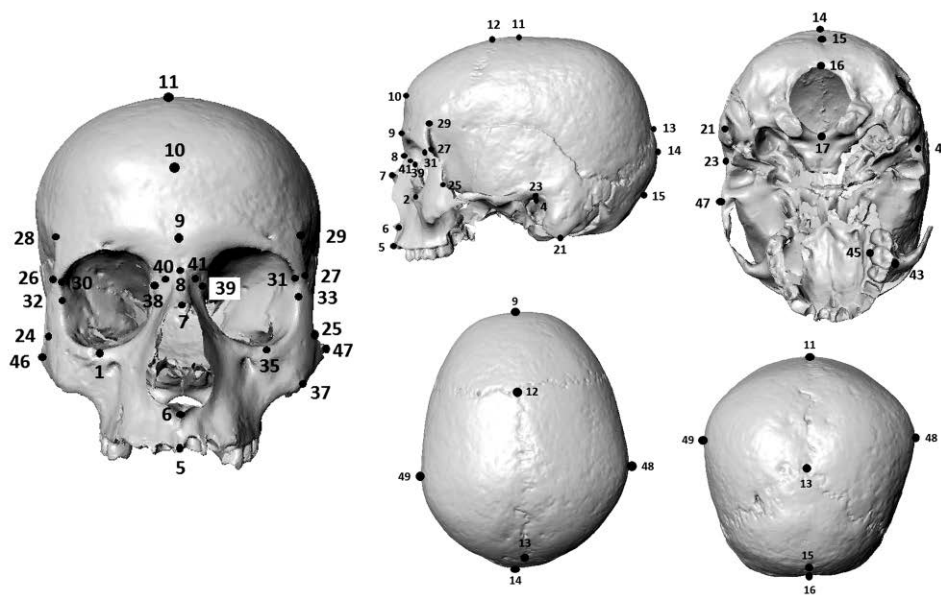


Během digitalizace byla využita funkce nastavení tělních os a rovin (Frankfurtská horizontála, mediosagitální rovina, frontální rovina). Tato funkce usnadňuje správné umístění těch bodů, jež jsou definovány s ohledem na základní anatomické postavení lebky. U jedné lebky zcela chyběl faciální skelet i spánkové kosti, nebyly u ní proto digitalizovány antropometrické body a následně nebyla zahrnuta do dalšího zpracování.

Číslo bodu	Název bodu	Definice bodu
1 <i>dx.</i> , 2 <i>sin.</i>	orbitale	nejníže položený bod dolního okraje očníce
3 <i>dx.</i> , 4 <i>sin.</i>	porion	bod na horním okraji vnějšího zvukovodu nad jeho středem
5	prosthion	bod nejvíce vpředu na nejnižším místě alveolárního výběžku horní čelisti v mediánní rovině
6	nasospinale	bod na styku mediánní roviny se spojnicí dvou nejniže položených bodů na dolním okraji hruškovitého otvoru
7	rhinion	bod na <i>sutura internasalis</i> na dolním okraji kostí nosních
8	nasion	průsečík <i>sutura frontonasalis</i> s mediánní rovinou
9	glabella	individuálně silně zvýšené místo v dolní části kosti čelní v mediánní rovině
10	metopion	bod v průsečíku mediánní roviny a spojnice mezi vrcholy čelních hrbolů
11	vertex	nejvyšší bod na klenbě lební v mediánní rovině na lebce orientované ve Frankfurtské horizontále
12	bregma	bod v průsečíku věčitého a šípového švu
13	lambda	bod v průsečíku šípového a lambdového švu
14	opistocranion	nejvíce vzadu položený bod na lebce v mediánní rovině
15	inion	bod v průsečíku mediánní roviny se spojnicí obou <i>linae superiores</i> na šupině kosti týlní
16	opisthion	bod v místě styku mediánní roviny a zadního okraje velkého týlního otvoru
17	basion	bod ve styku předního okraje velkého týlního otvoru s mediánní rovinou
18 <i>dx.</i> , 19 <i>sin.</i>	asterion	bod v místě styku lambdového, occipitomastoideálního a parietomastoideálního švu
20 <i>dx.</i> , 21 <i>sin.</i>	mastoideale	nejnižší bod hrotu bradavčitého výběžku kosti spánkové
22 <i>dx.</i> , 23 <i>sin.</i>	auriculare	bod na jařmovém výběžku kosti spánkové kolmo nad středem vnějšího zvukovodu
24 <i>dx.</i> , 25 <i>sin.</i>	jugale	bod na vrcholu úhlu, který svírá zadní hrana čelního výběžku kosti lícní a horní hrana spánkového výběžku kosti lícní
26 <i>dx.</i> , 27 <i>sin.</i>	frontomalare temporale	nejlaterálnější bod na <i>sutura frontozygomatica</i>
28 <i>dx.</i> , 29 <i>sin.</i>	frontotemporale	body na spánkových liniích čelní kosti nejbliže mediánní rovině
30 <i>dx.</i> , 31 <i>sin.</i>	frontomalare orbitale	bod styku <i>sutura zygomaticofrontalis</i> a laterálního okraje očníce

Číslo bodu	Název bodu	Definice bodu
32 dx., 33 sin.	ectoconchion	bod na laterálních hranách očnice v místě, kde jej protíná rovnoběžka horního okraje očnice vycházející z bodu maxillofrontale (v tabulce níže)
34 dx., 35 sin.	zygoorbitale	nejvýše položený bod v sutura zygomaticomaxillaris
36 dx., 37 sin.	zygomaxillare	nejníže položený bod sutura zygomaticomaxillaris
38 dx., 39 sin.	dacryon	bod v místě styku sutura frontomaxillaris, sutura frontolacrimalis a sutura lacrimomaxillaris
40 dx., 41 sin.	maxillofrontale	bod v průsečíku sutura frontomaxillaris a vnitřního okraje očnice (crista lacrimalis anterior kosti slzní)
42 dx., 43 sin.	ectomolare	nejlaterálnější bod alveolárního výběžku horní čelisti
44 dx., 45 sin.	endomolare	střed vnitřního alveolárního výběžku horní čelisti nad druhou horní stoličkou
46 dx., 47 sin.	zygion	nejlaterálnější bod jařmového oblouku
48 dx., 49 sin.	euryon	nejlaterálnější bod mozkovny

Tab. 2. Seznam a definice významných bodů popisujících morfologii lebky (obr. 5) podle Fettera et al. (1967) a Knusssmanna (1988).



Obr. 5. Digitalizované kranio-metrické body podle definic v tab. 2.

#### 4.5. Určení pohlaví

Pro určení pohlaví na 31 lebkách pomocí osteometrických metod byly využity počítačové programy FORDISC 3.0.279 (Jantz – Ousley 2005), COLIPR

1.0 (*Urbanová – Králík 2008*) a 3D-ID 1.0 (*Slice – Ross 2009*). V programu *FORDISC 3* byla analýza založena na srovnání s evropskými populacemi z *FDB* (*Forensic Data Bank*) a *Howellsovy* databáze. Diskriminační analýza pro určení pohlaví byla provedena na základě 21 rozměrů vypočítaných z hodnot kartézských souřadnic koncových bodů rozměrů. V programu *COLIPR* byly zvoleny diskriminační rovnice vytvořené na základě studia českých dokumentovaných sbírek (volba „Praha“). Vzhledem k fragmentárnosti lebek byla nejčastěji použita rovnice 7, v některých případech také 4 a 2. Často však nebylo možné použít žádnou ze 7 typů rovnic, kvůli chybějícím bodům *zygion*. Při určení pohlaví byl proto program *COLIPR* využit pouze u 7 jedinců.

U každé virtuální lebky bylo následně zhodnoceno 8 morfoskopických znaků (*processus mastoideus*, reliéf *planum nuchae*, *glabella*, *processus zygomaticus*, *arcus superciliaris*, *os zygomaticum*, *prognatio arcus alveolaris* a *inclinatio frontale*) podle metody *D. E. Walrath et al. (2004)*. Definice metody přiděluje každému znaku číselnou váhu hodnoty od 1 do 3. Suma součinnů rozvoje znaku a jeho váhy určuje index sexualizace. Kladná hodnota indexu sexualizace odkazuje na mužské pohlaví, záporná hodnota odkazuje na pohlaví ženské. Lebky, jejichž výsledné ohodnocení se pohybovalo v rozmezí -0,2 až 0,2, byly považovány za nejednoznačně určené.

Protože určení pohlaví na pánvi nebo pánevních kostech má obecně vyšší míru přesnosti a spolehlivosti než pohlavní diagnóza založená na hodnocení znaků na lebce (*Acsádi – Nemeskéri 1970; Krogman 1986; Buikstra – Ubelaker 1994*), byla pohlavní diagnóza na lebce konfrontována s určením pohlaví na pánevních kostech podle programu *DSP (Murail et al. 2005)* a aspektivního hodnocení podle metody *J. Brůžka (2002)*.

#### 4.6. Statistické zpracování

Míra shody mezi určením pohlaví na lebce a na pánvi byla získána na základě výpočtu hodnoty *Cohenovy kappy*, která určuje míru shody mezi dvěma sadami dat (dvě pohlavní diagnózy, dva hodnotitelé apod.). V případě úplné shody nabývá koeficient *Cohenovy kappy* hodnoty jedna, naopak pokud počet shod odpovídá počtu náhodných shod, je tento koeficient roven nule. Ve výjimečných případech, kdy je shoda menší než očekávaná, má tento koeficient negativní hodnotu. Hodnoty menší než 0,21 ukazují na nízkou shodu, hodnoty 0,21–0,40 na mírnou shodu a hodnoty v rozmezí 0,41–0,60 pak na shodu průměrnou. Naopak hodnoty 0,61–0,80 značí značnou shodu a hodnoty v rozsahu 0,81–1,00 téměř perfektní shodu (*Landis – Koch 1977*). U tří jedinců nebylo k porovnání přistoupeno: jedna z restaurovaných lebek patřila nedospělému jedinci (14–15 let), k dalším dvěma lebkám nebyla pánev k dispozici (tab. 3).

Číslo hrobu	Věk	FDB	Howells	3D-ID	Aspektivní hodnocení	Výsledné hodnocení podle lebky	Podle páneve
1	14–15	žena	žena	žena	žena	žena	nedospělý
5	40–60	žena	žena	žena	žena	žena	žena
12	40–60	žena	žena	žena	neurčité	žena	spíše muž
18	35–55	muž	muž	muž	muž	muž	muž
34	neurčen	žena	žena	žena	muž	žena	muž
36	38–50	žena	žena	žena	žena	žena	žena
38	30–40	muž	muž	muž	muž	muž	muž
41	19–21	žena	žena	žena	žena	žena	žena
42	40–60	žena	žena	muž	žena	žena	žena
56	neurčen	muž	muž	žena	muž	muž	muž
64	40–60	muž	muž	žena	muž	muž	muž
66	neurčen	žena	žena	žena	žena	žena	chybějící pánev
68	35–50	žena	žena	žena	žena	žena	neurčité
69	45–60	muž	žena	muž	muž	muž	muž
72	30–38	žena	žena	žena	žena	žena	žena
76	18–29	žena	žena	žena	žena	žena	žena
79	35–55	muž	muž	žena	muž	muž	muž
82	neurčen	muž	muž	žena	muž	muž	chybějící pánev
83	27–50	žena	žena	žena	žena	žena	žena
84	35–55	muž	muž	muž	muž	muž	muž
85	38–65	muž	muž	muž	žena	muž	spíše žena
88	30–50	žena	žena	žena	žena	žena	žena
93	19–29	žena	žena	muž	žena	žena	muž
98	45–60	muž	muž	muž	muž	muž	muž
101	35–55	žena	žena	žena	žena	žena	žena
113	30–38	žena	žena	muž	žena	žena	žena
115	45–65	muž	muž	žena	muž	muž	muž
116	40–60	žena	žena	žena	neurčité	žena	neurčité
117	50–65	muž	muž	muž	neurčité	muž	žena
121	40–60	muž	muž	žena	muž	muž	muž
131	30–40	žena	žena	žena	žena	žena	žena

Tab. 3. Výsledky určení pohlaví podle jednotlivých metod.

Pro aspektivní hodnocení byla Cohenova kappa určena také mezi dvěma hodnotiteli. Tato shoda byla rovněž vyčíslena procentuálně. Rozdíly ve spolehlivosti metody byly dále testovány s ohledem na zachovalost nálezu (restaurované versus nerestaurované lebky). Rozdíly mezi hodnotami 21 kranio-metrických rozměrů (tab. 4) měřenými dvěma hodnotiteli byly testovány párovým t-testem na 5% hladině významnosti. Vliv zachovalosti na hodnoty kranio-metrických rozměrů byl testován na 8 rozměrech (*glabella – opistocranion*, *euryon – euryon*, *nasion – prostion*, *frontotemporale – frontotemporale*, *frontomalare temporale – fronto-*

*malare temporale*, *nasion – nasospinale*, *nasion – bregma* a *bregma – lambda*) u 14 lebek (5 rekonstruovaných a 9 celých) a také na základě rozdílů mezi hodnotiteli. Při testování bylo přistoupeno k neparametrické alternativě a byl využit Wilcoxonův párový test pro závislé vzorky.

Rozměry	N	T	p
<i>asterion – asterion</i>	25	–	–
<i>auriculare – auriculare</i>	27	–	–
<i>basion – bregma</i>	21	–	–
<i>basion – nasion</i>	18		–
<i>basion – opisthion</i>	15	7,41	0
<i>basion – prostion</i>	15	-3,28	0,005
<i>bregma – lambda</i>	30	–	–
<i>dacryon – dacryon</i>	14	-3,11	0,008
<i>dacryon – ectoconchion</i>	14	8,94	0
<i>ectoconchion – ectoconchion</i>	22	-3,76	0,001
<i>ectomolare – ectomolare</i>	12	–	–
<i>euryon – euryon</i>	28	-7,62	0
<i>frontomolare temporale – frontomolare temporale</i>	26	–	–
<i>frontotemporale – frontotemporale</i>	29	–	–
<i>glabela – opistocranion</i>	30	–	–
<i>lambda – opisthion</i>	19	–	–
<i>nasion – bregma</i>	25	–	–
<i>nasion – nasospinale</i>	20	–	–
<i>nasion – prostion</i>	16	-2,27	0,031
<i>zygion – zygion</i>	3	–	–
<i>zygoorbitale – zygoorbitale</i>	6	–	–

Tab. 4. Porovnávané rozměry mezi dvěma hodnotiteli a výsledky párového t-testu pro statisticky významně se odlišující rozměry („–“ rozdily hodnot nejsou statisticky významné). N – počet lebek, u kterých byl rozměr měřen u obou hodnotitelů, T – hodnota testové statistiky, p – hladina významnosti testu.

## 5. Výsledky

### 5.1. Optimalizace virtuální restaurace kosterních nálezů

Základním předpokladem virtuální restaurace je správná a pečlivá příprava virtuálních fragmentů. Celistvé modely mohou být vytvořeny pouze tehdy, jsou-li jednotlivé fragmenty bez chyb a děr. Před vlastní komplementací je proto nezbytná důkladná kontrola a úprava virtuálních zlomků, obvykle s použitím funkcí v několika programech tak, aby geometrie, rozlišení a celistvost všech částí byla shodná nebo srovnatelná. Na základě našich zkušeností je nejvhodnějším volně dostupným programem pro tyto účely program GOM Inspect.

Samotná virtuální restaurace fragmentů jedné lebky (přibližně o 13 úlomcích) zabere 5–6 hodin práce ve virtuálním prostředí. Jako nejvhodnější a časově nejméně náročný způsob je postupné přikládání modelů k jednomu hlavnímu modelu směrem od shora dolů. Za hlavní model bylo vhodnější zvolit největší fragment klenby lebky, ideálně fragment kosti čelní nebo kosti temenní. Modely obličejových úlomků byly připojovány až k restaurované části mozkovny lebky. Například model lící kosti se lépe přikládal až tehdy, měly-li úlomky kosti čelní a kosti spánkové již určenou pozici. Posledním krokem virtuální restaurace bylo připojení dolní čelisti. Obě hlavice kloubních výběžků dolní čelisti musí správně zapadat do kloubní jamky kosti spánkové a současně vytvářet s horním dentálním obloukem původní zubní skus. Pro tyto účely je potřeba vymodelovat nebo simulovat přítomnost vazivově-chrupavčitého disku, který je u živého jedince mezi obě kosti vsunut.

### ***5.2. Určení pohlaví na virtuálních modelech lebek***

Z 31 studovaných lebek bylo pohlaví určeno u 18 lebek jako ženské a u 13 jako mužské (tab. 3). V 17 případech (55 %) se na výsledném pohlaví shodly všechny použité metody. Kombinací použitých metod bylo rozhodnuto o výsledném určení pohlaví na lebce, které se shodovalo s určením podle pánve u 21 z 28 jedinců (75 %). Ve čtyřech případech ze sedmi rozdílně určených však nebyla pohlavní diagnóza na pánevních kostech jednoznačná. Jednalo o dvě pánve (hrob 68 a 116), u kterých se určení nepřiklonilo k žádnému pohlaví, a o jednu pánev (hrob 12), u které bylo pohlaví určeno jako „spíše mužské“, což bylo v rozporu s určením na lebce. U čtvrtého jedince (hrob 85) se pak jednalo o lebku, která metrickými metodami na lebce byla zhodnocena jako mužská, aspektivně však jako ženská, přičemž na pánvi bylo pohlaví určeno jako „spíše ženské“.

Jednotlivé metody vykazovaly odlišné procento shody s určením na pánvi (tab. 5). Na základě hodnot koeficientu kappa mělo nejvyšší shodu s určením podle pánve aspektivní hodnocení ( $\kappa = 0,75$ ; 95% interval spolehlivosti 0,52–0,97). Hodnota koeficientu naznačuje silnou shodu mezi oběma metodami. Naopak slabá shoda s určením podle pánve byla zjištěna u výsledků získaných pomocí programu 3D-ID ( $\kappa = 0,15$ ; 95% interval spolehlivosti -0,22–0,53), kde se procento shodného výsledku blížilo k pravděpodobnosti náhodné shody. Program COLIPR byl využit pouze v sedmi případech, proto nebylo přistoupeno ke statistickému hodnocení výsledků. Shoda s určením podle pánve byla zjištěna u 4 z 6 určení podle lebky (66 %), v jednom případě pro porovnání nebyla pánev k dispozici.



Hodnocení podle lebky		Hodnocení podle pánve			Shoda mezi určením pohlaví	
		žena	muž	neurčeno	Cohenovo kappa ( $\kappa$ )	95% interval spolehlivosti
A	žena	11	3	2	0,61	0,31–0,91
	muž	2	10	0		
B	žena	11	4	2	0,53	0,21–0,86
	muž	2	9	0		
C	žena	9	7	2	0,15	-0,22–0,53
	muž	4	6	0		
D	žena	12	1	1	0,75	0,52–0,97
	muž	0	11	0		
	neurčeno	1	1	1		

Tab. 5. Výsledky určení pohlaví na lebce podle použitých metod v porovnání s určením na pánvi. A) Výsledky určení pohlaví s využitím FDB databáze programu FORDISC. Přímá shoda je 80,7%. B) Výsledky určení pohlaví s využitím Howellsovy databáze programu FORDISC. Přímá shoda je 76,9%. C) Výsledky určení pohlaví s využitím programu 3D-ID. Přímá shoda je 57,6%.

D) Výsledky určení pohlaví podle aspektivního hodnocení. Přímá shoda je 85,7%. Pokud byli z hodnocení vyřazeni jedinci s neurčeným (indiferentním) pohlavím ( $N = 4$ ), byla přímá shoda u aspektivního hodnocení 95,8% a Cohenovo kappa  $\kappa = 0,91$  (95% interval spolehlivosti 0,75–1).

Při srovnání aspektivního hodnocení pohlaví s určením na pánvi bylo zjištěno, že se pohlavní diagnóza odlišuje u čtyř jedinců, přičemž u jednoho bylo pohlaví určeno rozdílně a u tří jedinců bylo určení buď na lebce, nebo na pánvi, nejednoznačné (tab. 6). V případě, že nejednoznačně určení jedinci byli ze srovnání vynecháni, byla zjištěna vysoká míra shody ( $\kappa = 0,91$ ; 95% interval spolehlivosti 0,75–1).

Aspektivní hodnocení lebky		Hodnocení I.		
		žena	muž	neurčeno
Hodnocení II.	žena	13	1	3
	muž	1	7	0
	neurčeno	1	4	0

Tab. 6. Srovnání výsledků aspektivního určení pohlaví mezi dvěma hodnotiteli. Přímá shoda je 66,6%. Výsledky statistiky Cohenovo kappa:  $\kappa = 0,44$ ; 95% interval spolehlivosti (0,15–0,72). Pokud byli z hodnocení vyřazeni jedinci, jež hodnotitel určil jako indiferentní pohlaví ( $N = 8$ ), byla přímá shoda 90,9% a Cohenovo kappa:  $\kappa = 0,80$ ; 95% interval spolehlivosti (0,54–1).

Spolehlivost určení pohlaví na virtuálních modelech bylo dále hodnoceno nezávisle pro restaurované a nerestaurované kompletní lebky. U všech použitých metod byla Cohenova kappa vyšší u nerestaurovaných nálezů než u restaurovaných. Nejvyšší rozdíl ( $\kappa = 0,78$  a  $\kappa = 0,40$ ) byl zaznamenán u výsledků z programu FORDISC 3 s využitím Howellsovy databáze. S výjimkou výsledků srovnání určení podle pánve s výsledky podle 3D-ID však nebyla hodnota kappa nižší než 0,4.

Srovnání aspektivního hodnocení dvou různých hodnotitelů poskytlo průměrnou míru shody ( $\kappa = 0,44$ ; 95% interval spolehlivosti 0,15–0,72). Pokud byli ze srovnání vyřazeni jedinci s nejednoznačnou pohlavní diagnózou ( $N = 8$ ), byla výsledná shoda obou hodnocení určena jako vysoká ( $\kappa = 0,80$ ; 95% interval spolehlivosti 0,54–1,00).

U metrického hodnocení byly statisticky významné rozdíly zjištěny u 7 z 21 testovaných rozměrů (tab. 4). U zúženého vzorku testujícího rozdíl mezi rekonstruovanými a celými lebkami na základě rozdílů mezi hodnotiteli bylo zjištěno, že u celého vzorku se statisticky významně liší rozměry *euryon – euryon* ( $p = 0,001$ ) a *nasion – prosthion* ( $p = 0,003$ ). Zatímco u celých lebek byly prokázány statisticky významné rozdíly u rozměrů *euryon – euryon* ( $p = 0,007$ ), *nasion – prosthion* ( $p = 0,02$ ) a *nasion – nasospinale* ( $p = 0,02$ ), u lebek rekonstruovaných nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl.

## 6. Diskuse

### 6.1. Význam virtuální restaurace a rekonstrukce v kosterní antropologii

Virtuální restaurace fragmentárních kosterních nálezů patří nepochybně mezi moderní trendy současné kosterní antropologie, které přinášejí bezkontaktní formu vyšetření biologicky citlivého, ale i historicky cenného materiálu. Vedle nepopíratelného vědeckého přínosu však současně platí, že se jedná o proces časově, finančně i technicky náročný, který klade vysoké požadavky na přístrojové vybavení pracoviště, schopnosti a zkušenosti pracovníků.

Trojrozměrný model lebky kompletované virtuální restaurací, stejně jako lebka restaurovaná ve fyzickém světě, není kopií původní morfologie, ale pouze jeden z možných scénářů originálního tvaru. Tyto scénáře vznikají již přenosem fyzického nálezu do virtuálního prostředí, úpravou digitálního modelu i redukcí datové velikosti. Hlavní podíl na vzniku různých variant má pak vlastní skládání modelů fragmentů do mozaiky celé lebky.

Virtuálním modelům obvykle schází informace o barvě povrchu, tzv. textuře úlomku. Barva povrchu kostí je při fyzické restauraci důležitým vodítkem odkazujícím na komplementaritu fragmentů. Použitý 3D skener Next Engine je schopen zaznamenat texturu povrchu, ale její kvalita zdaleka nedosahuje rozlišení, kterou by virtuální postupy vyžadovaly. Zřetelnou nevýhodou virtuální restaurace je dále skutečnost, že v počítačovém prostředí se do sebe fragmenty zasouvají bez limitů fyzického světa a neustálá kontrola těchto průniků kompletaci časově velmi zpomaluje.

Jedním z významných kroků optimalizace virtuální restaurace archeologických kosterních nálezů je vhodné nastavení rozlišení virtuálních modelů. Při redukci polygonové sítě byl brán zřetel na to, aby se neztrácely informace o geometrii objektu a aby touto redukcí nebyla potlačena viditelnost anatomických struktur, např. švů určujících polohu kraniometrických bodů. Jak ukazují výsledky metric-

kého hodnocení, navržený postup a nastavení stupně redukce modelů poskytují optimální rozlišení pro zachování průběhu lebečních švů. Může tak být naším doporučením pro rutinní antropologickou praxi.

Dalším důležitým krokem při zpracování fragmentárního kosterního nálezu pak bude optimalizace rekonstrukce chybějících částí.

## 6.2. Určení pohlaví na virtuálních modelech lebek

Na základě získaných výsledků srovnání pohlavní diagnózy na restaurovaných a nerestaurovaných lebkách je možné říci, že určení pohlaví u nerestaurovaných lebek vykazuje větší míru spolehlivosti než u lebek restaurovaných. To je mj. dáno tím, že morfologie výsledného modelu lebky byla ovlivněna restaurací, a to převážně v případech nekompletních kosterních nálezů, které v mnoha případech dále vykazovaly deformace tafonomickou distorzí. Tyto faktory rovněž ovlivňují i samotné určení pohlaví, kdy u restaurovaných lebek nebylo často možné získat kompletní morfometrická data. Nekompletnost lebek byla také častou překážkou pro aspektivní i metrické hodnocení, přičemž v některých případech dosahovala míra neshody až 50 %.

Výsledky srovnání ukázaly, že spolehlivost osteometrického určení pohlaví je ovlivněna těmi kranio-metrickými body, jejichž poloha se ve virtuálním prostředí obtížně určuje. Ovlivněny jsou pak především šířkové rozměry lebky (*euryon* – *euryon*, *zygion* – *zygion*), u kterých není technika měření založena na topograficky přesně definovaných bodech, ale na principu maximální získané vzdálenosti v okolí kosterní struktury.

Vedle zachovalosti nálezu je pravděpodobnost správného určení pohlaví současně ovlivněna přesností použitých metod. Podle W. Krogmana (1986) je pravděpodobnost správného určení pohlaví podle kompletní pánve 95 %. Na kompletní lebce se odhaduje s 90% přesností. Pro program COLIPR je udávána přesnost diskriminačních rovnic po cross validaci v rozmezí 85–90 % (Urbanová 2009). Je obecně známo, že spolehlivost osteometrických metod na lebce je výrazně populačně specifická. U počítačových aplikací, které využívají zabudované referenční databáze, jsou výsledky ovlivněny správným výběrem populace a její relevantností ke zkoumanému kosternímu nálezu. Programy FORDISC i 3D-ID jsou aplikace s primárním využitím ve forenzní antropologii a zahrnují referenční populace, které jsou relevantní pro kosterní nálezy zkoumané v kontextu severoamerických etnických skupin 19. a 20. století (Urbanová et al. 2014). Jejich využití pro účely středoevropské bioarcheologie je přinejmenším diskutabilní a částečně to dokazují i získané výsledky.

Podle G. Maata et al. (1997) je shoda mezi určením pohlaví na pánvi a na lebce rovna 95,7%. V naší studii dosáhla spolehlivost použitých metod na lebce 75 %, pokud bylo bráno v úvahu jak morfometrické, tak morfologické zhodnocení. U samotného morfoskopického hodnocení se jednalo o shodu 95,8 % (pokud nebyly brány v úvahu lebky a pánve s určením pohlaví jako indiferentní).

## 7. Závěr

Virtuální restaurační postupy jsou vhodné pomocné metody pro neinvazivní kompletaci kosterních nálezů v kosterní antropologii a bioarcheologii. Mohou výrazně usnadnit základní kroky antropologické analýzy, jako je např. určení pohlaví, a rozšířit použitelnost základních antropologických technik na výrazně poškozené nálezy. Současně je však nutné brát ohled na skutečnost, že virtuální restaurace patří mezi aproximativní postupy, které do analýzy vnášejí vysokou míru subjektivity.

*Projekt vznikl v rámci specifického výzkumu „Aplikace metod analýzy obrazu a tvaru v rutinním zpracování kosterních nálezů“ (MUNI/A/0835/2012) a „Bioarcheologické metody pro komplexní hodnocení raně středověkých populací“ (MUNI/A/0983/2013).*

## Literatura

- Arbour, V. – Currie, P. 2012: Analyzing Taphonomic Deformation of Ankylosaur Skull Using Retrodeformation and Finite Element Analysis, PLoS ONE 7 (6), e39323.*
- Acsádi, G. – Nemeskéri, J. 1970: History of Human Life Span and Mortality. Budapest.*
- Beckett, R. – Conlogue, G. 2010: Paleoimaging. Field applications for cultural remains and artifacts. Boca Raton – London – New York.*
- Buikstra, J. – Ubelaker, D. 1994: Standards for data collection from human skeletal remains: Proceedings of a seminar at the Field Museum of Natural History. Fayetteville.*
- Brůžek, J. 2002: A Method for Visual Determination of Sex, Using the Human Hip Bone, American Journal of Physical Anthropology 117, 157–168.*
- Decker, S. – Davy-Jow, S. – Ford, J. – Hilbelink, D. 2011: Virtual determination of sex: metric and nonmetric traits of the adult pelvis from 3D computed tomography models, Journal of Forensic Science 56 (5), 1107–1114.*
- Fetter, V. – Prokopec, M. – Suchý, J. – Titlbachová, S. 1967: Antropologie. Praha.*
- Fojtík, P. 2010: Dětkovice 2010, Za zahradama, parc. č. 1106, k. ú. DĚTKOVICE, okr. Prostějov, „předstihový výzkum na ploše určené k výstavbě RD“ (nálezná zpráva, Ústav archeologické památkové péče Brno, č. akce 212/10).*
- Fojtík, P. – Šmíd, M. 2008: Slovanské hroby a pohřebiště na Prostějovsku. Pravěk Supplementum 18. Brno.*
- Grabherr, S. – Cooper, C. – Ulrich-Bochsler, S. – Uldin, T. – Ross, S. – Oesterhelweg, L. – Bolliger, S. – Christe, A. – Schnyder, P. – Mangin, P. – Thali, M. 2009: Estimation of sex and age of “virtual skeletons” – a feasibility study, European Society of Radiology 19 (2), 419–429.*
- Gunz, P. – Mitteroecker, P. – Neubauer, S. – Weber, G. – Bookstein, F. 2009: Principles for the virtual reconstruction of hominid crania, Journal of Human Evolution 57, 48–62.*
- Howells, W. W. 1973: Cranial Variation in Man: A Study by Multivariate Analysis of Patterns of Difference among Recent Human Populations. Papers of the Peabody Museum 67. Cambridge, Mass.*
- Chapman, T. – Lefevre, P. – Semal, P. – Moiseev, F. – Sholukha, V. – Louryan, S. – Rooze, M. – Van Sint Jan, S. 2014: Sex determination using the Probabilistic Sex Diagnosis (DSP: Diagnose Sexuelle Probabiliste) tool in a virtual environment, Forensic Science International 234, 189.e1–189.e8.*

- Jantz, R. – Ousley, S. 2005: *FORDISC 3: Computerized Forensic Discriminant Functions*. Version 3.0. The University of Tennessee, Knoxville.
- Jurda, M. – Urbanová, P. – Králík, M. 2013: The Post-Mortem Pressure Distortion of Human Crania Uncovered in an Early Medieval Pohansko (Czech Republic) Graveyard, *International Journal of Osteoarchaeology*, doi:10.1002/oa.2321.
- Knussmann, R. 1988: *Anthropologie, Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen* (4. Auflage des Lehrbuchs der Anthropologie begründet von Rudolf Martin), Band I und II. Jena – New York – Stuttgart.
- Krogman, W. 1986: *The Human Skeleton in Forensic Medicine*. Springfield.
- Landis, J. R. – Koch, G. G. 1977: The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33, 159–174.
- Luo, L. – Wang, M. – Tian, Y. – Duan, F. – Wu, Z. – Zhou, M. – Rozenholc, Y. 2013: Automatic sex determination of skulls based on a statistical shape model, *Computational and Mathematical Methods in Medicine* 2013, 1–6.
- Maat, G. – Mastwijk, R. – Van der Velde, E. 1997: On the Reliability of Non-metrical Morphological Sex Determination of the Skull Compared with that of the Pelvis in The Low Countries, *International Journal of Osteoarchaeology* 7, 575–580.
- Murail, P. – Brůžek, J. – Houët, F. – 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*, n. s. 17 (3–4), 167–176.
- Slice, D. – Ross, A. 2009: 3D-ID: geometric morphometric classification of crania for forensic scientists. Version 1.0 (1.5.2013), <http://www.3d-id.org>.
- Urbanová, P. 2009: *A Study of Human Craniofacial Variation by using Geometric Morphometrics*. Brno (Thesis. Masaryk University, Faculty of Science, Department of Anthropology).
- Urbanová, P. – Králík, M. 2008: COLIPR, Version 1.5.2.
- Urbanová, P. – Králík, M. – Mořkovský, T. – Čuta, M. – Eliášová, H. – Baďurová, M. 2010: Virtuální rekonstrukce mumifikovaných lidských pozůstatků. In: Kuchařík, M. – Gál, L. – Košťál, J. (eds.), *Počítačová podpora v archeologii III. Sborník příspěvků z deváté konference konané v Litomyšli 19. – 21. 5. 2010*. Praha, 61–72.
- Urbanová, P. – Ross, A. H. – Jurda, M. – Nogueira, M. I. 2014: Testing the Reliability of Software Tools in Sex and Ancestry Estimation in a Multi-Ancestral Brazilian Sample, *Legal Medicine (Tokyo)* 16 (5), 264–273.
- Walrath, D. – Turner, P. – Bruzek, J. 2004: Reliability test of the visual assessment of cranial traits for sex determination, *American Journal of Physical Anthropology* 125, 132–137.
- Weber, G. 2001: Virtual anthropology. A call for glasnost in paleoanthropology, *The Anatomical Record* 265, 193–201.
- Weber, G. – Bookstein, F. 2011: *Virtual Anthropology. A guide to a new interdisciplinary field*. Wien.
- White, T. – Folkens, P. 2005: *The Human Bone Manual*. London.

## APPLICATION OF METHODS OF VIRTUAL ANTHROPOLOGY FOR SEX ASSESSMENT IN FRAGMENTED SKELETAL REMAINS

Sex assessment is one of the essential steps in determining demographic characteristics of an individual from skeletal remains (Acsádi – Nemeskéri 1970). Sex determination from human skulls usually requires compact and well-preserved bones (Walrath *et al.* 2004). Yet, human skeletal assemblages from archaeological sites are often fragmented and incomplete. Therefore, restoration, i.e., bone re-assembly without the estimation of missing parts, and/or reconstruction, i.e., restoration with the estimation of missing parts, must be the very first step when examining any archaeological skeletal remains (Gunz *et al.* 2009; White – Folkens 2005). Unlike traditional approaches,

which may interfere with the original bone integrity, the methods of virtual anthropology offer the non-destructive, non-invasive computer-assisted restoration or reconstruction of skeletal fragments. Moreover, the digital nature of restored virtual models facilitates subsequent anthropological examination.

The main purpose of this study was to outline an optimized approach to the virtual anatomical restoration of fragmented human skulls. In addition, it aimed to examine applicability of currently available sex determination methods in virtually restored skulls and to confront the acquired results with sex diagnoses from pelvic bones.

In total, 268 human skull fragments comprising 32 skulls from the Dětkovice site (Prostějov district, Czech Republic) dated to the early medieval period (11<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> century) were scanned using a Next Engine laser scanner (Fig. 1), edited in various programs, and eventually restored in Amira software following an optimized procedure for virtual anatomical restoration. Of the 32 studied skulls, 20 were fragmented, while 12 were preserved completely with mandibles.

In order to test the applicability of virtual models for sex assessment, 3D restored skulls were subject to sex estimation using the visual (morphoscopic) method by Walrath et al. (2004) and selected osteometric methods. Osteometric assessment was based on 49 landmarks digitized on each skull (Tab. 2; Fig. 5). The obtained three-dimensional Cartesian coordinates were then processed in order to extract linear measurements or served as raw input data for PC-assisted sex estimation. Altogether, three different osteometric PC-assisted techniques were tested: FORDISC 3 (Jantz – Ousley 2005), 3D-ID (Slice – Ross 2009), and COLIPR (Urbanová – Králík 2008). Ultimately, final sex diagnoses were established on the basis of combining osteometric and visual methods and subsequently confronted with assessments from pelvic bones. Kappa statistics was applied to measure the inter-observer agreement and the agreement between sex diagnoses by the tested methods.

Of the studied sample, 18 skulls were determined as female and 13 as male. The results of all methods were in agreement in 17 cases (55%). The results of sex assessments were in agreement with results from pelvic bones in 21 out of 28 cases (75%).

The results showed that, of the sex determination methods in skulls, visual assessment exhibited the strongest agreement ( $\kappa = 0.75$ ; 95% confidence interval 0.52–0.97; Tab. 5) with diagnosis from pelvic bones. If individuals of indeterminate sex were omitted, the results revealed a high level of agreement ( $\kappa = 0.80$ ; 95% confidence interval 0.54–1). If tested against the state of preservation, Kappa statistics revealed a stronger level of agreement between results from pelvic bones and those from skulls for the set of non-restored skulls. The population-specificity of the applied algorithms combined with the incompleteness and poorer preservation of restored skulls was identified as the main sources that affected the final reliability rates.

Differences in 21 measurements obtained by two different observers were tested by paired t-test at a 5% level of statistical significance. The comparison showed statistically significant differences in 7 measurements (Tab. 4). The results showed that the inter-observer error was mainly caused by those landmarks whose definitions were inconsistent for physical and virtual environments (e.g., euryon).

In conclusion, virtual anatomical restoration proved to be a helpful procedure that facilitates necessary steps in the routine anthropological examination of archeological skeletal remains. Its application, however, has to be undertaken with caution as it brings additional technical and methodological difficulties into the analysis.

Tab. 1. An optimized number of polygons in relation to the size and shape of a skull fragment as well as in relation to the preservation of morphological quality.

Tab. 2. Definition of landmarks (Fig. 5) according to Fetter et al. (1967) and Knussmann (1988).

Tab. 3. Results of sex assessment according to the used methods.

Tab. 4. Results of t-test with statistically significant differences between measurements obtained by 2 different observers.

Tab. 5. The results of sex assessment from skulls compared with sex assessment from pelvic bones – Kappa statistics. A) When the FDB database of FORDISC was used; percentage agreement



= 80.7%. B) When Howells database of FORDISC was used; percentage agreement = 76.9%. C) When 3D-ID was used; percentage agreement = 57.6%. D) When the morphological method was used; percentage agreement = 85.7%. When individuals with sex determined as indifferent were omitted, percentage agreement = 95.8% and Kappa statistics:  $\kappa = 0.91$  (95% confidence interval 0.75–1).

Tab. 6. Kappa statistics – to quantify the agreement of observers:  $\kappa = 0.44$ ; 95% (confidence interval 0.15–0.72); Percentage agreement = 66.6%. When the individuals with sex determined as indifferent were eliminated, percentage agreement = 90.9% and Kappa statistics:  $\kappa = 0.80$  (95% confidence interval 0.54–1).

Fig. 1. A model of a maxilla (grave 38) with clip and pad before trimming (left) and after trimming (right; Next Engine Scan Studio HD software).

Fig. 2. A model of a mandible (grave 69) before alignment (3 reference points – white) and after alignment (Next Engine Scan Studio HD software).

Fig. 3. A model of a fragment before fusion (left) and after fusion (right) (Next Engine Scan Studio HD software).

Fig. 4. Visualization of vertex count changes (VC) in optimized groups. Detail of right condylar processes (grave 41): A) no reduction, VC is 887 667 (after holes have been filled); B) optimal reduction according to Tab. 1, reduced 2x (VC is 443 805) and C) over-reduction, reduced 16-times, VC is 55 458.

Fig. 5. Digitized landmarks according to the definitions in Tab. 2.

Mgr. Marie Jandová  
Laborař morfologie a forenzní antropologie  
Ústav antropologie  
Přirodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Kotlářská 2, 611 37 Brno  
jandovam@mail.muni.cz

RNDr. Petra Urbanová, Ph.D.  
Laborař morfologie a forenzní antropologie  
Ústav antropologie  
Přirodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Kotlářská 2, 611 37 Brno  
urbanova@sci.muni.cz

Mgr. Ivana Šplíchalová  
Laborař morfologie a forenzní antropologie  
Ústav antropologie  
Přirodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Kotlářská 2, 611 37 Brno  
splichalovaivana@mail.muni.cz

